

ANALISI DEL CICLO DI VITA DEL PELLETT DA SRF ATTRAVERSO MISURE DIRETTE DEI CONSUMI ENERGETICI

G. Bidini¹, F. Cotana¹, C. Buratti¹, F. Fantozzi¹, M. Barbanera¹

¹Centro Ricerca Biomasse (CRB), Università degli Studi di Perugia

Via M.Iorio, 8 – 06128 Perugia

Tel: 075.5004209 – Fax 075.5153321

e-mail: gianni.bidini@crbnet.it, cotana@crbnet.it, cburatti@crbnet.it, fanto@crbnet.it, barbanera@crbnet.it

SOMMARIO

In Italia la diffusione del pellet sta incontrando numerose difficoltà, a causa della mancanza di segatura (la principale materia prima) a prezzi economici. Per questa ragione sembra interessante valutare la possibilità di produrre tale biocombustibile da Short Rotation Forestry. Nel presente lavoro è stato valutato l'impatto ambientale legato al calore prodotto dalla combustione di pellet ottenuto da colture dedicate ad uso energetico (in particolare pioppo), effettuando l'analisi del ciclo di vita (LCA: Life Cycle Assessment) mediante il software commerciale Simapro 6.0. Il ciclo di vita considerato comprende la fase agricola, il trasporto della biomassa all'impianto di pellettizzazione, la trasformazione in pellet, il suo trasporto presso l'utilizzatore finale e la combustione in caldaia domestica. I flussi di massa ed energia relativi al processo di produzione del pellet sono stati ottenuti effettuando delle misure presso un impianto di pellettizzazione italiano, mentre gli altri dati sono stati desunti dalla Letteratura.

Lo studio mette in evidenza che le operazioni agricole costituiscono la principale fonte dell'impatto ambientale complessivo, il quale a sua volta risulta essere considerevolmente inferiore a quello causato dal calore prodotto mediante combustione del metano.

INTRODUZIONE

Il pellet di legno ha conquistato negli ultimi anni una posizione consolidata nel mercato energetico mondiale, mentre in Italia si trova ancora in una fase di sviluppo dato che si attende una specifica normativa che classifichi il prodotto e la sua qualità. Il pellet può essere ottenuto da diverse materie prime come gli scarti dell'industria della lavorazione del legno, i residui agricoli, le patate e le colture a rapido accrescimento (SRF). Quest'ultima fonte sta suscitando un notevole interesse a causa della scarsa disponibilità di segatura nel nostro paese; occorre comunque tener presente che la produzione di pellet da SRF richiede complessivamente un maggiore quantitativo di energia.

Sulla base di tali considerazioni è sembrato opportuno realizzare l'analisi del ciclo di vita (LCA) del pellet da coltivazioni di pioppo a rapido accrescimento, in modo da fornire una procedura oggettiva per valutare l'impatto ambientale dell'intera filiera energetica. Il biocombustibile risultante non è di alta qualità, in accordo con la raccomandazione CTI-R04/5 [1], in quanto caratterizzato da un contenuto di ceneri compreso tra l'1,5% e il 2,5%, dovuto all'elevata percentuale di corteccia presente nel materiale di partenza.

La principale difficoltà del presente studio è rappresentata dal reperimento di dati relativi alla fase di pellettizzazione, a causa dell'assenza in Letteratura di valori attendibili. Pertanto è stato monitorato un impianto italiano di pellettizzazione, durante il processo produttivo, al fine di misurare i consumi energetici delle diversi fasi.

ANALISI DEL CICLO DI VITA

L'analisi del ciclo di vita è stata realizzata con il supporto

del software commerciale SimaPro 6.0. Esso contiene una banca dati di riferimento, modificabile secondo necessità, comprendente i dati più frequentemente richiesti sui materiali, i processi di produzione, la generazione di energia, la distribuzione e lo smaltimento dei prodotti. Definito il prodotto, SimaPro è in grado di calcolare il suo impatto ambientale durante il ciclo di vita in ogni sua fase.

Le principali fasi di cui si compone un'analisi LCA sono: definizione dello scopo e dell'obiettivo dello studio, analisi dell'inventario, valutazione degli impatti ambientali ed interpretazione e miglioramento (ISO 14040 [2]). Di seguito viene descritta ciascuna fase con riferimento al presente studio.

Definizione dello scopo e dell'obiettivo

La prima fase è la "Definizione dello scopo e dell'obiettivo", come riportato nella norma ISO 14041 [3], e include la scelta dell'unità funzionale.

