

# STIMA DEGLI IMPATTI AMBIENTALI DEGLI IMPIANTI ENERGETICI A BIOMASSA A SCALA REGIONALE ATTRAVERSO UN APPROCCIO LIFE CYCLE ASSESSMENT: IL CASO DELL'EMILIA-ROMAGNA

Luca Vignoli<sup>1,2,\*</sup>, Paolo Cagnoli<sup>1,2</sup>, Alessandra Bonoli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali.

<sup>2</sup> ARPAE – Agenzia regionale per la protezione ambientale dell'Emilia-Romagna, Bologna.

**Sommario** – Il catasto del 2016 degli impianti energetici a biomasse dell'Emilia-Romagna è costituito da 316 impianti, per una potenza elettrica installata totale pari a 210 MWel, basati a loro volta su differenti filiere di approvvigionamento: combustione di biomassa legnosa forestale o da arboricoltura, produzione di biogas da coltivazioni energetiche dedicate, produzione di biogas da sottoprodotti agricoli e zootecnici, produzione di biogas da sottoprodotti dell'industria agroalimentare, produzione di biogas da discariche e depuratori. L'obiettivo dello studio è stato quello di stimare a livello sia qualitativo che quantitativo gli impatti ambientali a scala regionale delle diverse tipologie di impianto, partendo dai dati sulle filiere di approvvigionamento, su potenza elettrica e posizione geografica, per un confronto con altri sistemi produttivi. Per l'analisi è stato adottato un approccio Life Cycle Assessment (LCA), implementando i dati all'interno del software Simapro 7.3, in maniera integrata con i riferimenti presenti nel database Ecoinvent, e poi applicando il metodo di calcolo Ecoindicator 99 100y. Sono stati creati 8 tipi Unitari Standardizzati (US) di impianti a biomassa, caratterizzati da una potenza elettrica di 1 MWel e da 8000 ore/anno di lavoro (per una produzione elettrica di 8000 MWhel/anno); ognuno degli impianti US è stato correlato in maniera pesata alle singole filiere di approvvigionamento. Oltre agli impianti US, nel software Simapro 7.3 sono stati implementati i dati di 15 casi studio reali, relativi a differenti impianti a biomassa reali, insieme ai processi di produzione energetica derivanti dalla combustione di biomassa legnosa e biogas contenuti nel database Ecoinvent. È stato possibile calcolare gli impatti ambientali unitari degli impianti US e quindi misurarne i rispettivi valori sia in termini di categorie di impatto che di macro-categorie di danno ambientale. Dai risultati ottenuti si è concluso a livello generale che i risultati degli impianti US sono comparabili e concordano con i riferimenti svizzeri di Ecoinvent. Le differenti tipologie unitarie standardizzate di impianto si rivelano essere uno strumento di riferimento molto utile per valutare sistemi energetici a scala regionale. Moltiplicando infatti i valori unitari di impatto e di danno ambientali per i valori di potenza elettrica installata in Emilia-Romagna nel 2016, si è ottenuta una stima

quali-quantitativa, ponderata e misurata, degli impatti e dei danni ambientali complessivi causati dai singoli diversi sistemi di impianti a biomassa a scala regionale. In questo lavoro sono presentati: i dati di partenza fondamentali per ogni singolo impianto US, i corrispondenti risultati numerici unitari di Ecoinvent'99, in termini di impatti e di categorie di danno e i risultati della valutazione a scala regionale. Si tratta di una metodologia utile per migliorare la base di dati standardizzata, effettuare valutazioni simili per territori diversi, confrontare gli impatti determinati in diverse regioni ed eventualmente riprodurre indici d'impatto con altri metodi LCA.

**Parole chiave:** energia, impianto a biomassa, impianto a biogas, centrale elettrica a combustione legnosa, impatto ambientale, LCA, valutazione, regionale, Emilia-Romagna.

## EVALUATION OF ENVIRONMENTAL IMPACTS OF BIOMASS ENERGY SYSTEMS AT REGIONAL SCALE THROUGH A LIFE CYCLE ASSESSMENT APPROACH. THE CASE OF THE EMILIA-ROMAGNA REGION

**Abstract** – How can be estimated the environmental impacts of biomass power plant systems at regional scale? The GIS land register of Emilia-Romagna region (ITA) considers 316 (in 2016) biomass power plants with a total electric power of 210 MWel, thanks to different kind of biomasses supply chains: wood, agricultural, agricultural and livestock biogas production system, agro-food biogas production system, organic waste biogas production system. To assess environmental impacts a LCA approach has been adopted using Simapro 7.3 software and working with Ecoinvent references and Ecoindicator '99 1000y method. 8 different realistic theoretical unit standardized (not average) biomass plants have been created, considering the related weighted productive supply chains, and considering a 1 MW electric power plant producing 8000 MWh electricity per year. All data have been implemented in the Simapro 7.3 software, along with indicators of other 15 real case studies of different real biomass plants and the data references of Swiss Ecoinvent LCA database, about wood combustion and biogas power plants. Environmental impacts have been calculated with Ecoindicator 99 LCA method, and impact and damage categories have been measured. These results of standardized plants are perfectly comparable with Swiss Ecoinvent ref-

\* Per contatti: Largo Caduti del Lavoro 6 – 40122 Bologna (BO), Tel. +39.051.5281225, +39.338.4079329. E-mail: [lucavignoli@arpae.it](mailto:lucavignoli@arpae.it).

erences; moreover, Simapro 7.3 results can be used for other different specific impacts and damages evaluations. Environmental impacts and damages caused by the biomass plant system at regional scale in 2016 in terms of Ecoindicator 99 LCA method can be calculated, multiplying the 1 MW<sub>el</sub> – 8000 MWh/year unitary Ecoindicator 99 numerical results with the correlated electric energy power installed at regional level. In this issue all the fundamental starting data for each single standardized unitary 1MW<sub>el</sub> – 8000 MWhel./ year biomass plant type has been proposed. If required, each operator could improve the standardized database, to make similar calculations for different territories, or to compare impacts in different regions, or to reproduce impact indices with other LCA impact assessment methods.

**Keywords:** energy, biomass, biogas, wood combustion power plant, environmental impact, LCA, assessment, regional scale, Emilia-Romagna.

Ricevuto il 25-3-2019. Modifiche sostanziali richieste il 24-7-2019. Correzioni richieste il 10-10-2019. Accettazione il 16-10-2019.

## 1. INTRODUZIONE

In Emilia-Romagna esistono diversi tipi di centrali elettriche a biomassa: combustione solida, combustione del legno, produzione di biogas da agricoltura, produzione di biogas da industrie alimentari, bioliquidi che producono bioetanolo o biodiesel, etc. Tutti questi tipi di impianti sono basati su differenti catene produttive e tecnologie per funzionare e produrre energia elettrica. La crescita e la diffusione sono state molto significative. Nel 2000 erano presenti 26 centrali a biomassa, con una potenza elettrica installata di 89 MW<sub>el</sub>; nel 2016 erano attivi 316 impianti, con una potenza elettrica installata di 210 MW<sub>el</sub> (ARPAE-EVAC, 2016); (Figura 1 e Tabella 1).

A livello di pianificazione, a scala regionale, sarebbe utile quantificare l'impatto ambientale prodotto dalle centrali in modo da razionalizzare la lo-

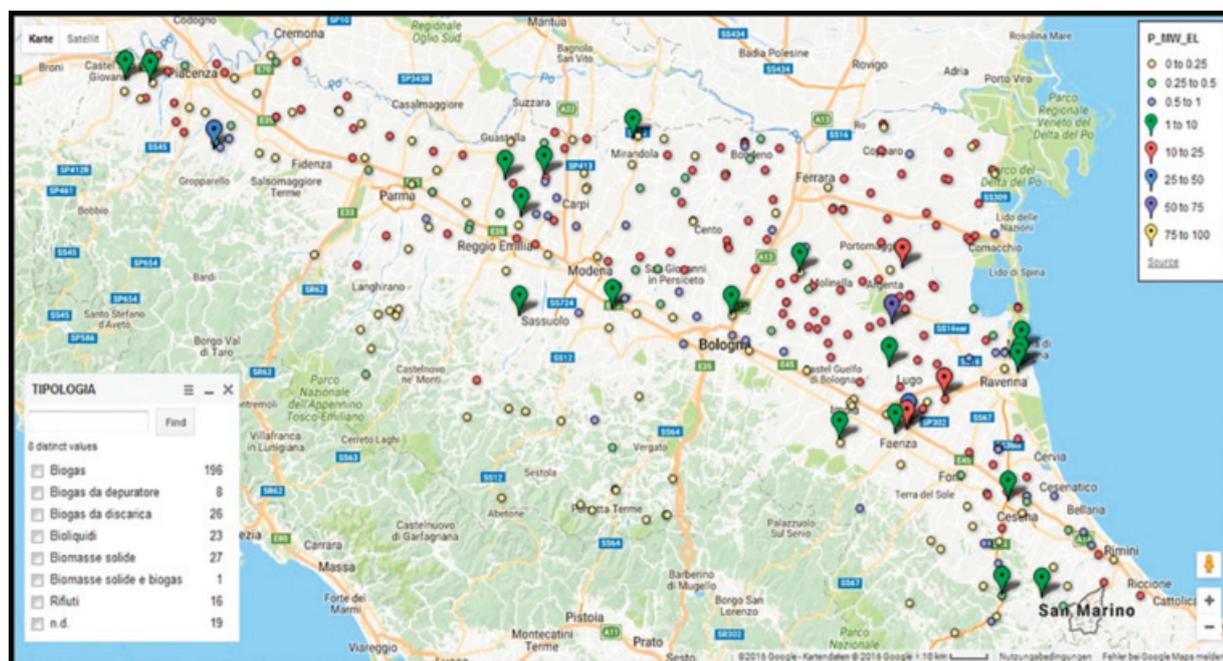


Figura 1 – Mappa degli impianti a biomassa presenti in Emilia-Romagna nell'anno 2016 (catasto energia di Arpae, 2016)

Tabella 1 – Potenze elettriche complessivamente installate in Emilia-Romagna, e nelle sue singole Province, in base alle diverse tipologie di filiere di approvvigionamento degli impianti a biomassa

MW <sub>el</sub> power	BO	FC	FE	MO	PC	PR	RA	RE	RN	Regione
Biogas – solo produzione energetica	11,85	3,92	15,29	2,00	2,87	4,00	3,87	1,00	1,00	<b>45,78</b>
Biogas – sottoprodotti agricoli e zootecnici	4,71	3,01	6,24	3,35	7,41	1,61	7,99	6,36	1,00	<b>41,67</b>
Biogas – sottoprodotti industria alimentare	12,07	0,19	7,24	2,60	0,00	2,62	10,30	2,13	0,00	<b>37,15</b>
Biogas – rifiuto organico	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<b>n.d.</b>
Biomassa legnosa	1,13	3,27	14,10	0,50	1,86	0,00	63,60	0,50	0,00	<b>84,96</b>

ro evoluzione sul territorio. In realtà è impossibile ottenere tutti i dati primari, caratteristici dei singoli impianti; quindi è impossibile stimare precisamente l'impatto ambientale a scala regionale. Se tutti i dati di base fossero comunque disponibili, servirebbe una metodologia specifica per elaborarli in maniera confrontabile.