Lo scopo dello studio è quello di valutare l'impatto ambientale relativo alla produzione di energia (in particolare termica) derivante dalla combustione di pellet. Pertanto, come unità funzionale si è considerato 1 MJ di energia termica, a cui sono stati normalizzati tutti i flussi di massa ed energia inventariati. In Fig. 1 sono rappresentati i confini del sistema preso in esame, in cui sono compresi: la produzione di cippato da SRF di pioppo, il suo trasporto all'impianto di pellettizzazione, la sua trasformazione in pellet, il trasporto del biocombustibile all'utente finale e la combustione in una caldaia domestica (22 kW), incluso lo smaltimento delle ceneri.

Relativamente alla fase agricola si è scelto un impianto con queste caratteristiche:

- densità: 10 000 talee/ha;

- periodo di coltivazione: 8 anni;
- frequenza di taglio: 2 anni.

Le operazioni considerate per la fase di coltivazione del pioppo sono mostrate in Tab. 1.

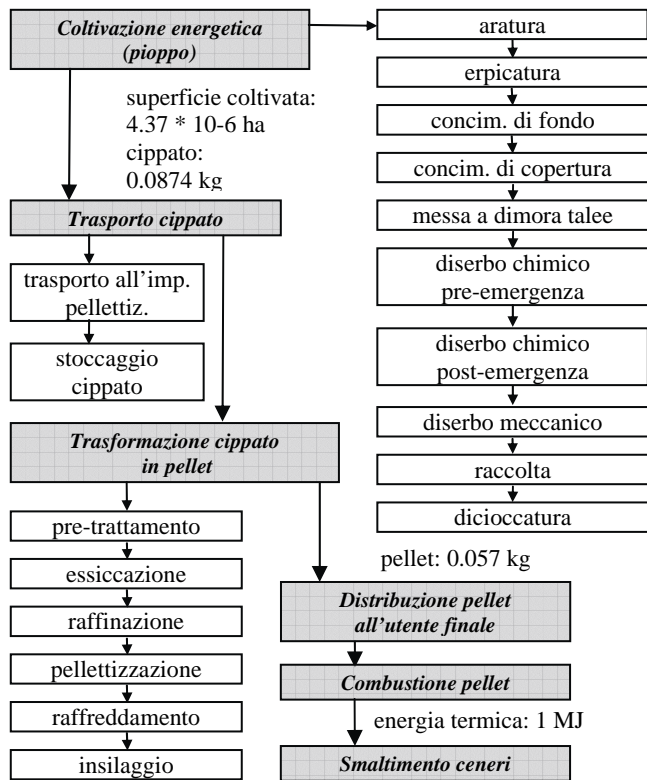


Figura 1: Produzione di energia termica dalla combustione di pellet. I dati sono riferiti all'unità funzionale (1 MJ di energia termica derivante dalla combustione del pellet).

Tabella 1: Modello colturale adottato per il pioppo SRF [4].

Operazioni colturali	Anno							
	1	2	3	4	5	6	7	8
aratura	x							
erpicatura	xx							
concim. di fondo	x		x		x		x	
concim. di copert.	x	x	x	x	x	x	x	x
messa a dimora talee	x							
diserbo chi. pre-eme.	x		x		x		x	
diserbo chi. post-eme.	x	x	x	x	x	x	x	x
diserbo meccanico	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx	xx
raccolta		x		x		x		x
diciocatura								x

Analisi di inventario

L'analisi di inventario consiste nella raccolta dei dati e nelle procedure di calcolo volte a quantificare i flussi rilevanti in entrata e in uscita del sistema considerato; lo scopo principale è ricostruire il percorso attraverso il quale i flussi di energia e materiali consentono il funzionamento del sistema produttivo in esame, mediante tutti i processi di trasformazione e di trasporto.

Coltivazione energetica. Si è considerata una resa produttiva di biomassa pari a 20 tonnellate di sostanza secca per ettaro all'anno ed un ciclo colturale di 8 anni. Per tale ragione si è preso in esame un processo relativo ad un anno

standard, in cui ogni operazione colturale viene considerata un numero di volte pari al valor medio negli otto anni.

Per ciascuna operazione sono stati valutati i seguenti dati: il quantitativo di macchinari impiegati, il consumo di carburante dei macchinari, l'ammontare di fertilizzanti e di pesticidi usati, le emissioni atmosferiche prodotte dai motori diesel, le emissioni di metalli pesanti derivanti dall'usura dei pneumatici [5], le emissioni in aria di NH₃, N₂O, NO_x prodotte dall'applicazione dei fertilizzanti, le emissioni in acqua derivanti dall'impiego dei fertilizzanti [6], le emissioni in aria causate dall'applicazione dei pesticidi e l'inquinamento del suolo prodotto dai pesticidi che rimangono nel terreno [7]. In Tab. 2 sono riportati alcuni dati significativi impiegati per la fase agricola. Le talee non sono state considerate tra gli input, in quanto si è ipotizzato che derivino dal materiale tagliato nel precedente ciclo colturale.

Trasporto cippato. La seconda fase è rappresentata dal trasporto di cippato all'impianto di pellettizzazione mediante un autocarro da 28 ton, caratterizzato da un fattore di carico del 47 % e assumendo una distanza media di 80 km. Le emissioni in aria, suolo e acqua, i consumi di carburante e l'ammontare di veicoli impiegati sono stati calcolati con riferimento a [8]. Si è quindi considerata la fase di stoccaggio del cippato presso l'impianto di trasformazione attraverso una pala gommata (155 kW, capacità di carico di 5 m³). Il consumo di carburante è stato determinato impiegando dati comunicati privatamente e considerando un ciclo di carico/scarico di cippato con queste caratteristiche:

- distanza percorsa (andata e ritorno): 300 metri;
- velocità media: 10 km/h;
- tempo medio per il carico o lo scarico: 10 secondi.

Nelle banche dati a disposizione non sono presenti dati relativi alla produzione di tale macchinario, per cui si è assunta una pala gommata con una potenza di 110 kW [9].

Trasformazione del cippato in pellet. In Letteratura non sono disponibili dati relativi alla trasformazione di biomassa legnosa in pellet suddivisi tra i diversi sottoprocessi. Per tale ragione è stato monitorato un impianto di pellettizzazione situato a Gorizia per valutare i flussi di massa ed energia delle diverse fasi. L'impianto è caratterizzato da una capacità produttiva di 2 ton/ora.

In Tab. 3 sono riportate le diverse sezioni dello stabilimento:

- pre-trattamento del cippato;
- essiccazione (la fonte di calore considerata è una caldaia a gas naturale; il rendimento è di 1000 kW termici per tonnellata di acqua evaporata, la quale viene dispersa in atmosfera);
- raffinazione (è realizzata attraverso due mulini che riducono dimensionalmente il materiale fino alla granulometria desiderata);
- pellettizzazione (due pellettizzatrici alimentate da motori diesel; ciascuna è munita di un'unità di condizionamento per la miscelazione di amido di mais);
- raffreddamento (dopo la pressatura il pellet raggiunge una temperatura di 70-80 °C quindi viene portato a 20 °C in un raffreddatore controcorrente);
- insilamento.

I consumi di energia elettrica dei macchinari sono stati misurati attraverso un sistema di acquisizione dati (Multiver 3SN Dossena); si tratta di un analizzatore portatile di grandezze elettriche per la misura dei parametri di rete e dei principali fenomeni connessi con la valutazione della qualità

Tabella 2: Principali dati considerati per la fase agricola.

Operazioni colturali	Macchinari	Diesel (kg/ha)	Materiali (kg/ha)	Tempo (ore/ha)
aratura	trattore (80 kW) + aratro a 2 solchi	41.550		2.340
erpicultura	trattore (80 kW) + erpice a denti elastici	41.200		0.790
concimazione di fondo	trattore (51 kW) + spandiconcime	1.7900	fertilizzante NPK (8-24-24): 500	0.160
concimazione di copertura	trattore (51 kW) + spandiconcime	5.0300	urea: 218	0.450
mesa a dimora talee	trattore (51 kW) + trapiantatrice a 2 file	67.280		6.050
diserbo chimico pre-emerg.	trattore (51 kW) + macchina irroratrice	1.7900	Metolachlr 1.7 Linuron: 0.5 Pndmthlin: 0.8	0.160
diserbo chimico post-emerg.	trattore (51 kW) + macchina irroratrice	13.530	Pyridate: 1.1 Fluazifop-p-butyl: 0.6	1.210
diserbo meccanico	trattore (51 kW) + erpice rotativo	7.8100		0.700
raccolta	trattore (130 kW) + trincia-raccogliatrice	109.15		1.590
diciocatura	trattore (80 kW) + erpice a denti elastici	240.40		13.36

dell'energia. Ciascuna sezione è stata monitorata per un periodo variabile di tempo in base al periodo di funzionamento del relativo macchinario.

Tabella 3: Caratteristiche dell'impianto di pellet esaminato e consumi di energia elettrica misurati con il Multiver 3SN Dossena.