Nel presente lavoro si è cercato di rispondere a questa esigenza utilizzando un approccio LCA: implementando tutti i dati di riferimento, grazie all'utilizzo del software Simapro 7.3 (Simapro, 2017), per poi calcolarne gli impatti ambientali con il metodo Ecoindicator 99 (Koedkoop Mark, 2001). Questo è stato possibile attraverso la creazione di impianti Unitari Standardizzati ("impianti US"), realistici di riferimento e caratterizzati ciascuno da 1 MW<sub>el</sub> di potenza elettrica ed 8000 MWh<sub>el</sub>/anno di produzione elettrica. Le tipologie di impianti definiti sono state le seguenti: impianti a combustione di legna forestale, a combustione di legna da arboricoltura di Pioppo, impianti a biogas da coltivazioni energetiche dedicate, da agro-zootecnia, da industrie alimentari e, infine, da rifiuti.

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1. Sintesi metodologica

Come è noto l'LCA, fin dalla sua definizione originale (Setac, 1993), è considerato come "un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente". Le norme UNI EN ISO 14040:2006 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento" e UNI EN ISO 14044:2018 "Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida" forniscono rispettivamente un quadro generale delle pratiche, delle applicazioni e delle limitazioni dell'LCA e le linee guida per la fase di valutazione dell'impatto dell'LCA, la fase di interpretazione dei risultati, la valutazione relativa alla natura e alla qualità dei dati raccolti. Quattro sono le fasi dell'LCA:

1. Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione (scopo dello studio, confini del sistema, Unità Funzionale).
2. Analisi d'inventario.
3. Analisi degli impatti.
4. Interpretazione dei risultati.

Questo lavoro ha come obiettivo la stima qualitativa e quantitativa degli impatti ambientali causati dagli impianti energetici a biomassa a scala regionale (Emilia-Romagna), in modo che i risultati siano compatibili con altri differenti sistemi produttivi. La metodologia ed i risultati dovrebbero essere utilizzati per migliorare la pianificazione a scala regionale.

La metodologia d'analisi utilizzata è basata su dati del catasto regionale dell'ARPAE Emilia-Romagna degli impianti a biomassa con le relative potenze elettriche e filiere di approvvigionamento (dati primari).

Nella prima parte del lavoro sono stati innanzitutto definiti 8 impianti Unitari Standardizzati (impianti US), ognuno da 1 MW di potenza, in base ad un esame ragionato dei valori trovati dai casi studio, da bibliografia e dal database LCA Ecoinvent. Tali impianti includono 4 tipologie unitarie di impianti a biogas e 4 tipologie di impianti a combustione legnosa, di cui 2 destinati alla produzione primaria di elettricità e 2 destinati unicamente alla produzione di energia termica per tele-riscaldamento. I confini del sistema sono di tipo "cradle to gate", ovvero dall'estrazione delle biomasse fino alla produzione energetica degli impianti (si veda il Paragrafo 3.2 per maggiori dettagli). Dopo la costruzione degli impianti US sono stati valutati i loro impatti ambientali e confrontati con le prestazioni di 15 casi studio reali in Emilia-Romagna e di 8 riferimenti svizzeri Ecoinvent di produzione energetica da biogas e da biomasse legnose.

Il confronto è avvenuto considerando come unità funzionale la produzione di 8000 MWh<sub>el</sub>/anno (impianti da 1 MW che lavorano 8000 ore) ad eccezione delle due unità destinate solo alla produzione di energia termica. I 2 impianti US a combustione legnosa che producono solo energia termica, sono considerati funzionanti solo per i 6 mesi freddi (4000 ore/anno). Sebbene esattamente non comparabili con gli altri 6 impianti standardizzati, le informazioni derivanti dalla loro analisi e confronto sono utili a livello pianificatorio; essi da un lato sono caratterizzati da un consumo di legna pari alla metà di un impianto che funziona tutto l'anno, con una produzione di 9600 MWh<sub>therm</sub>/anno ciascuno.

L'ultima parte del lavoro è consistita nella stima quali-quantitativa degli impatti e dei danni ambientali degli impianti a biomassa alla scala regionale sulla base delle produzioni elettriche e termiche effettive nell'anno 2016.

## 2.2. Dettaglio metodologico sulla creazione degli impianti unitari standardizzati

Attraverso la ricerca bibliografica e l'utilizzo dei dati di progetto di 15 casi studio reali, impianti e filiere di approvvigionamento, sono stati creati 6 impianti US, ognuno di potenza elettrica pari a 1 MWe in funzione di una produzione di 8000 MWhel/anno. Per definire gli impianti US sono stati usati modelli numerici utilizzando per ogni singolo parametro valori realistici, non medi, interni al range di riferimento.

Per gli impianti US è utilizzato il termine "standardizzati" per sottolineare il fatto che questi impianti e le loro filiere di approvvigionamento sono realistici, ma non reali e/o costituiti da dati medi e/o mediati. In pratica questi impianti, ognuno riferito alla propria tecnologia e filiera di approvvigionamento, sono stati ipotizzati a tavolino utilizzando formule e parametri disponibili in bibliografia. Tutti i valori adottati, i range trovati e i loro riferimenti sono presentati in Tabella 2 e in Tabella 3. Per gli impianti US è utilizzato anche il termine "unitari" in quanto sono ipotizzati in riferimento ad 1 MWe di potenza elettrica installata operante per 8000 ore lavorative/anno, così da produrre ognuno 8000 MWhel/anno di elettricità. Grazie a queste unità di riferimento il valutatore/pianificatore può stimare in maniera semplice l'impatto ed il danno ambientale di sistemi territoriali/regionali più ampi. Il limite, ma anche il vantaggio, del metodo qui applicato consiste nel fatto che generalizza situazioni in cui ogni singolo impianto può assumere specifiche caratteristiche molto diversificate. La metodologia adottata non può rappresentare né un valore medio, né un valore esatto degli impatti e dei danni ambientali determinati dai singoli impianti energetici. In aggiunta a questi impianti US sono stati definiti anche impianti unitari standardizzati. Tali impianti utilizzano la metà della biomassa legnosa utilizzata dagli impianti a combustione legnosa finalizzati alla produzione di elettricità e quindi in funzione per 8000 ore/anno. Questi impianti "solo termici" non possono essere confrontati in maniera diretta con gli impianti "prioritariamente elettrici", ma rappresentano comunque un riferimento qualitativo fondamentale per la pianificazione energetica territoriale. A parità di biomassa legnosa annualmente consumata, infatti, permettono di valutare l'opportunità di incentivare o disincentivare gli impianti di produzione termica

rispetto a quelli di produzione elettrica in funzione delle specificità territoriali, come la disponibilità di legna disponibile in maniera sostenibile, o le esigenze del territorio dal punto di vista socio-economico-produttivo.

Sono stati creati i seguenti 8 impianti US.

### Biogas (indicati con BG)

- BG1, s. maize: impianto a biogas per produzione elettrica alimentato esclusivamente con il 100% di insilato di mais. L'insilato di mais è molto spesso utilizzato come stabilizzatore del pH all'interno del digestore;
- BG2 agro-zoo: impianto a biogas per produzione elettrica alimentato da sottoprodotti agricoli e zootecnici;
- BG3 food.ind: impianto a biogas per produzione elettrica alimentato da sottoprodotti dell'industria alimentare;
- BG4 org.waste: impianto a biogas per produzione elettrica alimentato da rifiuti organici.

### Combustione legnosa (indicati con WP)

- WP1 el.th: impianto a combustione di biomasse legnose per la produzione di energia elettrica e termica alimentato con legna proveniente da arboricoltura (Pioppo: *Populus L.*);
- WP2 th\*: impianto a combustione di biomasse legnose per la produzione di sola energia termica alimentato con legna proveniente da arboricoltura (Pioppo: *Populus L.*);
- WF3 el.th: impianto a combustione di biomasse legnose per la produzione di energia elettrica e termica alimentato con legna di origine forestale;
- WF4 th\*: impianto a combustione di biomasse legnose per la produzione di sola energia termica alimentato con legna di origine forestale.

(In tali sigle di impianti a combustione el.th significa sia elettrico che termico e th solo termico.)

Con il supporto del software Simapro 7.3 si sono anche implementati 15 casi studio reali o di scenario, insieme ai riferimenti già disponibili nelle banche dati Ecoinvent per altri differenti tipologie di fonte energetica. Tutti gli impianti unitari standardizzati, i casi studio reali e i riferimenti Ecoinvent sono stati elaborati con la metodologia LCA Ecoindicator 99, 100 anni, ognuno in riferimento alla produzione elettrica di 8000 MWhel/anno, in modo da poter confrontare tra loro in maniera coerente i relativi impatti e i danni ambientali. Per semplificare la comprensione dell'analisi si è ritenuto opportuno raggruppare i vari tipi di impianti in cinque gruppi (Tabella 4):

**Tabella 2 – Caratteristiche degli impianti unitari standardizzati a Biogas modellizzati**

BIOGAS Impianto standard unitario		GX-s.maize	GX-agrozo	GX-agrofood.ind	GX-org.waste	Nota: GX = Impianto a Biogas	
		100% insilato mais (GX-s.maize)	Sottoprodotto agricoli e zootecnici GX-agrozo	Scarti industria alimentare GX-agrofood.ind	Rifiuto organico GX-org.waste	Range bibliografico	Riferimenti bibliografici
Impianto a biogas	Potenza elettrica installata (MW.elettrici)	1,0	1,0	1,0	1,0	/	/
	Potenza termica (MW.termici)	1,0	1,0	1,0	1,0	/	/
	Potenza persa (MW.persi)	0,5	0,5	0,5	0,5	/	/
	Potenza totale (MW.totali)	2,5	2,5	2,5	2,5	/	/
	% potenza elettrica	40,0%	40,0%	40,0%	40,0%	/	/
	% potenza termica	40,0%	40,0%	40,0%	40,0%	/	/
	% potenza persa	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	/	/
	Ore di funzionamento	8000	8000	8000	8000	/	/
	Energia elettrica prodotta (MWhel./anno)	8017	8017	8176	7978	/	/
	Energia elettrica erogata (MWhel./anno)*(autoconsumo = 10%)	7200	7215	7358	7180	/	/
	Insilato di mais (t./anno)	26909	5500	2500	2500	/	/
	Insilato di sorgo (t./anno)	0	5500	2500	2500	/	/
	Rifiuti vegetali ortofrutticoli (t./anno)	0	0	15000	5000	/	/
	Sottoprodotto dell'industria agroalimentare (t./anno)	0	0	10000	0	/	/
	Rifiuti organici (t./anno)	0	0	0	15000	/	/
	Liquame bovino (t./anno)	0	20000	0	0	/	/
	Letame bovino (t./anno)	0	20000	0	0	/	/
	Liquame suino (t./anno)	0	15000	0	0	/	/
Input totale di biomassa (t./anno)	26909	66000	30000	25000	/	/	
Produzione di CH <sub>4</sub>	Produzione di CH <sub>4</sub> dall'insilato di mais, tal quale (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	75	75	75	75	[32,0 – 115,3]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Reg.Piemonte <i>et al.</i> , 2012; CRPA <i>et al.</i> , 2013; Biteco, 2016)
	Produzione di CH <sub>4</sub> dall'insilato di sorgo, tal quale (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	75	75	75	75	[46 – 123]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Reg.Piemonte <i>et al.</i> , 2012; CRPA <i>et al.</i> , 2013; Biteco, 2016)
	Produzione di CH <sub>4</sub> da sottoprodotto agroalimentare. (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	125	125	125	125	[5 – 242]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Reg.Piemonte <i>et al.</i> , 2012; CRPA <i>et al.</i> , 2013; Biteco, 2016)
	Produzione di CH <sub>4</sub> da rifiuti organici (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	100	100	100	100	[20 – 169]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Reg.Piemonte <i>et al.</i> , 2012; CRPA <i>et al.</i> , 2013; Biteco, 2016)
	Produzione di CH <sub>4</sub> da letame bovino, tal quale (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	25	25	25	25	[9,0 – 48,2]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Reg.Piemonte <i>et al.</i> , 2012; CRPA <i>et al.</i> , 2013; Biteco, 2016)
	Produzione di CH <sub>4</sub> da liquame bovino, tal quale (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	25	25	25	25	[9,0 – 45]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Biteco, 2016)
Terreno agricolo utilizzato	Produzione di CH <sub>4</sub> da liquame suino, tal quale (CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /t.)	15	15	15	15	[3 – 44,6]	(Riva <i>et al.</i> , 2011; Biteco, 2016)
	Km lineari medi percorsi da un trattore per ettaro di coltivazione (km/ha/anno)	25	25	25	25	Dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)
Coltivazioni energetiche	Consumo di diesel di un trattore (diesel litri/km)	20	20	20	20	[1,5 – 2,0]	(CoProB, www.coprob.com, 2011)
	Produttività di insilato di mais (t./ha/anno)	50	50	50	50	[30 – 80]	(Gnudi, 2013; CIA Piemonte, 2014; Repetti, 2014; CoProB – www.coprob.com, 2016; RER.AGR.Stat, 2016; Salvagno, Colferai and Di, 2016)
	Ettari coltivati a mais per insilato (ha/anno)	538	110	50	50	Calcolato	Calcolato
	Consumo di diesel per la coltivazione del mais per insilato (litri/ha/anno)	50	50	50	50	50	(CoProB, www.coprob.com, 2016)
	Produttività di insilato di sorgo (t./ha/anno)	50	50	50	50	[35,6 – 96,8]	(Mantovi <i>et al.</i> , 2015; Bartolini, 2016)
	Ettari coltivati a sorgo per insilato (ha/anno)	0	110	50	50	Calcolo	calculation
Bovini / suini	Consumo di diesel per la coltivazione del sorgo per insilato (litri/ha/anno)	50	50	50	50	Calcolo	calculation
	Input di liquame bovino (t./anno)	0	20000	0	0	/	/
	Input di letame bovino (t./anno)	0	20000	0	0	/	/
	Input di liquame suino (t./anno)	0	15000	0	0	/	/
	Produzione di liquame bovino (t./capo/anno)	10,0	10,0	10,0	10,0	[3,9 – 22,2]	(Arruzza e Ragazzoni, 2011; Impianti di cogenerazione srl, 2016)
	Produzione di letame bovino (t./capo/anno)	13,0	13,0	13,0	13,0	[1,2 – 15,7]	(Arruzza e Ragazzoni, 2011; Impianti di cogenerazione srl, 2016)
Distanze di trasporto e consumi	Produzione di liquame suino (t./capo/anno)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	(Arruzza e Ragazzoni, 2011; Impianti di cogenerazione srl, 2016)
	Distanza media dai campi coltivati a mais (km)	10	10	10	10	/	/
	Distanza media dai campi coltivati a sorgo (km)	10	10	10	10	/	/
	Distanza media dalle fonti di rifiuti ortofrutticoli (km)	10	10	10	10	/	/
	Distanza media dall'industria agroalimentare (km)	1	1	1	1	/	/
	Distanza media dal punto di raccolta dei rifiuti organici (km)	1	1	1	1	/	/
	Distanza media dagli allevamenti (km)	10	10	10	10	/	/
	Capacità di trasporto dei camion (t.)	20	20	20	20	/	/
Digestato	Consumo di diesel per il trasporto della biomassa in entrata (litri/km)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(MIT, 2011)
	Tasso di produzione del digestato (t./t. biomassa)	0,75	0,75	0,75	0,75	[13,62 – 142,73]	(CoProB, www.coprob.com, 2016)
Consumi interni	Consumo di diesel internamente all'impianto (litri/ t. biomassa movimentata)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(CoProB, www.coprob.com, 2016)
	Consumo di diesel internamente all'impianto (litri/km)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(CoProB, www.coprob.com, 2016)
Consumi per il trasporto del digestato	Distanza media dell'impianto dai campi di spargimento del digestato (km)	10	10	10	10	/	/
	Capacità di trasporto dei camion per il digestato (t.)	20	20	20	20	/	/
Contenuto del digestato	Consumo di diesel per la biomassa in uscita (litri/km)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(MIT, 2011)
	Digestato: N totale (kg N totale / t. digestato)	7,0	7,0	7,0	7,0	[3,5 – 7]	(CRPA, 2012)
	Digestato: % N ammoniacale/ N totale (kg N totale/t. digestato)	3,5	3,5	3,5	3,5	[30% – 65%]	(CRPA, 2012)
	Digestato: Fosfati totali P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / t. digestato)	1,5	1,5	1,5	1,5	[1 – 2]	(CRPA, 2012)
Ettari di terreno necessari per lo spargimento del digestato	Digestato: Potassio K <sub>2</sub> O (kg K <sub>2</sub> O / t. digestato)	5,0	5,0	5,0	5,0	[3 – 8]	(CRPA, 2012)
	Massimo contributo totale di N permesso a spargimento nelle aree sensibili (kg N/ha/anno)	170	170	170	170	170	(RER.Reg.1.2011, 2011)
Consumi per lo spargimento del digestato	Massimo contributo totale di N permesso a spargimento nelle aree non sensibili (kg N/ha/anno)	340	340	340	340	340	(RER.Reg.1.2011, 2011)
	Consumo di diesel dei trattori in campo (litri/km)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	(CoProB, www.coprob.com, 2011)
Fattori di produzione di CO <sub>2</sub> fossile dalla costruzione dell'impianto	Litri di diesel consumati nello spargimento del digestato (litri/ha)	50	50	50	50	50	(CoProB, www.coprob.com, 2016)
	Km lineari medi percorsi per lo spargimento del digestato (km/ha)	5	5	5	5	/	/
Fattori di produzione di CO <sub>2</sub> fossile dalla costruzione dell'impianto	Fattore di emissione di CO <sub>2</sub> per il cemento utilizzato(ton.CO <sub>2eq</sub> /MW/anno)	117	117	117	117	117	(TIS <i>et al.</i> , 2011)
	Fattore di emissione di CO <sub>2</sub> per l'acciaio utilizzato (ton.CO <sub>2eq</sub> /MW/anno)	27	27	27	27	27	(TIS <i>et al.</i> , 2011)
	Fattore di emissione di CO <sub>2</sub> per l'energia elettrica prodotta (g.CO <sub>2eq</sub> /kWh.el/anno)	42	42	42	42	42	(TIS <i>et al.</i> , 2011)

**Tabella 3 – Caratteristiche degli impianti unitari standardizzati a combustione di biomassa legnosa modellizzati**

WOOD COMBUSTION Unitary standard plant		LX.P.el	*LX.P.ht	LX.P.rF	*LX.P.rF	Nota: LX = Impianto a combustione Legnosa		
		Legna proveniente da arboricoltura (en. elettrica + termica)	Legna proveniente da arboricoltura (solo calore)	Legna di origine forestale (en. elettrica + termica)	Legna di origine forestale (solo calore)	Range bibliografico	Riferimenti bibliografici	
Impianto a combustione di biomassa legnosa	Potenza elettrica installata (MWelettrici)	1,0	0,0	1,0	0,0	/	/	
	Potenza termica (MW.termici)	3,0	2,4	3,0	2,4	/	/	
	Potenza persa (MW. persa)	0,5	0,4	0,5	0,4	/	/	
	Potenza totale (MW totali)	4,5	2,8	4,5	2,8	/	/	
	% Potenza elettrica	22,2%	0,0%	22,2%	0,0%	/	/	
	% Potenza termica	66,7%	85,7%	66,7%	85,7%	/	/	
	% Potenza persa	11,1%	14,3%	11,1%	14,3%	/	/	
	Ore di funzionamento	8,000	4,000	8,000	4,000	/	/	
	Mesi di funzionamento	12	5,5	12	5,5	/	/	
	Teleriscaldamento (%)	20%	80%	20%	80%	/	/	
	Teleriscaldamento (MWh)	4,800	7,680	4,800	7,680	/	/	
	Produzione di energia elettrica (MWhel./anno)	8,000	0	8,000	0	/	/	
	Produzione di energia termica (MWhel./anno)	24,000	9,600	24,000	9,600	/	/	
	Energia persa (MWhel./anno)	4,000	1,600	4,000	1,600	/	/	
	Input totale di energia in entrata (MWh/anno)	36,000	11,200	36,000	11,200	/	/	
% dell'input di energia in entrata (%)	100%	31%	100%	31%	/	/		
Tonnellate ed ettari di produzione legnosa	Legna fresca (t./anno)	12,766	3,972	12,766	3,972	Calcolo	Calcolo	
	Legna stagionata (t./anno)	7,660	2,383	7,660	2,383	Calcolo	Calcolo	
	% di ceneri derivante dalla combustione della legna stagionata (%)	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	/	/	
	Ceneri (t/anno)	574	179	574	179	Calcolo	Calcolo	
	Produttività di legna fresca (t./ha/anno)	30,00	30,00	4,77	4,77	[18,7 – 80,9] [m³/ha/anno] 4,77 [t./ha/anno]	(CRA-PF and Giuseppe, 2009), (ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011) (INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Produttività di legna stagionata (t./ha/anno)	18,00	18,00	2,62	2,62	[6,27 – 33,9] [m³/ha/anno] 2,62 [t./ha/anno]	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011) (INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Cicli (anni)	1	1	10	10	/	/	
	Consumo di diesel per la coltivazione (litri/ha/anno)	25	25	0	0	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
	Consumo di diesel per il taglio (litri/ora)	15	15	15	15	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
	Consumo di diesel per la raccolta (litri/ora)	14	14	14	14	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
Coltivazione, taglio, raccolta e cippatura	Consumo di diesel per la cippatura (litri/ora)	6	6	6	6	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
	Consumo di lubrificante per il taglio (litri/ora)	0,35	0,35	0,35	0,35	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
	Consumo di lubrificante per la raccolta (litri/ora)	0,35	0,35	0,35	0,35	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
	Consumo di lubrificante per la cippatura (litri/ora)	0,24	0,24	0,24	0,24	Valore dichiarato	(WPK <i>et al.</i> , 2016)	
	Distanza media dagli alberi al sito di stagionatura (km)	2,5	2,5	5	5	/	/	
	Distanza media dal sito di stagionatura all'impianto (km)	35	35	20	20	/	/	
Distanze di trasporto	Distanza media dall'impianto al sito di spargimento delle ceneri (km)	25	25	10	10	/	/	
	Trasporti in-out	Conferimento della legna fresca al sito di stagionatura – Capacità di trasporto del camion (t.)	20	20	10	10	/	/
		Trasporto della legna stagionata all'impianto – Capacità di trasporto del camion (t.)	20	20	20	20	/	/
		Trasporto delle ceneri al sito di spargimento – Capacità di trasporto del camion (t.)	10	10	10	10	/	/
		Conferimento della legna fresca al sito di Stagionatura – Consumo di diesel del camion (litri/km)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(MIT, 2011)
		Trasporto della legna stagionata all'impianto – Consumo di diesel del camion (litri/km)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(MIT, 2011)
Trasporto delle ceneri al sito di spargimento – Consumo di diesel del camion (litri/km)		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	(MIT, 2011)	
Trasporti: fattori Ecoinvent	Transport, tractor and trailer/CH U	/	/	/	/	Ecoinvent db	(Ecoinvent LCA db, 2016b)	
	Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U	/	/	/	/	Ecoinvent db	(Ecoinvent LCA db, 2016a)	
Legna di pioppo da arboricoltura (Populus L.)	Populus L. arboricoltura: Peso specifico legna fresca (t./m³)	0,75	0,75	/	/	0,76	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011)	
	Populus L. arboricoltura: Peso specifico della legna stagionata (t./m³)	0,45	0,45	/	/	[0,42 – 0,45]	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011)	
	Populus L. arboricoltura: Incremento volumetrico annuale forestale per la legna fresca (m³/ha/anno)	30	30	/	/	[18,7 – 80,9]	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011)	
	Populus L. arboricoltura: Incremento massivo annuale forestale per la legna fresca (t./ha/anno)	30	30	/	/	[11,4 – 61,5]	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011)	
	Populus L. arboricoltura: Incremento massivo annuale forestale per la legna stagionata (t./ha/anno)	18,00	18,00	/	/	[6,27 – 33,9]	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011)	
	Populus L. arboricoltura: Potere calorifico inferiore della legna stagionata (kWh/kg)	4,5	4,5	/	/	[4,50 – 4,67]	(ISP <i>et al.</i> , 2007; RER.VIA, 2011)	
Legna forestale	Legna forestale – mix generico: Peso specifico della legna fresca (t./m³)	/	/	1,00	1,00	1,07	(INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Legna forestale – mix generico: Peso specifico della legna stagionata (t./m³)	/	/	0,65	0,65	0,64	(INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Legna forestale – mix generico: Incremento volumetrico annuale forestale per la legna fresca (m³/ha/anno)	/	/	4,47	4,47	[4,10 – 4,47]	(INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Legna forestale – mix generico: Incremento massivo annuale forestale per la legna fresca (t./ha/anno)	/	/	4,77	4,77	4,77	(INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Legna forestale – mix generico: Incremento massivo annuale forestale per la legna stagionata (t./ha/anno)	/	/	2,62	2,62	2,62	(INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	
	Legna forestale – mix generico: Potere calorifico inferiore della legna stagionata (kWh/kg)	/	/	4,50	4,50	4,50	(INFC-2011, 2011; INFC.ARPAAE, 2016; RER.SPF, 2016)	