Sezioni	Potenza installata (kW)	Consumi di en. elettrica (kWh/kg _{pellet})	Materiali
Pre-trattamento	10.27	0.0019	
vasca di caricamento	5.5	1.00E-3	
vibrovaglio	2.2	4.06E-4	-
separator magnetico	0.37	6.93E-5	
elevatore a tazze	2.2	4.06E-4	
Essiccazione	100.9	0.0188	
vasca di caricamento	7.5	1.40E-3	
essiccatore a tamburo	10	1.86E-3	Metano:
aspiratore	75	1.40E-2	7.22E-4
valvola stellare	2.2	4.08E-4	kWh/kg _{pell.}
elevatore a tazze	2.2	4.08E-4	
trasportatore a coclea	4	7.47E-4	
Raffinazione	202	0.0377	
2 estrattori a coclea	1.8 (*2)	3.36E-4 (*2)	
2 coclee di alimentaz.	2.2 (*2)	4.09E-4 (*2)	-
2 mulini a martelli	75 (*2)	1.40E-2 (*2)	
2 pompe volumetriche	22 (*2)	4.11E-3 (*2)	
Pelletizzazione	16	0.0030	
2 tramogge di aliment.	2.2 (*2)	4.11E-4 (*2)	diesel:
2 condizionatori	4 (*2)	7.52E-4 (*2)	9.9 g/ kg _{pellet} .
2 presse	-	-	amido di mais:
2 trasportatori a coclea	1.8 (*2)	3.37E-4 (*2)	0.01 kg/ kg _{pellet}
Raffreddamento	4.8	0.0009	
estrattore a coclea	1.8	3.38E-4	-
raffreddatore	3	5.62E-4	
Insilamento	2.95	0.0006	
vibrovaglio	0.75	1.53E-4	-
elevatore a tazze	2.2	4.47E-4	

Inoltre sono stati considerati anche i materiali impiegati per la costruzione dell'impianto, ma non il loro assemblaggio nè l'impatto relativo all'occupazione del terreno (1 ha).

Distribuzione di pellet all'utente finale. Il pellet immagazzinato in sili di stoccaggio è distribuito mediante autocisterne (peso lordo 40 ton, fattore di carico 46%, distanza percorsa 80 km) munite di sistemi pneumatici e delle relative tubazioni, per stoccare il biocombustibile in appositi depositi. I flussi di massa ed energia sono stati determinati analogamente al processo di trasporto del cippato.

Combustione. Per tale fase sono stati inventariati (Tab. 4), oltre alle emissioni in atmosfera dovute alla combustione del pellet in una caldaia da 22 kW, i materiali necessari (non l'energia spesa per il loro assemblaggio) per la costruzione della caldaia, delle tubazioni per la distribuzione del calore nell'abitazione, dell'accumulatore di calore, del silo di

stoccaggio e del sistema di estrazione del pellet [10, 11]. Il quantitativo di energia elettrica consumato dalla pompa di circolazione dell'acqua e dalla coclea di estrazione del pellet si assume pari a 0.0027 kWh/MJ di energia termica (230 W di potenza installata).

Tabella 4: Assunzioni per la fase di combustione.

Materiali	Quantità	Categoria	Quantità
lana di roccia	5 kg	utilizzo	1600 ore/anno
ghisa	12 kg	efficienza	82 %
rame	5.6 kg	tempo di vita caldaia	20 anni
acciaio	500 kg	consumo di pellet	8.8 ton/anno
polietilene	1.2 kg	rifornimenti del silo	2 all'anno
cemento	3.4 m ³	volume del silo	6.8 m ³
Sostanza		mg/MJ_{energia termica}	
CO		146.34	
TOC		3.66	
CH ₄		0.67	
PAH		0.07	
particolato		19.51	
NO _x		85.37	
NMVOC		0.49	

Smaltimento delle ceneri. Si assume un contenuto di ceneri della biomassa del 2%, corrispondente a 1.05 mg/MJ di energia termica prodotta e che lo smaltimento preveda lo spandimento diretto su suolo agricolo come fertilizzante; ciò equivale ad assumere un consumo evitato di concime potassico pari a 1,05 mg/MJ di energia termica.

Lo smaltimento ed il riciclaggio dei macchinari e delle infrastrutture non sono stati presi in esame in questo studio.

Valutazione di impatto ambientale

La valutazione di impatto ambientale legato alla produzione di energia termica dalla combustione di pellet è stata condotta impiegando tre diversi metodi: EcoIndicator 99, EPS 2000 e EDIP.