**Tabella 4 – Elenco dei diversi tipi di impianti implementati nel software Simapro 7.3 applicando la metodologia LCA Ecoindicator 99 100y, ognuno per una produzione elettrica annuale di 8000 MWhel/anno**

Gruppo	Codice impianto	Caratteristiche primarie dell'impianto	Produzione energetica implementata in Simapro 7.3 per la comparazione con Ecoindicator 99
Riferimenti presenti in ecoinvent	e01	Electricity, production mix IT/IT U	8000 MWhel./anno
	e02	Electricity, oil, at power plant/IT U	8000 MWhel./anno
	e03	Electricity, production mix fotovoltaic, at plant/IT U	8000 MWhel./anno
	e04	Electricity, at wind power plant/RER U	8000 MWhel./anno
	e05	Electricity, hydropower, at power plant/IT U	8000 MWhel./anno
	e06	Dummy_Electricity, geothermal, unspecified/US	8000 MWhel./anno
	SG.e07	Electricity, at cogen 6400kWh, wood, emission control, allocation energy/CH U	8000 MWhel./anno
	SW.e08	Electricity, at cogen, biogas agricultural mix, allocation exergy/CH U	8000 MWhel./anno
Impianti a biogas casi studio	B1	249 kW.el – Insilato di mais 98%	8000 MWhel./anno
	B2	888 kW.el – Industrie agroalimentare + agro-zootecnia	8000 MWhel./anno
	B3	999 kW.el – Zuccherificio + agricoltura	8000 MWhel./anno
	B4	999 kW.el – Zuccherificio + agricoltura	8000 MWhel./anno
	B5	999 kW.el – Zuccherificio + agricoltura	8000 MWhel./anno
	B6	130 kW.el – Agro-Zootecnia	8000 MWhel./anno
	B7	380 kW.el – Agro-Zootecnia	8000 MWhel./anno
	B8	870 kW.el – Raccolta rifiuti organici	8000 MWhel./anno
Impianti unitari standard a biogas	BG1 – insilato di mais 100%	1000 kW.el – Coltivazioni energetiche	8000 MWhel./anno
	BG2 – agro-zootecnico	1000 kW.el – Agricoltura + Zootecnia	8000 MWhel./anno
	BG3 – industria alimentare	1000 kW.el – Industria alimentare	8000 MWhel./anno
	BG4 – rifiuti organici	1000 kW.el – Raccolta rifiuti organici	8000 MWhel./anno
Impianti a combustione legnosa casi studio	W1	35 kW.el – Legna forestale	8000 MWhel./anno
	W2	35 kW.el – Legna forestale	8000 MWhel./anno
	W3	30000 kW.el – Populus L. Arboricoltura	8000 MWhel./anno
	W4	30000 kW.el – Populus L. Arboricoltura	8000 MWhel./anno
	W5	30000 kW.el – Populus L. Arboricoltura	8000 MWhel./anno
	W6	30000 kW.el – Legna forestale	8000 MWhel./anno
	W7	200 kW.el – Legna forestale	8000 MWhel./anno
Impianti unitari standard a combustione legnosa	WP1 – arboricoltura	1000 kW.el + 2400 kW.th – Populus L. Arboricoltura	8000 MWhel./anno
	WP2 – arboricoltura	2400 kW.th – Populus L. Arboricoltura	*9600 MWh.therm/anno
	WF3 – legna forestale	1000 kW.el + 2400 kW.th – Legna forestale	8000 MWhel./anno
	WF4 – legna forestale	2400 kW.th – Legna forestale	*9600 MWh.therm/anno

- I) Ecoinvent: diversi tipi di fonti energetiche (comprese le produzioni elettriche da biogas e da combustione di biomasse solide legnose Ecoinvent svizzere).
- II) Biogas: casi studio reali.
- III) Biogas: impianti unitari standardizzati in base alla loro filiera di approvvigionamento.
- IV) Combustione legnosa: casi studio reali.
- V) Combustione legnosa: impianti unitari standardizzati in base alla loro filiera di approvvigionamento. Nel V gruppo gli impianti unitari standardizzati a combustione legnosa dedicati esclusivamente alla produzione termica, sono stati considerati operativi solo 4000 ore/anno in quanto si è ipotizzato che funzionino solo nei 6 mesi freddi.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1. Risultati dell'analisi comparata effettuata con la metodologia Ecoindicator 99 100y

L'analisi degli impatti e dei danni ambientali è stata fatta con la metodologia Ecoindicator 99 100y, che comprende anche i processi di costruzione degli impianti. I risultati di impatto per ciascuno degli impianti in elenco in Tabella 4 sono riportati nelle Figure 2-5 e nelle Tabelle 5-7.

#### 3.2. Gli impatti dei sistemi energetici a biomassa dell'Emilia-Romagna

Per stimare gli impatti ambientali complessivi a scala regionale generati dai diversi sistemi ener-

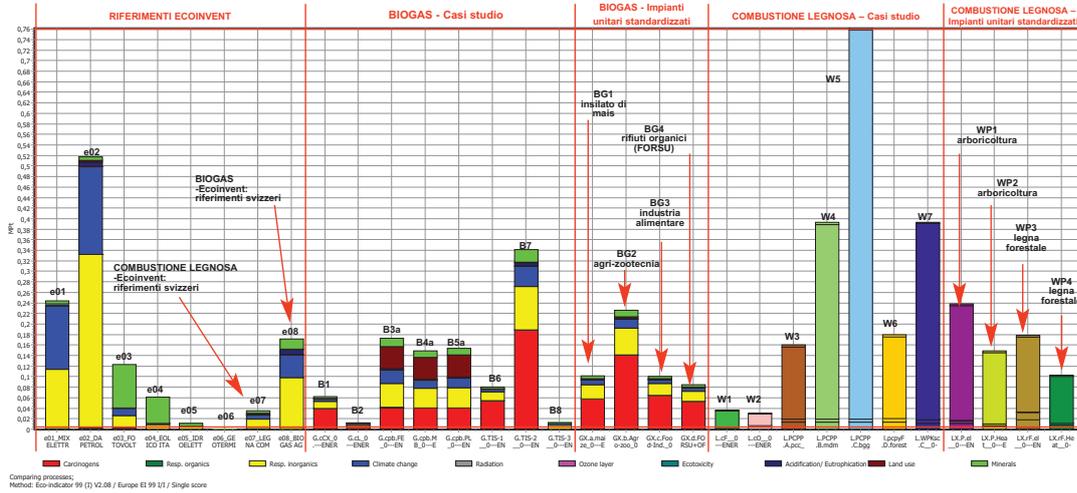


Figura 2 – Grafico complessivo degli impatti per tutti gli impianti elencati in Tabella 4. Gli impatti sono calcolati in funzione di una produzione elettrica di 8000 MWhel/anno o di una produzione termica di 9600 MWhth/anno (casi WP2 e WF4) secondo le categorie di impatto ambientale del metodo di analisi LCA Ecoindicator 99 (100 anni)

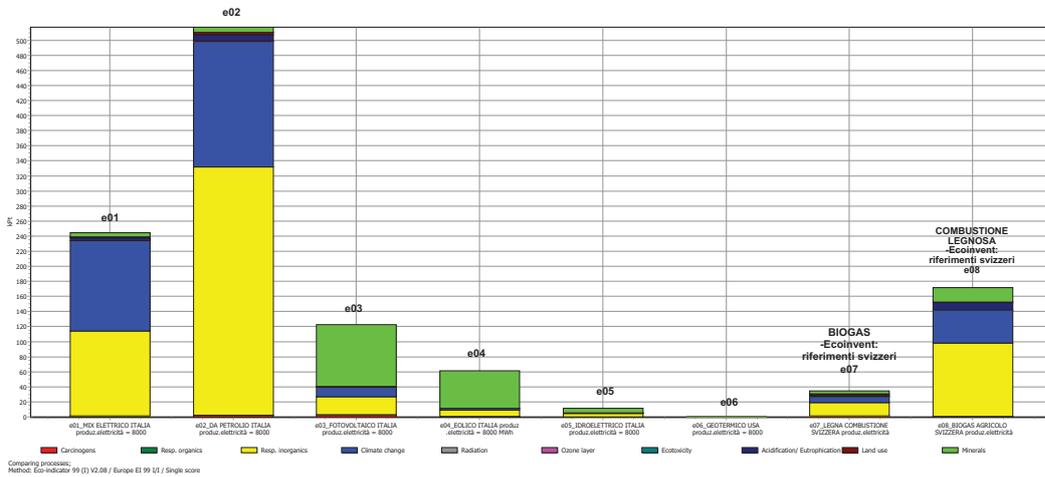


Figura 3 – Grafico degli impatti per tutti gli impianti del gruppo "riferimenti presenti in ecoinvent" in Tabella 4. Gli impatti sono calcolati in funzione di una produzione elettrica di 8000 MWhel/anno secondo le categorie di impatto ambientale del metodo di analisi LCA Ecoindicator 99 (100 anni)

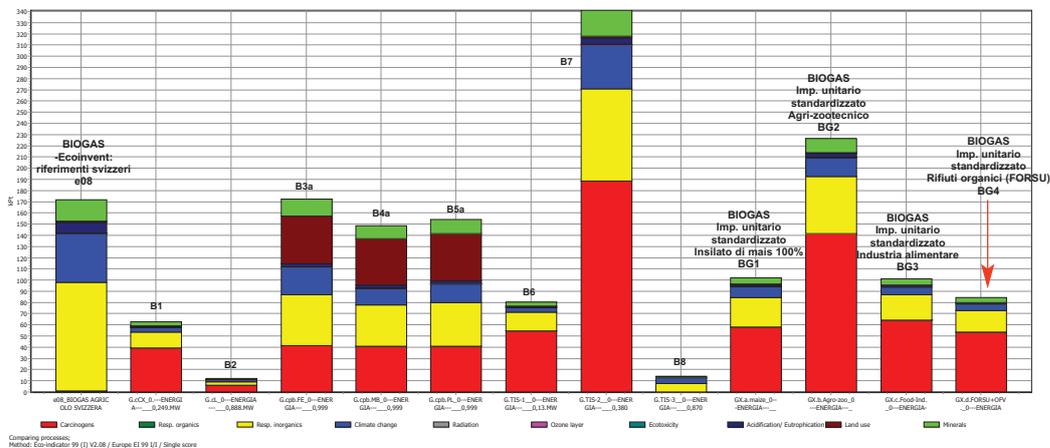


Figura 4 – Grafico complessivo degli impatti per tutti gli impianti a biogas (ecoinvent, casi studio e impianti unitari standardizzati) in Tabella 4. Gli impatti sono calcolati in funzione di una produzione elettrica di 8000 MWhel/anno secondo le categorie di impatto ambientale del metodo di analisi LCA Ecoindicator 99 (100 anni)

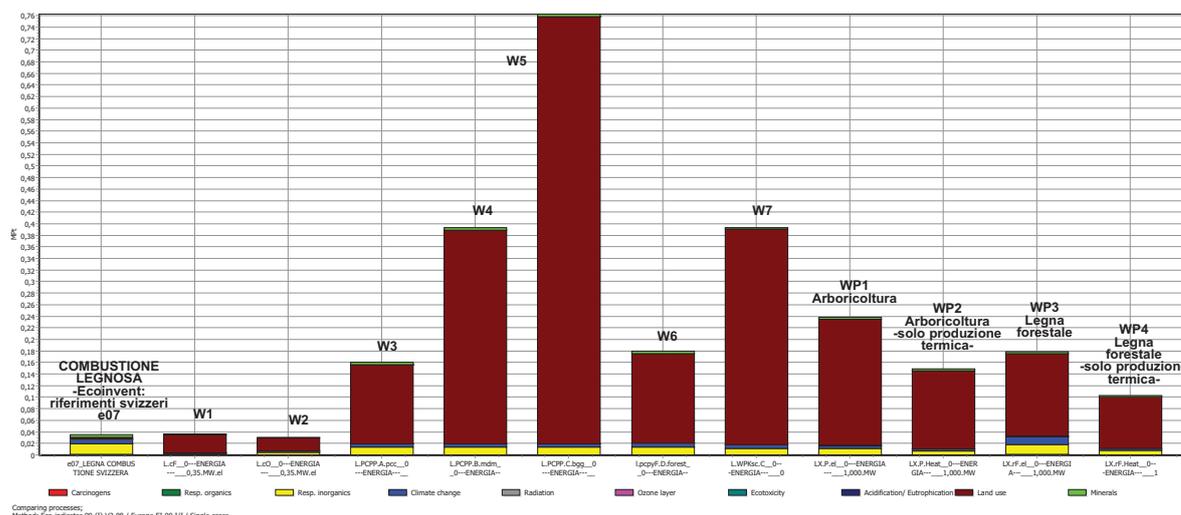


Figura 5 – Grafico degli impatti relativi alle diverse tipologie di impianti a combustione di biomasse legnose (ecoinvent, casi studio e impianti unitari standardizzati) calcolati con metodologia Ecoindicator 99 100y per 8000 MWhel/anno di produzione elettrica, oppure per la produzione di sola energia termica nei soli mesi invernali per 9600 MWhtherm/anno

getici, a biomassa, si sono moltiplicati i valori di impatto e di danno ambientale unitari riferiti ai singoli impianti US (1 MWel di potenza e 8000 MWhel/anno di produzione elettrica) per i relativi valori complessivi regionali di potenza elettrica installata dei diversi tipi di sistemi a biomassa registrati nel catasto GIS Arpa 2016 [1]. Per completezza i suddetti valori complessivi regionali di potenza installata sono stati moltiplicati per i valori unitari di impatto e di danno ambientali otte-

nuti sia con i riferimenti svizzeri di Ecoinvent (produzione energetica da impianti a biogas e da impianti a combustione di biomasse solide) che con la sommatoria di impatti e danni dei 3 tipi di impianti unitari standardizzati a biogas: impianti alimentati unicamente a colture energetiche, impianti basati su filiera di approvvigionamento agro-zootecnica, impianti basati su filiera dell'agro-industria alimentare). I risultati sono riportati in Tabella 8 e in Figura 6.

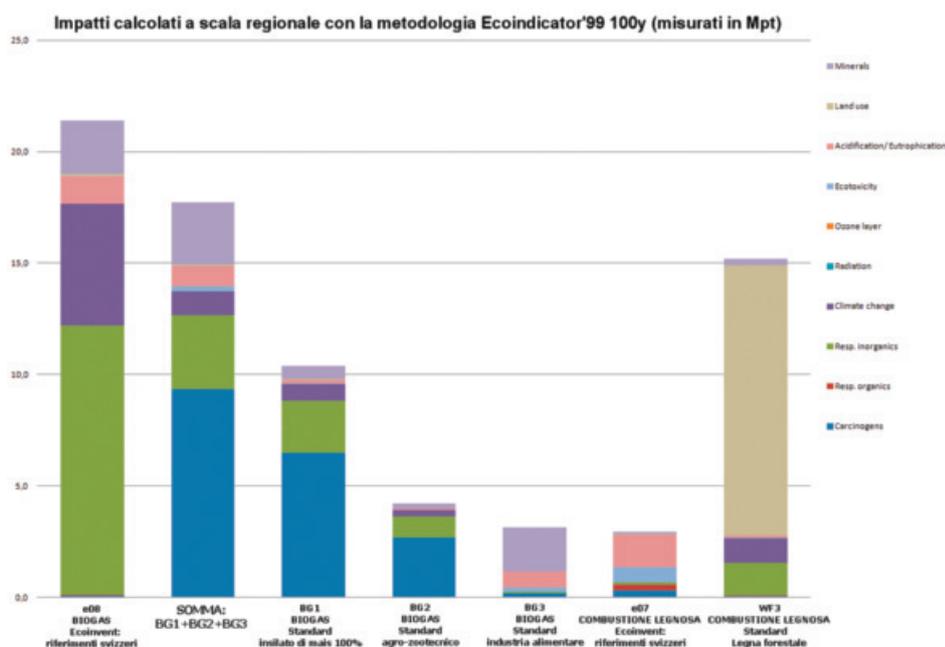


Figura 6 – Sintesi degli impatti ambientali stimati complessivamente a scala regionale (impatti espressi in MegaPunti secondo la metodologia Ecoindicator 99, 100anni). I valori sono relativi sia ai singoli diversi sistemi di filiera, sia alla loro somma complessiva

**Tabella 5 – Valori di impatto ambientale ottenuti per i diversi impianti in elenco in Tabella 4 applicando la metodologia LCA Ecoindicator 99 100y. Gli impatti sono calcolati per una produzione elettrica annuale di 8000 MWhel/anno ciascuno, eccetto che per gli impianti WP2 e WF4 calcolati per una produzione di sola energia termica pari a 9600 MWhtherm/anno**

<b>Categoria di impatto</b>	<b>Unità</b>	<b>e01</b>	<b>e02</b>	<b>e03</b>	<b>e04</b>	<b>e05</b>	<b>e06</b>	<b>e07</b>	<b>e08</b>
Totale	Pt	244372,37	517405,04	122766,35	61173,21	11695,89	0,00	34728,03	171840,54
Minerals	Pt	5535,27	7022,78	82380,29	49581,22	5956,58	0,00	3761,73	19341,45
Land use	Pt	1328,02	2918,51	338,12	253,60	92,84	0,00	2980,54	839,32
Acidification / Eutrophication	Pt	3375,45	8156,28	391,14	64,11	33,98	0,00	896,15	9864,01
Ecotoxicity	Pt	224,90	1134,30	192,23	64,58	7,96	0,00	337,66	57,20
Ozone layer	Pt	40,68	83,13	10,69	0,49	0,23	0,00	0,97	5,25
Radiation	Pt	9,63	13,03	15,98	1,53	0,69	0,00	2,34	17,15
Climate change	Pt	119523,87	166491,12	12912,09	2128,86	936,79	0,00	7935,26	43842,93
Resp. inorganics	Pt	113005,74	329191,42	23112,07	8564,54	4574,27	0,00	17319,39	97052,87
Resp. organics	Pt	242,88	380,34	93,71	7,37	3,14	0,00	54,62	157,09
Carcinogens	Pt	1085,95	2014,12	3320,02	506,90	89,42	0,00	1439,39	663,26
<b>Categoria di impatto</b>	<b>Unità</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>B3a</b>	<b>B4a</b>	<b>B5a</b>	<b>B6</b>	<b>B7</b>	<b>B8</b>
Totale	Pt	62447,19	12109,33	172308,23	148804,34	153937,68	80488,79	341065,21	14034,93
Minerals	Pt	3397,09	888,54	15340,02	11650,13	12458,68	3884,11	23401,41	1014,33
Land use	Pt	192,09	65,21	42133,99	41835,50	41900,18	165,09	1354,91	133,03
Acidification / Eutrophication	Pt	980,06	206,27	3109,10	2564,54	2683,73	1230,11	5743,87	344,95
Ecotoxicity	Pt	52,76	20,03	214,91	94,03	120,52	46,35	490,49	36,68
Ozone layer	Pt	3,84	1,40	12,93	6,58	7,95	2,90	26,61	3,55
Radiation	Pt	1,86	0,69	25,87	22,00	22,85	1,61	16,05	1,33
Climate change	Pt	4379,58	1630,40	24517,44	15062,63	17131,80	3834,30	39392,78	4959,53
Resp. inorganics	Pt	13912,24	3138,82	45592,05	36678,09	38618,21	16666,43	81917,33	7337,16
Resp. organics	Pt	39,87	12,60	131,16	72,58	85,34	38,43	300,58	73,34
Carcinogens	Pt	39487,78	6145,38	41230,75	40818,28	40908,43	54619,46	188421,18	131,03
<b>Categoria di impatto</b>	<b>Unità</b>	<b>BG1</b>	<b>BG2</b>	<b>BG3</b>	<b>BG4</b>				
Totale	Pt	102190,79	226506,79	101017,61	84611,92				
Minerals	Pt	5890,06	12622,29	5432,76	4565,11				
Land use	Pt	572,35	719,96	302,63	263,38				
Acidification / Eutrophication	Pt	1609,57	3577,16	1581,02	1324,64				
Ecotoxicity	Pt	106,15	203,84	82,67	70,08				
Ozone layer	Pt	13,54	14,41	6,03	5,33				
Radiation	Pt	4,31	7,11	2,91	2,49				
Climate change	Pt	9557,24	16829,26	6869,14	5850,53				
Resp. inorganics	Pt	26482,86	50849,92	22378,03	18886,73				
Resp. organics	Pt	96,52	149,49	63,12	54,08				
Carcinogens	Pt	57858,19	141533,34	64299,29	53589,55				
<b>Categoria di impatto</b>	<b>Unità</b>	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>W3</b>	<b>W4</b>	<b>W5</b>	<b>W6</b>	<b>W7</b>	
Totale	Pt	36361,47	31007,77	160721,25	393257,66	762567,40	179755,83	393001,05	
Minerals	Pt	782,67	2191,90	4562,43	4562,43	4562,43	4917,30	2289,15	
Land use	Pt	31893,09	22399,45	136917,50	369453,92	738763,66	153967,31	372152,83	
Acidification / Eutrophication	Pt	98,64	152,05	538,99	538,99	538,99	584,37	383,31	
Ecotoxicity	Pt	5,44	15,05	38,39	38,39	38,39	41,75	67,50	
Ozone layer	Pt	0,93	1,36	3,43	3,43	3,43	3,74	12,59	
Radiation	Pt	0,29	1,16	1,59	1,59	1,59	1,71	3,34	
Climate change	Pt	967,04	1914,66	5641,95	5641,95	5641,95	6119,98	6818,30	
Resp. inorganics	Pt	2563,12	4170,20	12732,00	12732,00	12732,00	13813,19	10849,53	
Resp. organics	Pt	10,01	15,76	50,95	50,95	50,95	55,30	75,13	
Carcinogens	Pt	40,24	146,19	234,01	234,01	234,01	251,18	349,36	
<b>Categoria di impatto</b>	<b>Unità</b>	<b>WP1</b>	<b>WP2</b>	<b>WF3</b>	<b>WF4</b>				
Total	Pt	238755,99	148572,07	178936,01	102772,07				
Minerals	Pt	3878,34	2413,25	3658,79	2331,18				
Land use	Pt	218380,04	135893,08	142535,61	88720,07				
Acidification / Eutrophication	Pt	463,99	288,73	1367,02	294,41				
Ecotoxicity	Pt	33,43	20,81	35,32	21,03				
Ozone layer	Pt	2,97	1,85	4,55	3,83				
Radiation	Pt	1,37	0,85	1,56	1,12				
Climate change	Pt	4860,20	3024,40	13000,54	3300,62				
Resp. inorganics	Pt	10891,32	6777,08	17554,66	7919,85				
Resp. organics	Pt	43,89	27,31	88,29	34,77				
Carcinogens	Pt	200,42	124,72	689,66	145,19				