Il metodo EcoIndicator 99 è un approccio *damage-oriented*, basato sul peso attribuito da un gruppo di esperti ai differenti tipi di danno causati dalle categorie di impatto. Le tre versioni dell'EcoIndicator riflettono l'incertezza dell'analisi LCA. Ciascuna di esse considera in maniera diversa il potenziale danno legato ad una particolare sostanza. La visione ugualitaria considera tutte le sostanze che possono provocare effetti dannosi, anche se su tali effetti non c'è consenso, e li considera sul lungo periodo. È un approccio basato sul presupposto che i problemi ambientali siano difficilmente risolvibili e possano portare a catastrofi. La prospettiva gerarchica considera tutte le sostanze sui cui effetti dannosi c'è consenso, anche se non sono dimostrati, e si esplicano sul medio periodo; assume inoltre che i problemi ambientali

possano essere risolti attraverso adeguate scelte politiche. Infine la visione individualista considera solo le sostanze i cui effetti dannosi, sul breve periodo (100 anni al massimo), sono dimostrati; assume inoltre che l'adozione di opportune tecnologie e lo sviluppo economico possano risolvere tutti i problemi ambientali. La differenza eclatante rispetto alle altre due prospettive è l'assunzione secondo cui i combustibili fossili non sono esauribili.

Il metodo EPS 2000 nasce per assistere i progettisti nella fase di sviluppo di nuovi prodotti. Gli impatti sono valutati per ricavare un parametro univoco basato sul concetto WTP (*Willingness To Pay*) e attribuendo un valore economico al danno. Tale metodo comprende le fasi di caratterizzazione e ponderazione, ma non quella di normalizzazione e in particolare prende in esame gli effetti delle sostanze inquinanti sulla salute umana.

A differenza del metodo precedente, l'EDIP ha un approccio *mid-point* che prevede l'applicazione di fattori di peso sulla base di obiettivi ambientali politici fissati dal Governo Danese o da altri protocolli internazionali. La normalizzazione avviene dividendo i valori della caratterizzazione, che si riferiscono al mondo per i danni globali e alla Danimarca per i danni locali, per il danno per persona relativo alla categoria e all'anno 1990. Invece la valutazione avviene moltiplicando il danno normalizzato per il rapporto tra il danno per persona relativo alla categoria e all'anno 1990 e quello per persona che si è deciso che sia nel 2000 nella categoria considerata.

RISULTATI E DISCUSSIONE

EcoIndicator 99

In Tab. 5 è riportato il valore del *single score* (2.96 mPt: millipoint) per ciascuna categoria di danno, ottenuto con il metodo EcoIndicator 99. Si può notare che l'impatto ambientale relativo alla categoria *Salute Umana* è maggiore rispetto a quello sulla *Qualità dell'Ecosistema* e sull'*Uso delle Risorse*.

In particolare si è notato che tra le categorie di impatto, *Malattie Respiratorie (sostanze inorganiche)* e *Risorse Fossili* sono quelle preponderanti, soprattutto a causa delle emissioni di particolato e ossidi di azoto dalla caldaia a pellet e dalle pellettizzatrici. Invece i macroprocessi che pesano maggiormente sono la coltivazione energetica del pioppo (36.8% dell'impatto totale) e la fase di trasformazione del cippato in pellet (30%).

In Tab. 6 si osserva che, all'interno della fase agricola, i due principali contributi all'impatto di tale macroprocesso sono rappresentati dalla concimazione di copertura e di fondo. Invece nella fase di trasformazione di cippato in pellet il peso maggiore è da attribuire al processo di pellettizzazione (61.2% del totale), prevalentemente a causa del consumo di gasolio e amido di mais.

E' sembrato interessante determinare anche il carico ambientale dell'intera filiera, prendendo in esame soltanto i flussi di massa ed energia senza l'impatto legato alla costruzione dei macchinari e delle infrastrutture impiegate nei diversi processi. In tal caso il valore del *single score* è pari a 2.57 mPt (Tab. 7), il che significa che tale assunzione comporta un errore di circa il 15%.

Infine si è realizzato un confronto con la filiera relativa al calore prodotto dalla combustione di metano, assumendo i seguenti processi (presenti all'interno della libreria di

SimaPro) [12]:

- estrazione e produzione di metano onshore e offshore in Germania, Algeria, Olanda e Russia;
- trasporto in Italia mediante gasdotti;
- distribuzione ai consumatori attraverso reti locali di gasdotti;
- combustione in caldaia (<100 kW).

Tabella 6: Contributi delle diverse operazioni colturali all'impatto ambientale della fase agricola.

Operazioni colturali	Contributi (%)
aratura	1,15
erpicoltura	1,25
concimazione di fondo	29,35
concimazione di copertura	48,37
messa a dimora talee	1,37
diserbo chimico pre-emergenza	0,62
diserbo chimico post-emergenza	1,65
diserbo meccanico	7,80
raccolta	3,18
diciocatura	5,26

I risultati mostrano (Fig. 2) che il calore prodotto da metano (4.83 mPt) ha un impatto superiore rispetto a quello ottenibile dalla combustione del pellet (2.96 mPt), principalmente a causa del consumo di risorse fossili.