**Tabella 6 – Valori di macrocategorie di danno ambientale ottenuti per i diversi impianti in elenco in Tabella 4 applicando la metodologia LCA Ecoindicator 99 100y. Gli impatti sono calcolati per una produzione elettrica annuale di 8000 MWhel/anno ciascuno, eccetto che per gli impianti WP2 e WF4 calcolati per una produzione di sola energia termica pari a 9600 MWhterm/anno**

Categoria di danno	Unità	e01	e02	e03	e04	e05	e06	e07	e08
Totale	Pt	244372,37	517405,04	122766,35	61173,21	11695,89	0,00	34728,03	171840,54
Resources	Pt	5535,27	7022,78	82380,29	49581,22	5956,58	0,00	3761,73	19341,45
Ecosystem Quality	Pt	4928,36	12209,09	921,49	382,28	134,78	0,00	4214,34	10760,54
Human Health	Pt	233908,74	498173,17	39464,57	11209,71	5604,53	0,00	26751,96	141738,55
Categoria di danno	Unità	B1	B2	B3a	B4a	B5a	B6	B7	B8
Totale	Pt	62447,19	12109,33	172308,23	148804,34	153937,68	80488,79	341065,21	14034,93
Resources	Pt	3397,09	888,54	15340,02	11650,13	12458,68	3884,11	23401,41	1014,33
Ecosystem Quality	Pt	1224,92	291,50	45457,99	44494,07	44704,43	1441,55	7589,27	514,66
Human Health	Pt	57825,18	10929,29	111510,22	92660,15	96774,57	75163,12	310074,52	12505,94
Categoria di danno	Unità	BG1	BG2	BG3	BG4				
Totale	Pt	102190,79	226506,79	101017,61	84611,92				
Resources	Pt	5890,06	12622,29	5432,76	4565,11				
Ecosystem Quality	Pt	2288,07	4500,96	1966,33	1658,10				
Human Health	Pt	94012,66	209383,55	93618,52	78388,71				
Categoria di danno	Unità	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	
Totale	Pt	36361,47	31007,77	160721,25	393257,66	762567,40	179755,83	393001,05	
Resources	Pt	782,67	2191,90	4562,43	4562,43	4562,43	4917,30	2289,15	
Ecosystem Quality	Pt	31997,17	22566,55	137494,88	370031,29	739341,04	154593,43	372603,64	
Human Health	Pt	3581,63	6249,32	18663,94	18663,94	18663,94	20245,11	18108,26	
Categoria di danno	Unità	WP1	WP2	WF3	WF4				
Totale	Pt	238755,99	148572,07	178936,01	102772,07				
Resources	Pt	3878,34	2413,25	3658,79	2331,18				
Ecosystem Quality	Pt	218877,46	136202,62	143937,95	89035,51				
Human Health	Pt	16000,18	9956,21	31339,27	11405,38				

**Tabella 7 – Sintesi degli impatti e dei danni ambientali generati dagli impianti unitari standardizzati definiti e secondo i riferimenti svizzeri Ecoinvent per una produzione elettrica di 8000 MWhel/anno**

Risultati da Ecoindicator 99 1 MWhel. potenza 8000 MWhel./anno		BIOGAS							
		e08 Ecoinvent Swiss biogas ref.	BG1 Standard Insilato di Mais	BG2 Standard Agro - zootecnico	BG3 Standard Industria alimentare	BG4 Standard Rifiuti organici	e07 Ecoinvent Swiss wood- combustion ref.	WF3 Standard Legna forestale	
<b>IMPATTI</b>									
<b>Totale</b>	<b>Pt</b>	<b>171841</b>	<b>102191</b>	<b>226507</b>	<b>101018</b>	<b>84612</b>	<b>34728</b>	<b>178936</b>	
Carcinogens	Pt	663	57858	141533	64299	4565	3762	690	
Resp. organics	Pt	157	97	149	63	263	2980	88	
Resp. inorganics	Pt	97053	26483	50850	22378	1325	896	17555	
Climate change	Pt	43843	9557	16829	6869	70	337	13001	
Radiation	Pt	17	4	7	3	5	1	2	
Ozone layer	Pt	5	14	14	6	2	2	5	
Ecotoxicity	Pt	57	106	204	83	5851	7935	35	
Acidification/ Eutrophication	Pt	9864	1610	3577	1581	18887	17319	1367	
Land use	Pt	839	572	720	303	54	55	142536	
Minerals	Pt	19341	5890	12622	5433	53590	1440	3659	
<b>DANNI</b>									
<b>Totale</b>	<b>Pt</b>	<b>171841</b>	<b>102191</b>	<b>226507</b>	<b>101018</b>	<b>84612</b>	<b>34728</b>	<b>178936</b>	
Human Health	Pt	141739	94013	209384	93619	456	3762	31339	
Ecosystem Quality	Pt	10761	2288	4501	1966	1658	4214	143938	
Resources	Pt	19341	5890	12622	5433	78389	26751	3659	

**Tabella 8 – Sintesi degli impatti e dei danni ambientali stimati complessivamente a scala regionale (valori espressi in MegaPunti secondo la metodologia Ecoindicator 99, 100anni). I valori sono relativi sia ai singoli diversi sistemi di filiera, sia alla loro somma complessiva**

Impatti/danni Ecoindicator 99 (MPoints/anno)		BIOGAS					Combustione del legno	
		Ecoinvent	Somma impianti standard	Standard			Ecoinvent	Standard
		e08 Ecoinvent Swiss biogas ref.	Somma-BG1+BG2+BG3	BG1 Standard Insilato di Mais	BG2 Standard Agro - zootecnico	BG3 Standard Industria alimentare	e07 Ecoinvent Swiss wood-combustion ref.	WF3 Standard Legna forestale
<b>Potenza elettrica installata alla scala regionale</b>	<b>MWel.</b>	<b>124,6</b>	<b>124,6</b>	<b>45,78</b>	<b>41,67</b>	<b>37,15</b>	<b>84,96</b>	<b>84,96</b>
<b>IMPATTI</b>								
<b>Totale</b>	<b>Mpt</b>	<b>21,4</b>	<b>17,6</b>	<b>10,4</b>	<b>4,2</b>	<b>3,0</b>	<b>3,0</b>	<b>15,2</b>
Carcinogens	Mpt	0,1	9,3	6,5	2,7	0,2	0,3	0,1
Resp, organics	Mpt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
Resp, inorganics	Mpt	12,1	3,3	2,3	0,9	0,0	0,1	1,5
Climate change	Mpt	5,5	1,1	0,8	0,3	0,0	0,0	1,1
Radiation	Mpt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ozone layer	Mpt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ecotoxicity	Mpt	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,7	0,0
Acidification/Eutrophication	Mpt	1,2	0,9	0,2	0,1	0,7	1,5	0,1
Land use	Mpt	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,1
Minerals	Mpt	2,4	2,8	0,6	0,2	2,0	0,1	0,3
<b>DANNI</b>								
<b>Totale</b>	<b>Mpt</b>	<b>21,4</b>	<b>12,7</b>	<b>10,4</b>	<b>4,2</b>	<b>3,1</b>	<b>3,0</b>	<b>15,2</b>
Human Health	Mpt	17,7	13,5	9,6	3,9	0,0	0,3	2,7
Ecosystem Quality	Mpt	1,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	12,2
Resources	Mpt	2,4	3,7	0,6	0,2	2,9	2,3	0,3

Gli impatti ambientali unitari dei casi considerati variano tra 0 e 0,763 MPt (Figura 2 e Tabella 5). I valori ottenuti sono comparabili da un punto di vista complessivo, anche se le categorie di impatto che influenzano significativamente i risultati sono molto diverse tra i 2 gruppi di impianti. Negli impianti a biogas prevalgono i contributi delle sostanze cancerogene, delle sostanze respiratorie inorganiche e dell'uso del suolo (Figura 4), mentre nel caso degli impianti a combustione di biomassa legnosa prevale l'impatto relativo all'uso del suolo (Figura 5). Ovviamente i risultati dipendono dalle strutture dei dati implementate nella presente ricerca piuttosto che nei riferimenti Ecoinvent. I dati di utilizzo del suolo non sono stati considerati dai ricercatori svizzeri in quanto si presuppone che la raccolta della legna forestale in Svizzera sia assunta come praticata in maniera totalmente sostenibile; mentre nel caso degli impianti casi studio e degli unitari standardizzati da noi implementati l'entità dei valori di impatto di uso del suolo (colore marrone) risultano essere molto elevati e significativi.

Per quanto riguarda gli impianti a BIOGAS (Figura 4), confrontando il caso e08 (171.8 kPt) con gli altri casi studio e impianti unitari standardizzati a biogas, si può arrivare alla considerazione che l'im-

patto del caso BG1 s.maize potrebbe essere sotto-stimato. Questo perché nel presente studio si è utilizzato un fattore di consumo annuale di gasolio per la coltivazione pari a 50 litri di gasolio/ettaro (dichiarato nei dati di progetto [10]), mentre si sarebbe potuto utilizzare il valore di 400 litri di gasolio/ettaro proposto dall'Ente Nazionale Meccanicizzazione Agricola (ENAMA) [32]. Il caso di studio agro-zoo BG2 risulta invece essere abbastanza ben comparabile con lo scenario e08, e quindi può essere considerato accettabile.

Anche gli impianti a biogas alimentati da una filiera dell'industria agro-alimentare BG3, mostrando gli stessi impatti degli impianti alimentati totalmente con colture energetiche (insilato di mais), possono essere considerati comparabili ed accettabili in quanto si è assunta una distanza tipica di trasporto piuttosto corta dal sito di produzione dei sottoprodotti alimentari all'impianto di digestione anaerobica dell'impianto a biogas. E infatti anche gli impianti a biogas da scarica organica waste (BG4) hanno impatti molto simili a quelli dell'industria agro-alimentare agro-food BG3. Questo a causa del fatto che in ogni caso i rifiuti organici devono essere raccolti e posizionati da qualche parte. Per questo motivo nel caso

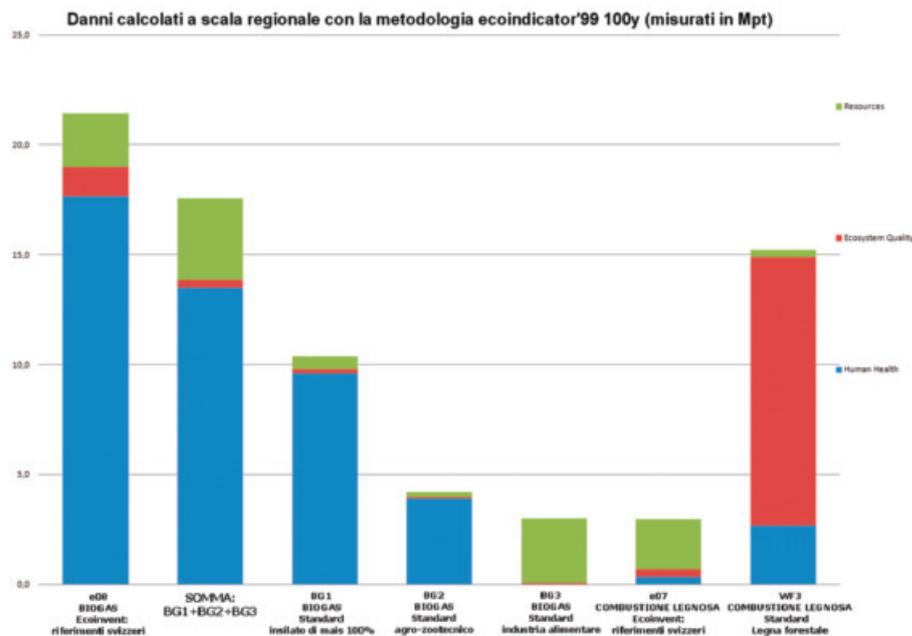


Figura 7 – Sintesi dei danni ambientali stimati complessivamente a scala regionale (espresso in MegaPunti secondo la metodologia Ecoindicator 99 100y) relative sia ai singoli diversi sistemi di filiera, sia alla loro somma complessiva

del biogas da discarica non si sono implementati i dati del trasporto in input. In pratica, in base a questa situazione logistica, i sottoprodotti alimentari possono essere associati alla raccolta dei rifiuti organici urbani, e quindi risultano praticamente equivalenti.

In sintesi, per la modellazione degli impianti a biogas si ritiene che:

- l'impianto unitario standardizzato a biogas implementato, alimentato esclusivamente da coltivazioni energetiche BG1 s.maize, sembra sottostimare significativamente il consumo di diesel dovuto alla coltivazione e quindi deve essere corretto adottando un realistico fattore di consumo medio di gasolio/ettaro;
- gli altri tre tipi di impianti unitari standardizzati a biogas (agro-zoo BG2, food industry BG3 e organic waste BG4) possono essere utilizzati come riferimenti approfonditi e specifici di quantificazione di impatto e danno ambientali.

Nella combustione di biomasse legnose (Figura 5), l'impatto dell'impianto Ecoinvent e07 risulta 5 volte minore del caso studio W3 (basato sull'arboricoltura), del caso studio W6 caratterizzato dall'utilizzo di legname forestale, e dell'impianto unitario standardizzato WF3 caratterizzato dall'utilizzo di legna di origine forestale. Gli impatti associati ai casi studio e agli impianti di combustione legnosa standardizzati non sono basati sulle categorie cambiamenti climatici e impatto respiratorio inorganico, come nel caso dell'impianto e07 (data-

base Ecoinvent), bensì sono caratterizzati da un maggior impatto uso del suolo.

Per esempio, si vede che l'impianto unitario standardizzato che utilizza legno forestale (WF3), secondo cui può essere effettuata al massimo una raccolta legnosa pari a 4,80 tonnellate/anno/ettaro di legna fresca, produce lo stesso impatto del caso studio W6 per il quale è stato utilizzato lo stesso fattore di sfruttamento. Esso produce inoltre lo stesso impatto del caso studio W3 (basato sull'arboricoltura) che considera un tasso di crescita del pioppo pari a 30 tonnellate/anno/ettaro di legna fresca. Questo può significare che il metodo di strutturazione ed implementazione dei dati utilizzato sovrastimi il fattore dell'utilizzo del territorio, e che gli impatti calcolati grazie ai riferimenti svizzeri Ecoinvent per la produzione di energia elettrica dalla combustione legnosa possano essere molto sotto-stimati, proprio riguardo all'impatto uso del suolo. A riguardo si può sottolineare come il tasso di crescita (produzione legnosa) di 30 tonnellate/anno/ettaro di legno fresco adottato come riferimento per l'arboricoltura da pioppo [25] e quello di 4,80 tonnellate/anno/ettaro di legno fresco relativo alla foresta [27], [28], diano chiara evidenza degli ordini di grandezza delle aree necessarie all'approvvigionamento legnoso e possano essere considerati affidabili, o quantomeno di riferimento, relativamente alle loro grandezze d'impatto. Per il calcolo degli impatti e dei danni relativi a queste attività, è molto meglio utilizzare i riferimenti degli im-

pianti unitari standardizzati piuttosto che i riferimenti svizzeri ufficiali Ecoinvent. Non solo tale approccio è in generale più conservativo, ma soprattutto non si può assolutamente prescindere da un parametro così importante per l'ambiente quale l'utilizzo del suolo. Gli impatti significativi di uso del suolo relativi agli impianti W5 e W4 sono riconducibili alle estensioni estremamente ampie necessarie alla coltivazione del pioppo.

Analizzando gli impatti alla scala regionale, per gli impianti a biogas si può rilevare quanto segue:

- La somma degli impatti e dei danni prodotti dai 3 differenti impianti standardizzati a biogas (BG1+BG2 +BG3 = 17,6 Mpts) è minore (-17,9%) di quelli relativi al riferimento svizzero Ecoinvent (e08 = 21,4 Mpts). Gli impatti calcolati in base al riferimento svizzero appaiono essere principalmente associati alle sostanze inorganiche inalabili per via respiratoria ed al cambiamento climatico, mentre i corrispondenti valori calcolati grazie alla somma dei 3 diversi sistemi a biogas standardizzati risultano principalmente associati alle sostanze cancerogene. Chiaramente questi risultati dipendono dal metodo adottato per costruire i dataset standardizzati per i diversi tipi di impianti a biogas. È infatti importante avere ben presente che per la strutturazione dei diversi tipi di impianti standardizzati a biogas, nel presente studio si è utilizzato un fattore di consumo di gasolio per la coltivazione delle colture energetiche pari a 50 litri di gasolio /ettaro/anno dichiarati nei documenti di progetto dei casi studio, e non si è utilizzato il fattore di 400 litri/ettaro/anno pubblicato da ENAMA.
- I 3 diversi tipi di impianti a biogas sono un ottimo riferimento per considerare e valutare i consumi di gasolio associati alle coltivazioni intensive energetiche, ai trasporti ed allo spandimento del digestato.

Analizzando gli impianti a combustione legnosa si può rilevare quanto segue:

- Gli impatti e i danni complessivi calcolati con il riferimento svizzero di Ecoinvent (3,0 Mpts) risultano essere solo il 19,4% di quelli calcolati con gli impianti standardizzati a combustione legnosa (15,2 Mpts). Questo è dovuto al significativo impatto derivante dall'utilizzo del fattore uso del suolo forestale, definito ed implementato per gli impianti unitari standardizzati come occupazione di suolo forestale in modo estensivo (Occupation, forest, extensive). Inoltre, non è noto come tale fattore sia stato implementato ed elaborato all'interno del riferimento svizzero Ecoinvent per la produzione di energia da biomasse solide.

- L'implementazione della voce "Occupation, forest, extensive" risulta corretta e necessaria a priori: la foresta non è assolutamente definibile come una "semplice, spontanea area di coltivazione di alberi per la produzione di legno", bensì rappresenta un ecosistema reale caratterizzato da funzioni e servizi ecologici fondamentali, non sostituibili ed economicamente non compensabili, quali per esempio il supporto vitale alla tutela e alla protezione della biodiversità vegetale e animale. Tra i molteplici servizi e funzioni ecologiche disturbati dal taglio e dalla raccolta del legname, per esempio, si possono pensare i periodi di riproduzione degli animali e degli uccelli che vengono fortemente disturbati e spaventati dalle rumorose attività di taglio e trascinamento dei tronchi d'albero.

#### 4. CONCLUSIONI

La metodologia di approccio fondata sui diversi tipi di impianti unitari può rappresentare un ottimo strumento per stimare e quantificare i valori di impatto e di danno ambientali generati dai loro rispettivi sistemi di impianti a scala territoriale o regionale.

Per stimare gli impatti e i danni ambientali dei sistemi territoriali a biomasse presenti in un territorio si possono utilizzare i seguenti approcci:

- utilizzare direttamente i riferimenti unitari Ecoinvent ufficiali, moltiplicandoli per l'energia elettrica (o termica, nel caso degli impianti solo termici) prodotta complessivamente nell'arco di un anno nel territorio rispettivamente dagli impianti a biogas e dagli impianti a combustione di biomasse legnose;
- utilizzare direttamente gli impatti e i danni ambientali calcolati per i diversi tipi di impianti unitari standardizzati, in base alle loro specifiche filiere di approvvigionamento, e quindi ottenere delle stime più specifiche e approfondite a seconda del tipo di sistema energetico, caratterizzate da "realisticità rappresentativa", e non da una media aritmetica, moltiplicando i loro valori unitari di impatto per i totali di potenza elettrica installati a scala regionale;
- modificare la struttura dei dati di partenza degli impianti unitari standardizzati (ad es. cambiare i consumi di gasolio per una determinata fase del processo, cambiare le distanze medie di trasporto, ecc.) per poi ricalcolarne gli impatti unitari con Ecoindicator 99 (100 anni), oppure con altre metodologie di valutazione LCA più recenti (ILCD 2011) a seconda delle singole esigenze, e quindi moltiplicarne i risultati unitari migliorati per i totali di potenza elettrica installati a scala regionale.

Alla luce di quanto esposto, la metodologia degli impianti unitari standardizzati risulta uno strumento estremamente utile e rapido da assumersi come riferimento quali-quantitativo per ulteriori studi, ricerche e bilanci di sostenibilità ambientale o di pianificazione territoriale. Tale metodologia permette di ottenere immediatamente dei valori di stima quali-quantitativa realistica degli impatti o dei danni ambientali semplicemente moltiplicando i valori di potenza elettrica (o termica) installati a scala regionale per i corrispondenti valori unitari dei diversi tipi di impianto energetico o di produzione energetica annuale (che includono sia gli impianti standardizzati, sia i riferimenti svizzeri Ecoinvent, sia le altre fonti energetiche rinnovabili e non).

In sintesi, si può ottenere immediatamente e direttamente una stima dei tipi e delle quantità degli impatti ambientali generati dai sistemi energetici regionali a biomassa semplicemente moltiplicando i danni e gli impatti ambientali unitari calcolati unitariamente per 1 MWe<sub>l</sub> di potenza elettrica e/o 8000 MWh<sub>el</sub> di produzione elettrica annuale, per i singoli dati finali delle potenze elettriche installate oppure dell'energia da loro prodotta a livello regionale.

Il limite di questo metodo e delle sue opportunità risiede nel fatto che la realtà vera degli impianti a biomassa installati a scala regionale non può assolutamente essere riassunta o rappresentata in maniera matematica esatta, perché nel settore della produzione energetica da biomasse ogni impianto lavora in una condizione logistico-territoriale a sé stante (ad es. tipo di approvvigionamento, distanza di approvvigionamento, efficienza di trasformazione, ecc.). Appare chiaro che se da un lato la tecnologia di trasformazione della biomassa organica in biogas è comune a tutti gli impianti, tuttavia il contesto può essere molto diverso. A causa dei suddetti limiti la metodologia di analisi qui presentata sicuramente non rappresenta una stima realistico-matematica. Le grandi diversità intrinseche e specifiche di ogni singolo impianto infatti non consentono una raccolta dati completa e precisa. I modelli standardizzati a livello unitario degli impianti rappresentano “una realistica struttura possibile, matematicamente non media, costruita con i migliori riferimenti bibliografici disponibili in letteratura, scelti in base sia alla loro affidabilità scientifica che alla loro praticità di utilizzo come per esempio la distanza media supposta tra i luoghi di origine della biomassa ed i luoghi ove sono situati gli impianti.