Eps 2000

EPS 2000 fornisce un valore del *single score* pari a 26.4 mPt (Tab. 8), dovuto per gran parte alla categoria di danno *Quantità di Risorse Abiotiche* e alla relativa categoria di impatto *Esaurimento delle Risorse* (15.6 mPt). Quest'ultimo valore è causato principalmente dalla coltivazione energetica del pioppo e dalla combustione del pellet, in quanto il metodo attribuisce un elevato fattore di peso ai metalli impiegati nella produzione dei macchinari (soprattutto per il nickel). Altra categoria di impatto caratterizzata da un elevato punteggio (8.76 mPt) è l'*Aspettativa di vita* dovuta alla fase di combustione del pellet, visto l'elevato fattore di peso attribuito alle emissioni in atmosfera dei composti policiclici aromatici.

Relativamente alla distribuzione del *single score* tra i diversi macroprocessi, si può notare che contribuiscono maggiormente all'impatto globale la combustione del pellet (44.5%) e la coltivazione energetica del pioppo (30.3%); su quest'ultima, a sua volta, pesano principalmente i processi di concimazione di fondo (45.7%) e di copertura (32%), a causa dei minerali (in particolare fosforo e nickel) e del metano impiegati per la preparazione dei fertilizzanti.

Applicando questo metodo il *single score* della filiera, escludendo macchinari e infrastrutture, diventa 15.7 mPt (Tab. 9), il che comporta un errore pari al 40.5%.

Infine il confronto con il metano mette in evidenza che il calore prodotto da fonte fossile presenta un impatto superiore (37.5 mPt), dovuto al valore doppio assunto dalla categoria di impatto *Esaurimento delle Risorse*.

Edip

Per questo studio di LCA, EDIP non fornisce un risultato molto attendibile in quanto viene dato un peso ambientale eccessivo alla fase di costruzione delle infrastrutture e dei macchinari. Infatti nei due casi il *single score* assume un valore di 2.31 mPt (Tab. 10) e 0.41 mPt (senza infrastrutture e macchinari), in quanto l'impatto è dovuto soprattutto alle

emissioni in atmosfera di ferro derivanti dal ciclo produttivo dell'acciaio.

Per questa ragione la categoria d'impatto che pesa maggiormente è la *Tossicità del suolo per l'uomo* (87.1%), mentre i due macroprocessi che presentano i valori maggiori di impatto ambientale sono la trasformazione di cippato in pellet (35.9%) e la combustione del pellet (39.3%).

Relativamente al confronto con il metano, si è ottenuto che la filiera bioenergetica presenta un carico ambientale (2.31 mPt) superiore a quella fossile (0.87 mPt).

CONCLUSIONI

L'analisi del ciclo di vita del calore prodotto dalla combustione di pellet derivante da coltivazioni energetiche a rapido accrescimento è stata realizzata considerando l'intera filiera, dalla fase agricola allo smaltimento delle ceneri, e anche l'impatto della fase costruttiva dei macchinari e delle infrastrutture impiegate. Per ciascuna fase individuata i dati sono stati ottenuti da Letteratura e mediante misure dirette dei consumi energetici del processo di pelletizzazione.

La valutazione dell'impatto ambientale di 1 MJ di energia termica prodotto dalla combustione del pellet è stata realizzata impiegando tre diversi metodi: EcoIndicator 99, EPS 2000 e EDIP.

Per questa tipologia di analisi il metodo più adatto è sembrato l'EcoIndicator 99 in quanto prende in considerazione le categorie di impatto maggiormente rilevanti; in ogni caso, anche questa metodologia non risulta essere completa, poiché, ad esempio, è priva di un modello che tenga conto della propagazione di fosforo in acqua, il quale sarebbe particolarmente importante nei processi relativi all'applicazione di fertilizzanti.

I risultati mostrano che le fasi maggiormente impattanti sono i processi agricoli e quelli di trasformazione di cippato in pellet. Nel caso in cui non si consideri il contributo della fase costruttiva dei macchinari e delle infrastrutture, si ha una riduzione del carico ambientale di circa il 13%. Invece il confronto con il calore prodotto da metano mette in evidenza che la fonte fossile presenta un impatto superiore del 38%.

In termini di consumi energetici, considerando soltanto gasolio, metano ed energia elettrica come input, si è determinato che sono necessari circa 0.2 MJ di energia termica per ottenere 1 MJ dalla combustione del pellet. Ciò dovrebbe stimolare la sostituzione delle caldaie a metano con quelle a pellet, considerando anche che l'impatto della filiera bioenergetica potrebbe essere ulteriormente ridotto impiegando in misura minore i fertilizzanti chimici.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. Raccomandazione CTI-R04/5, Caratterizzazione del pellet a fini energetici, 2004.
- [2]. ISO 14040, Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework, 1997.
- [3]. ISO 14041, Environmental management-Life cycle assessment-Goal and scope definition and inventory

analysis, 1998.

- [4]. D. Benetti, A. Colombo, Analisi a multi obiettivi per la produzione di energia da biomasse, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, 1999.
- [5]. T. Nemecek, A. Heil, O. Huguenin, S. Meier, S. Erzinger, S. Blaser, D. Dux, A. Zimmermann, Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, Final report Ecoinvent 2000 No. 15., Dübendorf, 2003.
- [6]. P. Tidåker, Life Cycle Assessment of Grain Production Using Source-Separated Human Urine and Mineral Fertiliser, 2003. Da:
[7]. [http://www.bt.slu.se/lt_old/Rapporter/Ra251/Report251](http://www.bt.slu.se/lt_old/Rapporter/Ra251/Report251.pdf)
[8]. pdf.
- [9]. U.S. Environmental Protection Agency, Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, Research Triangle Park, 1995.
- [10]. M. Spielmann, T. Kägi, P. Stadler, O. Tietje, Life Cycle Inventories of Transport Services, Ecoinvent report No. 14. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2003.
- [11]. D. Kellenberger, H.-J. Althaus, N. Jungbluth, T. Künniger, Life Cycle Inventories of Building Products, Final report Ecoinvent 2000 No. 7, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2003.
- [12]. L.S. Johansson et al., Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets, Atmospheric Environment 38, pp 4183-4195, 2004
- [13]. C. Bauer, Holzenergie, Final report Ecoinvent 2000 No. 6-IX, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2003.
- [14]. M. Faist Emmenegger, T. Heck, N. Jungbluth, Erdgas, Final report Ecoinvent 2000 No. 6-V, Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2003.

SUMMARY

In Italy wood pellet is experiencing some difficulties because of the lack of sawdust (the principal raw material) at cheap prices. For this reason it is interesting to evaluate the possibility of producing this biofuel from Short Rotation Forestry. The paper describes the environmental impact assessment of wood pellet production from dedicated energy crops (poplar) through a Life Cycle Analysis carried out using a detailed LCA software (Simapro 6.0). The life cycle was considered from the agricultural phase to the grinding and pelletising process ending with the combustion of the pellet in a household boiler. Transportation of wood and pellets were also considered. In particular, for the pellet production process mass and energy flows were measured on an existing Italian pelleting plant, while other data were obtained from the Literature.

The study shows that agricultural operations account for most of the environmental impact and that the overall impact is considerably less than the one caused by natural gas heating.

Tabella 5: Risultati suddivisi per categorie di danno, ottenuti con Simapro (EcoIndicator 99).

<i>Categoria di danno</i>	<i>Totale (Pt)</i>	<i>coltivazione energetica (Pt)</i>	<i>trasporto cippato (Pt)</i>	<i>trasformaz. cippato in pellet (Pt)</i>	<i>distribuzione pellet (Pt)</i>	<i>combustione pellet (Pt)</i>
Totale	2,96E-03	1,09E-03	1,64E-04	8,88E-04	5,76E-05	7,62E-04
Salute umana	1,92E-03	5,82E-04	8,40E-05	5,33E-04	2,35E-05	6,99E-04
Qualità ecosistema	3,95E-04	1,45E-04	1,31E-05	1,82E-04	4,50E-06	5,06E-05
Uso delle risorse	6,47E-04	3,64E-04	6,69E-05	1,73E-04	2,96E-05	1,31E-05

Tabella 7: Risultati suddivisi per categorie di danno, ottenuti con Simapro – senza infrastrutture e macchinari (EcoIndicator 99).

<i>Categoria di danno</i>	<i>Totale (Pt)</i>	<i>coltivazione energetica (Pt)</i>	<i>trasporto cippato (Pt)</i>	<i>trasformaz. cippato in pellet (Pt)</i>	<i>distribuzione pellet (Pt)</i>	<i>combustione pellet 22 kw (Pt)</i>
Totale	2,57E-03	1,06E-03	1,64E-04	7,35E-04	5,29E-05	5,60E-04
Salute umana	1,65E-03	5,64E-04	8,40E-05	4,37E-04	2,03E-05	5,46E-04
Qualità ecosistema	3,57E-04	1,41E-04	1,31E-05	1,64E-04	4,16E-06	3,49E-05
Uso delle risorse	5,62E-04	3,54E-04	6,69E-05	1,34E-04	2,84E-05	-2,14E-05

Tabella 8: Risultati suddivisi per categorie di danno, ottenuti con Simapro (EPS 2000).

<i>Categoria di danno</i>	<i>Totale (Pt)</i>	<i>coltivazione energetica (Pt)</i>	<i>trasporto cippato (Pt)</i>	<i>trasformaz. cippato in pellet (Pt)</i>	<i>distribuzione pellet (Pt)</i>	<i>combustione pellet (Pt)</i>
Totale	2,64E-02	8,00E-03	7,45E-04	5,60E-03	3,05E-04	1,18E-02
Salute umana	1,08E-02	1,84E-03	3,37E-04	1,81E-03	1,10E-04	6,70E-03
Capacità produttiva ecosistema	-5,68E-05	-4,04E-05	-2,68E-06	-8,47E-06	-1,05E-06	-4,21E-06
Quantità risorse abiotiche	1,56E-02	6,18E-03	4,09E-04	3,77E-03	1,95E-04	5,06E-03
Biodiversità	4,08E-05	1,61E-05	2,37E-06	1,86E-05	9,77E-07	2,79E-06

Tabella 9: Risultati suddivisi per categorie di danno, ottenuti con Simapro – senza infrastrutture e macchinari (EPS 2000).

<i>Categoria di danno</i>	<i>Totale (Pt)</i>	<i>coltivazione energetica (Pt)</i>	<i>trasporto cippato (Pt)</i>	<i>trasformaz. cippato in pellet (Pt)</i>	<i>distribuzione pellet (Pt)</i>	<i>combustione pellet (Pt)</i>
Totale	1,57E-02	6,85E-03	7,45E-04	2,36E-03	2,09E-04	5,55E-03
Salute umana	9,55E-03	1,78E-03	3,37E-04	1,32E-03	9,93E-05	6,01E-03
Capacità produttiva ecosistema	-5,24E-05	-4,01E-05	-2,68E-06	-6,26E-06	-1,01E-06	-2,30E-06
Quantità risorse abiotiche	6,18E-03	5,10E-03	4,09E-04	1,03E-03	1,10E-04	-4,61E-04
Biodiversità	3,38E-05	1,57E-05	2,37E-06	1,55E-05	9,28E-07	-6,68E-07

Tabella 10: Risultati suddivisi per categorie di impatto, ottenuti con Simapro (EDIP).

<i>Categoria di impatto</i>	<i>Totale (Pt)</i>	<i>coltivazione energetica (Pt)</i>	<i>trasporto cippato (Pt)</i>	<i>trasformaz. cippato in pellet (Pt)</i>	<i>distribuzione pellet (Pt)</i>	<i>combustione pellet (Pt)</i>
Totale	2,31E-03	4,38E-04	9,13E-05	8,31E-04	4,34E-05	9,08E-04
Surriscaldamento globale	2,38E-06	1,27E-06	2,33E-07	5,66E-07	9,71E-08	2,16E-07
Impoverimento strato di ozono	1,41E-07	8,03E-08	1,44E-08	3,90E-08	6,42E-09	7,74E-10
Acidificazione	3,77E-06	2,00E-06	1,55E-07	8,95E-07	4,53E-08	6,68E-07
Eutrofizzazione	3,76E-06	2,37E-06	1,04E-07	7,71E-07	2,89E-08	4,86E-07
Smog fotochimico	4,23E-07	4,13E-08	1,26E-08	8,31E-08	4,03E-09	2,82E-07
Ecotossicità cronica dell'acqua	1,19E-04	4,37E-05	9,67E-06	3,51E-05	4,42E-06	2,66E-05
Ecotossicità acuta dell'acqua	7,42E-05	3,56E-05	7,89E-06	2,06E-05	3,56E-06	6,58E-06
Ecotossicità cronica del suolo	2,48E-05	9,11E-06	5,48E-07	8,84E-06	2,62E-07	6,08E-06
Tossicità dell'aria per l'uomo	5,54E-06	9,87E-07	2,69E-07	2,14E-06	1,12E-07	2,04E-06
Tossicità dell'acqua per l'uomo	6,35E-05	2,27E-05	2,29E-06	1,14E-05	1,13E-06	2,60E-05
Tossicità del suolo per l'uomo	2,01E-03	3,21E-04	7,01E-05	7,51E-04	3,37E-05	8,39E-04
Rifiuti indifferenziati	-	-	-	-	-	-
Rifiuti pericolosi	-	-	-	-	-	-
Rifiuti radioattivi	-	-	-	-	-	-