Riguardo, specificatamente, alla combustione di biomasse solide legnose, la grande differenza tra

gli impatti ambientali stimati con Ecoinvent per la produzione energetica da biomasse solide legnose rispetto a quelli ottenuti tramite l'utilizzo degli impianti unitari standard a combustione legnosa dipende in tutto e per tutto da come è stato implementato il fattore “uso del suolo” nei due casi. Nel caso svizzero Ecoinvent tale fattore risulta praticamente assente: evidentemente i parametri utilizzati in Svizzera, paese storicamente legato all'utilizzo della legna dei propri boschi, tengono conto di una diversa modalità di utilizzo forestale molto più sostenibile, di reti di teleriscaldamento elettrico-termiche molto evolute ed efficienti, ecc. Diversamente, nell'ambito del contesto “regionale italiano”, gli impianti unitari standardizzati a combustione legnosa sono stati strutturati dando notevole peso e importanza allo sfruttamento forestale (o del territorio agricolo dedicato all'arboricoltura) per diversi motivi, quali per esempio: la poca attenzione allo sfruttamento sostenibile delle foreste, nelle quantità, nei modi e nei tempi stagionali (es. tagliare gli alberi durante i periodi riproduttivi degli uccelli e degli altri animali è una pratica assolutamente dannosa per l'ecologia naturale boschiva) o le autorizzazioni alla costruzione di grandi impianti a biomassa legnosa che richiedono grandissimi quantitativi di legna durante tutto l'anno e provenienti da grandi distanze.

In conclusione, gli impianti unitari standardizzati sono stati strutturati in base ai migliori parametri tecnici reperibili sia in bibliografia che in casi studio reali. I dati ed i riferimenti utilizzati negli impianti unitari standardizzati sono tutti pubblicati e quindi ogni lettore può facilmente modificarli e migliorarli a seconda delle singole esigenze, per poi quindi implementarli di nuovo in un software LCA ed applicarli secondo la metodologia preferita. I risultati possono sempre e comunque essere confrontati con altri casi ed elaborati con altre metodologie, ed è quindi sempre possibile arrivare ai “migliori” risultati realisticamente possibili. La metodologia ed i risultati proposti nel presente lavoro possono dunque rivelarsi utili per la valutazione quali-quantitativa degli impatti e danni ambientali generati a scala territoriale/regionale dai diversi sistemi energetici a biomassa.

## 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

ARPAE-EVAC (2016) Sistema informativo energia-ambiente dell'Emilia-Romagna – Energia – Arpae. Available at: [https://www.arpae.it/dettaglio\\_generale.asp?id=3778&idlivello=2031](https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=3778&idlivello=2031) (Accessed: 27 August 2017).

- Bartolini R. (2016) Sorgo, una coltura rustica a basso impatto, adatta alla granella e all'insilato per stalla e biogas – Il Nuovo Agricoltore, Il nuovo agricoltore. Available at: <http://www.ilnuovoagricoltore.it/sorgo-una-coltura-rustica-a-basso-impatto-adatta-alla-granella-e-allinsilato-per-stalla-e-biogas/> (Accessed: 8 September 2017).
- Biteco (2016) Resa biogas – Azienda «Biteco biogas». Available at: <http://www.biteco-energy.com/resa-biogas/> (Accessed: 8 September 2017).
- CIA Piemonte (2014) Trinciato di mais produzioni fuori norma, Terraoggi.it. Available at: [http://www.terraoggi.it/notizia/Trinciato\\_di\\_maisproduzioni\\_fuori\\_norma/12978/](http://www.terraoggi.it/notizia/Trinciato_di_maisproduzioni_fuori_norma/12978/) (Accessed: 8 September 2017).
- CoProB – www.coprob.com (2011) CoproB declared empirical data. Available at: [www.coprob.com](http://www.coprob.com).
- CoProB – www.coprob.com (2016) CoproB case studies project data. Available at: [www.coprob.com](http://www.coprob.com).
- CRA-PF and Giuseppe N. (2009) La filiera del pioppo: indirizzi e prospettive TORINO 2 ottobre 2009. Available at: [https://www.panguaneta.com/images/stories/panguaneta/docs/La-filiera-del-Pioppo\\_Indirizzi-e-Prospettive.pdf](https://www.panguaneta.com/images/stories/panguaneta/docs/La-filiera-del-Pioppo_Indirizzi-e-Prospettive.pdf) (Accessed: 10 September 2017).
- CRPA (2012) 'Il digestato: utile sottoprodotto del biogas', Crescere per competere.
- CRPA et al. (2013) 'Dal tutolo nel digestore rese in metano molto buone', L'Informatore Agrario, 43(Biogas). Available at: [http://www.crpa.it/media/documents/crpa\\_www/Settori/Ambiente/Download/Archivio\\_2013/IA\\_suppl43\\_2013\\_p16.pdf](http://www.crpa.it/media/documents/crpa_www/Settori/Ambiente/Download/Archivio_2013/IA_suppl43_2013_p16.pdf) (Accessed: 8 September 2017).
- Ecoinvent LCA db (2016a) 'Transport, lorry 16-32t, EURO4/RER U'.
- Ecoinvent LCA db (2016b) 'Transport, tractor and trailer/CH U'.
- Gnudi G. (2013) Trinciato di mais, allarme rese – Terra e Vita, Terra e vita. Available at: <http://www.terraevita.it/trinciato-di-mais-allarme-rese/> (Accessed: 8 September 2017).
- Impianti di cogenerazione srl (2016) Calcola letame e liquame – Cogenerazione, Consulenze, Impianti chiavi in mano, Certificati bianchi., Impianti di cogenerazione srl. Available at: [http://www.impiantidicogenerazione.com/calcola-letame-liquame\\_144.htm](http://www.impiantidicogenerazione.com/calcola-letame-liquame_144.htm) (Accessed: 8 September 2017).
- INFC-2011 (2011) INFC 2005 agg. 2011 – Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio. Available at: <http://www.sian.it/inventarioforestale/>.
- INFC.ARPAE (2016) Disponibilità utile di legna forestale per scopi energetici dai boschi dell'Emilia-Romagna: elaborazione dati INFC 2005 agg. 2011.
- ISP et al. (2007) Pioppicoltura: Produzioni di qualità nel rispetto dell'ambiente. Istituto di Sperimentazione per la Pioppicoltura. Available at: [http://www.populus.it/pdf/libretto\\_pioppicoltura.pdf](http://www.populus.it/pdf/libretto_pioppicoltura.pdf) (Accessed: 8 September 2017).
- Koedkoop Mark R.S. (2001) The Ecoindicator'99 – A damage orientated method for Life Cycle Impact Assessment – Methodology Report.
- Mantovi P. et al. (2015) 'Varietà di sorgo a confronto per la produzione di biogas', L'Informatore agrario. Available at: [http://www.crpa.it/media/documents/crpa\\_www/Settori/Fo-raggicol/Download/Archivio\\_2015/IA\\_45\\_2015\\_p65.pdf](http://www.crpa.it/media/documents/crpa_www/Settori/Fo-raggicol/Download/Archivio_2015/IA_45_2015_p65.pdf) (Accessed: 8 September 2017).
- Arruzza M. and Ragazzoni A. (2011) Convenienza economica e fattibilità tecnica di piccoli impianti a biogas: alcuni casi studio, L'informatore Agrario. Available at: [http://www.mit.gov.it/mit/mop\\_all.php?p\\_id=10640](http://www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=10640) (Accessed: 8 September 2017).
- MIT, I.T.M. (2011) 'Costo chilometrico medio relativo al consumo di gasolio delle imprese di autotrasporto per conto terzi'. Available at: [http://www.mit.gov.it/mit/mop\\_all.php?p\\_id=10640](http://www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=10640) (Accessed: 8 September 2017).
- Reg. Piemonte et al. (2012) 'Produzione di energia e uso agronomico di biomasse agroalimentari e reflui zootecnici', Agricoltura, 77. Available at: [http://www.regione.piemonte.it/agri/comunicazione/quaderni/num77/dwd/Agricoltura\\_77\\_web-Produzione\\_di\\_energia.pdf](http://www.regione.piemonte.it/agri/comunicazione/quaderni/num77/dwd/Agricoltura_77_web-Produzione_di_energia.pdf) (Accessed: 8 September 2017).
- Repetti O. (2014) Trinciato di mais, annata d'oro – Terra e Vita, Terra e vita. Available at: <http://www.terraevita.it/trinciato-di-mais-annata-doro/> (Accessed: 8 September 2017).
- RER. AGR. Stat (2016) Agricoltura – E-R Statistica. Available at: <http://statistica.regione.emilia-romagna.it/agricoltura> (Accessed: 8 September 2017).
- RER. Reg. 1.2011 (2011) 'Regolamento regionale ai sensi dell'articolo 8 della legge regionale 6 marzo 2007, n. 4. Disposizioni in materia di utilizzazione agronomica degli effluenti di allevamento e delle acque reflue derivanti da aziende agricole e piccole aziende agro-alimentari'.
- RER. SPF (2016) RER. SPF Servizio Regionale Parchi e Foreste dell'Emilia-Romagna. Available at: <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/parchi-natura2000/foreste/le-foreste-dellemilie-romagna>.
- RER. VIA (2011) Valutazione di impatto ambientale e autorizzazione unica relativa al progetto per la realizzazione di un polo per le energie rinnovabili sito in Via Carrarone n. 3 nel comune di Russi (RA) – Riconversione ex zuccherifici Eridania SADAM Spa proposto da Pow. Available at: <http://bur.regione.emilia-romagna.it/area-bollettini/n.-53-del-07.04.2011-parte-seconda/valutazione-di-impatto-ambientale-e-autorizzazione-unica-relativa-al-progetto-per-la-realizzazione-di-un-polo-per-le-energie-rinnovabili-sito-in-via-carrarone-n.-3-nel> (Accessed: 8 September 2017).
- Riva G. et al. (2011) La filiera del biogas. ASSAM – Agenzia Servizi Settore Agroalimentare delle Marche Trasferimento dell'Innovazione, Comunicazione e Progetti Comunitari; Assessorato all'Agricoltura Regione Marche. Available at: <http://www.laboratoriobiomasse.it/media/docs/downloads/103-1.pdf> (Accessed: 8 September 2017).
- Salvagno S., Colferai C. and Di C. (2016) Il trinciato. Available at: <http://www.maisadour-semences.fr/it/speciale-trinciato-italia.pdf> (Accessed: 8 September 2017).
- Simapro (2017) Simapro – Ecoinvent v3 | High-Quality LCI Database Integrated in SimaPro. Available at: <https://simapro.com/databases/ecoinvent/> (Accessed: 3 September 2017).
- TIS et al. (2011) Analisi energetica, ambientale ed economica di impianti a biogas in Provincia di Bolzano -Relazione conclusiva – Partner. Bolzen (ITA). Available at: [http://www.provincia.bz.it/agricoltura/download/Bilancio\\_ecologico\\_di\\_impianti\\_a\\_biogas.pdf](http://www.provincia.bz.it/agricoltura/download/Bilancio_ecologico_di_impianti_a_biogas.pdf) (Accessed: 6 September 2017).
- WPK et al. (2016) Woodpecker project: Hypotesys of forest exploitation about a scenario of 200 kW electric wood combustion plant in Apennine region.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2019 è sostenuta da:

