

Produzione e utilizzo del biochar in Alto Adige: analisi del ciclo di vita (LCA) della filiera

Irene Criscuoli – Libera Università di Bolzano

Pietro Panzacchi – Libera Università di Bolzano, Italia / Università degli Studi del Molise

Timo Rossberg – LCA Works Limited, Bedford, Regno Unito

Onesmus Mwabonje – LCA Works Limited, Bedford, Regno Unito

Piers Cooper – LCA Works Limited, Bedford, Regno Unito

Jeremy Woods – LCA Works Limited, Bedford, Regno Unito

Giustino Tonon – Libera Università di Bolzano

Abstract

Attraverso l'analisi di ciclo di vita (LCA) si sono valutati i consumi energetici e le emissioni di gas serra associati alla produzione e all'impiego del biochar da gassificazione nei terreni agrari alto-atesini.

Ad oggi in Alto Adige esistono una quarantina di impianti di gassificazione che impiegano dieci tecnologie distinte. Nessuna di queste consente la produzione di biochar idoneo all'utilizzo in agricoltura, quindi i gestori devono smaltirlo come rifiuto. La filiera risulta avere un impatto ambientale positivo con emissioni di gas serra e consumi energetici negativi. Infatti la gassificazione del legno è una tecnologia energetica ad emissioni zero che può essere impiegata per sostituire fonti energetiche fossili, più impattanti.

Il progetto Wood-Up propone diverse modalità di valorizzazione della filiera attuale. In primis, dalla biomassa legnosa si possono estrarre olii essenziali, prima della gassificazione. L'estrazione è un procedimento con alti consumi energetici, ma gli impatti non sono tali da cambiare il segno del bilancio netto della filiera. Secondariamente, il biochar può essere impiegato come ammendante agricolo, se rispetta determinati parametri di legge. A tal fine il progetto Wood-Up propone l'utilizzo di una tecnologia "migliorata" che permetta la produzione di un biochar idoneo all'utilizzo in agricoltura. Secondo l'analisi LCA, l'impiego della nuova tecnologia migliora il bilancio netto della filiera e la distribuzione del biochar nel suolo ne aumenta gli stock di carbonio e permette di ridurre l'impiego di fertilizzanti di sintesi e acqua a fini irrigui, portando un ulteriore miglioramento del bilancio netto.

In Alto Adige tuttavia al momento si producono annualmente 1250 t di biochar, una quantità sufficiente ad ammendare 50 ettari ipotizzando una dose di 25 t/ha nella distribuzione in campo. Questa superficie è assai ridotta se confrontata con la superficie totale dei vigneti (5.500 ha) e dei meleti (19.000 ha). Ne consegue che per sostenere un impiego diffuso del biochar in agricoltura sarebbe necessario ricorrere all'importazione del biochar stesso, o aumentare il numero degli impianti di gassificazione. Inoltre, l'impiego delle nuove tecnologie comporterebbe un fabbisogno di biomassa circa doppio rispetto alle tecnologie attuali a parità di biochar prodotto. Ne consegue che l'implementazione di questi scenari, può realizzarsi solo attraverso una pianificazione e un sostegno politico a livello provinciale.

1. Introduzione

L'analisi del ciclo di vita (in inglese *Life Cycle Assessment, LCA*) è uno strumento utilizzato per valutare l'impatto sull'ambiente e sulla salute umana del processo di produzione di un bene o di un servizio. L'analisi LCA viene realizzata implementando metodologie standardizzate a livello internazionale (ISO, 2006a, 2006b). I risultati delle analisi LCA possono essere utilizzati come supporto decisionale, sia a livello aziendale che politico, al fine di valutare scenari alternativi e optare per le scelte più sostenibili (Guinée et al., 2011).

Nell'ambito del progetto Wood-Up, l'analisi del ciclo di vita è stata implementata al fine di valutare l'impatto ambientale della filiera della gassificazione del legno, attualmente presente in Alto Adige, esaminandone i consumi energetici e le emissioni di gas climalteranti. La filiera analizzata inizia con la produzione della biomassa legnosa e arriva fino allo smaltimento dei residui della gassificazione attraverso il conferimento del biochar in discarica, l'incenerimento o il suo impiego per la produzione di calcestruzzo, in sostituzione al cemento. Allo stato attuale, infatti, il biochar prodotto dagli impianti alto-atesini non rispetta i parametri di legge che consentono il suo impiego in agricoltura (G.U. 186 12.08.2015) e quindi non può essere utilizzato come ammendante.

Sulla base dei dati prodotti nell'ambito del progetto Wood-Up, la filiera attuale è stata quindi confrontata con una possibile filiera ottimizzata, che preveda sia l'estrazione di olii essenziali dalla biomassa legnosa, da destinare al

mercato farmaceutico prima della gassificazione, sia una modifica delle tecnologie di trasformazione energetica tale da permettere la produzione di un biochar idoneo all'utilizzo in agricoltura.

Nel presente capitolo si descriveranno la metodologia di analisi LCA utilizzata e i risultati ottenuti su scala provinciale.

La filiera della gassificazione e dell'impiego del biochar nei terreni agricoli è già stata analizzata in passato (Hamedani et al., 2019; Ibarrola et al., 2012; Lugato et al., 2013; Roberts et al., 2010). Recentemente Matustík e colleghi (2020), hanno analizzato i risultati di 27 lavori pubblicati tra il 2011 e il 2019 in cui biochar ottenuto da pirolisi è stato applicato a suoli agricoli, mettendo in evidenza la difficoltà di comparare i risultati tra loro a causa dell'estrema varietà nella scelta delle unità funzionali, nei confini del sistema e nelle tecnologie usate. Hammond e colleghi (2011) hanno dimostrato che la pirolisi pur essendo meno efficiente nella produzione di elettricità rispetto alla gassificazione, garantirebbe un abbattimento delle emissioni di CO₂ maggiore per via della maggior quantità di biochar prodotto per unità di feedstock, assumendo che il 68% del carbonio presente nel biochar applicato al suolo rimanga stabile per almeno 100 anni. Tuttavia la gassificazione è risultato sia il processo più efficiente per la produzione di energia a parità di feedstock se comparata con la pirolisi (Ibarrola et al., 2012), sia molto più sostenibile della completa combustione della biomassa (Nguyen et al., 2013). Il numero di fattori variabili che caratterizzano le filiere "biomassa-trasformazione energetica-destino del residuo carbonioso", rende indispensabile una valutazione di impatto ambientale via LCA per ogni filiera che si voglia prendere in considerazione (Matustík et al., 2020). Per questo motivo è stato necessario realizzare un'analisi LCA all'interno del progetto Wood-Up, utilizzando principalmente i dati prodotti dai diversi partner del progetto per ogni fase della filiera. Un'analisi LCA così specifica permette di disegnare un quadro realistico della situazione attuale e una valutazione concreta degli scenari alternativi.

La nostra ipotesi è che, dall'analisi LCA, si evidenzino come l'innovativa filiera di gassificazione, proposta in Wood-Up, possa contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra sia del settore energetico che di quello agricolo, entrambi caratterizzati da elevate emissioni di gas climalteranti. La produzione di energia da biomassa, infatti, è una fonte di energia rinnovabile, che va a sostituire

l'energia prodotta da fonti fossili (European Parliament and Council, 2018) e che, parallelamente l'uso del biochar in agricoltura, può contribuire a ridurre il fabbisogno idrico e di fertilizzanti di sintesi rispetto alle pratiche agronomiche maggiormente diffuse nella provincia e aumentare gli stock di carbonio oltre che ridurre le emissioni di gas serra dai suoli (Shaaban et al., 2018).

2. Materiali e metodi

La LCA per il progetto Wood-Up è stata eseguita secondo le metodologie standardizzate a livello internazionale ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006a, 2006b) e le migliori prassi raccomandate dalla guida di riferimento internazionale per la compilazione del Life Cycle Assessment, il *ILCD Handbook* del Joint Research Center (JRC, 2010), che prevedono la definizione dello scopo della LCA, l'analisi d'inventario e l'interpretazione dei risultati.

2.1 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione

L'obiettivo della presente analisi è quello di confrontare l'impatto ambientale dell'attuale filiera di gassificazione presente in Alto Adige con quello di una filiera "migliorata". Il miglioramento della filiera si riferisce nello specifico alla valorizzazione della biomassa tramite l'estrazione di olii essenziali prima dello sfruttamento energetico e all'utilizzo del biochar come ammendante in agricoltura. Si vuole inoltre valutare l'influenza che determinati fattori hanno sul bilancio netto della filiera, quali l'origine della biomassa e la distanza percorsa per il suo trasporto.

Le categorie di impatto valutate nell'analisi sono: consumo di energia fossile (kg di petrolio equivalente) e cambiamento climatico (kg di anidride carbonica equivalente su un periodo di 100 anni). Gli impatti ambientali di ogni processo sono stati calcolati moltiplicando gli input di materia e di energia, relativi all'unità funzionale dell'LCA che in questo caso corrisponde ad 1 tonnellata di biochar, per i fattori di emissione. Maggiori dettagli sui calcoli sono forniti nella sezione 2.3 del presente capitolo.

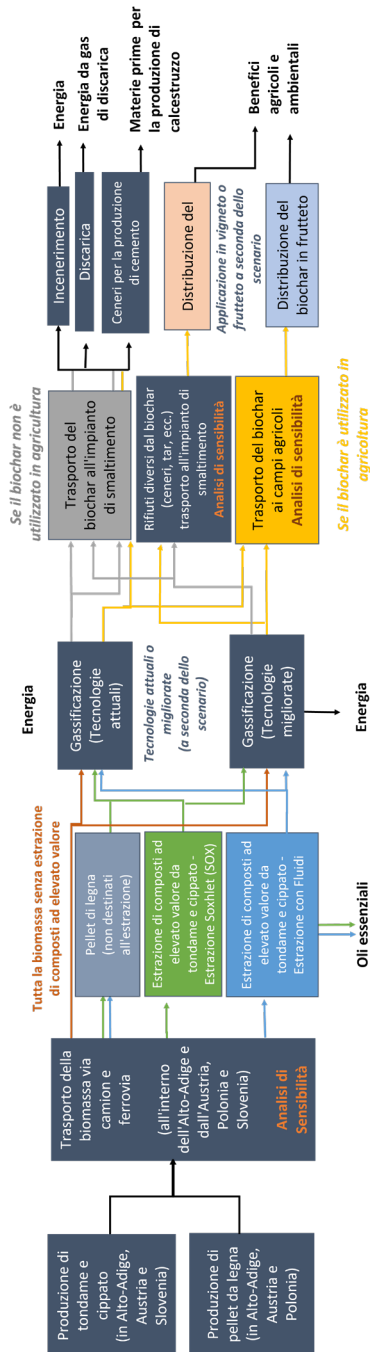


Fig. 1 – Filiera oggetto di studio dell'LCA

La filiera oggetto di studio è descritta nel diagramma di flusso riportato in Fig. 1 dove si descrivono i processi inclusi nei confini del sistema per la filiera attualmente presente in Alto Adige (Scenario 1) e per 6 scenari alternativi.

I blocchi del diagramma rappresentano unità di processo, mentre le frecce rappresentano i flussi di biomassa, altri tipi di materiale o energia. I diversi colori e le descrizioni di testo associati ai blocchi e alle frecce identificano processi e flussi paralleli, ossia ogni colore rappresenta un'alternativa che si verifica o meno a seconda dello scenario oggetto di analisi e non una divisione del flusso di materia/energia all'interno di un singolo scenario. Frecce dello stesso colore indicano flussi di materia/energia verso il processo successivo (Fig. 1).

I sette scenari oggetto di analisi sono presentati di seguito:

- Scenario 1 – Situazione attuale: Valutazione dei processi di gassificazione attualmente presenti in Alto Adige: l'attuale tipologia e provenienza della biomassa utilizzata, nessuna estrazione di composti di elevato valore dalla biomassa prima della gassificazione, le attuali tecnologie di impianti di gassificazione, smaltimento di tutti i prodotti risultanti dalla gassificazione (carbone, cenere, catrami) senza l'impiego del biochar nei terreni agrari.
- Scenario 2 – Situazione attuale + Estrazione di composti di elevato valore: Uno scenario con le stesse impostazioni dello scenario 1, ma con l'estrazione di composti di elevato valore (oli essenziali) dalla biomassa legnosa prima della gassificazione. Dal confronto di questo scenario con lo scenario 1, si può isolare l'impatto che il processo di estrazione degli oli essenziali ha sulle emissioni di CO₂ equivalente e sui consumi di fonti energetiche fossili. L'estrazione può essere realizzata con la metodologia Soxhlet o con CO₂ supercritica.
- Scenario 3 – Situazione attuale + Gassificazione migliorata: Uno scenario con le stesse impostazioni dello scenario 1, ma con l'impiego di tecnologie di gassificazione in grado di produrre biochar idoneo all'impiego in agricoltura, secondo quanto emerso dai risultati del WP 6 del progetto Wood-Up. Questo scenario permette di confrontare gli impatti delle tecnologie di gassificazione attualmente impiegate rispetto a quelle migliorate.

- Scenario 4 – Gassificazione migliorata + Estrazione di composti di elevato valore: Uno scenario con le stesse impostazioni dello scenario 3, ma con l'aggiunta dell'estrazione di composti di elevato valore (oli essenziali) dalla biomassa prima della gassificazione.
- Scenario 5 – Gassificazione migliorata + Applicazione del biochar nei campi agricoli (vigneto): Uno scenario con gli stessi parametri dello scenario 3, ma con l'applicazione del biochar nei vigneti dell'Alto Adige. Il biochar, piuttosto che essere smaltito, può essere impiegato come ammendante agricolo grazie all'utilizzo di tecnologie di gassificazione migliorate. Questo scenario permette di misurare i benefici o gli impatti ambientali dell'applicazione del biochar nei campi agrari rispetto allo smaltimento.
- Scenario 6 – Gassificazione migliorata + Applicazione del biochar nei campi agricoli (meleto): Uno scenario con gli stessi parametri dello scenario 5, ma con la distribuzione del biochar nei meleti, e non nei vigneti. Questo scenario ha lo scopo di facilitare il confronto degli impatti/benefici dell'applicazione del biochar nelle colture agrarie di maggiore importanza in Alto Adige
- Scenario 7 – Gassificazione migliorata + Estrazione di composti di elevato valore + Applicazione del biochar in agricoltura: Uno scenario con gli stessi parametri dello scenario 5 ma con in aggiunta l'estrazione di composti di elevato valore (oli essenziali) dalla biomassa prima della gassificazione.
- Scenario dinamico: Uno scenario che viene definito di volta in volta a seconda delle ipotesi che si vogliono verificare. Lo scenario dinamico è uno strumento utile per valutare, singolarmente, gli impatti di tutti i processi della filiera e per realizzare delle analisi di sensibilità.

La LCA è stata eseguita con un approccio *attribuzionale* e *conseguenziale*. Per modello attribuzionale si intende un'analisi degli impatti associati a tutti i processi inclusi nei confini del sistema oggetto di studio. Il modello conseguenziale, invece, quantifica anche le conseguenze su altri sistemi, espandendo i confini del sistema analizzato (McManus & Taylor, 2015). Ad esempio, la diffusione degli impianti di gassificazione in Alto Adige può ridurre la domanda di energia elettrica dal *mix* energetico nazionale, e l'impiego del biochar in

agricoltura può ridurre l'impiego di fertilizzanti rispetto alla gestione agricola tradizionale.

2.2 Inventario del ciclo di vita (LCI) e LCA workbook

I dati che costituiscono l'inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*), sono stati ricavati, per quanto possibile, dal lavoro di ricerca svolto nell'ambito del progetto Wood-Up. Questi dati primari forniscono il valore più accurato possibile per lo studio della filiera. Qualora i dati non fossero disponibili al fine di completare il dataset si è ricorsi a dati secondari ricavati dal database *Ecoinvent 3* (Versione 3.1, aggiornato al 2014 (Wernet et al., 2016) e dalla letteratura scientifica in materia. L'LCI è stato sviluppato utilizzando *Microsoft Excel*.

Una serie di fogli Excel è stata integrata in un documento (*LCA workbook*) al fine di unire l'LCI con i fattori di emissione relativi a ogni processo della filiera, calcolati con il software SimaPro, Version 8.0.5.13 (PRé Sustainability, Amersfoort, Netherlands, 2018). Si sono così ottenuti i risultati, in termini di impatti, dell'analisi LCA.

Per altri processi, come l'applicazione del biochar nei campi agricoli, i dati di impatto sono stati forniti dai partner del progetto Wood-Up o ricavati dal Bio-Grace tool (versione 4d), sviluppato dall'Istituto per la Ricerca su Energia e Ambiente (IFEU) nel 2015 permette l'armonizzazione dei calcoli relativi alle emissioni di gas serra dei biocarburanti, (www.biograce.net).

L'inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*) e la valutazione (*Life Cycle Assessment, LCA*) sono stati sviluppati per ognuno degli scenari presentati nella sezione 2.1.

2.3 Dati e assunzioni

I dati utilizzati per l'analisi LCA sono un misto di dati primari, prodotti dai partner del progetto Wood-Up, e secondari ottenuti dal database *Ecoinvent 3* e dalla letteratura. Le fonti e le assunzioni alla base del *workbook LCA*, per i diversi processi della filiera, sono presentati di seguito.

2.3.1 Produzione della biomassa

La produzione di biomassa legnosa destinata alla gassificazione include la produzione di *tondame* e *cippato* di origine alto-atesina ed estera (Austria e Slovenia) e la produzione di pellet di legna proveniente dall'estero (Austria e Polonia). Questi tre tipi di biomassa sono trasportati agli impianti di gassificazione, dove, se necessario, sono processati per raggiungere la pezzatura idonea all'utilizzo nel gassificatore. I processi di trasporto e lavorazione della biomassa sono descritti con maggiore dettaglio nelle sezioni 2.3.2 e 2.3.4.

Si è assunto che tutta la biomassa legnosa utilizzata per la gassificazione sia abete rosso (*Picea abies* (L.) H. Karst., 1881) poiché sulla base dei questionari rivolti ai gestori degli impianti di gassificazione, questa specie è risultata essere la più ampiamente utilizzata in Alto Adige.

Le proporzioni di ogni tipo di biomassa utilizzata, sempre sulla base dei questionari, sono: 69 % tondame o cippato (di cui 50 % tondame e 50 % cippato) e 31 % pellet.

L'85 % del tondame e del cippato sono di origine alto-atesina e il restante 15 % è importato dall'estero (50 % dalla Slovenia e 50 % dall'Austria). Il 50 % del cippato deriva da residui di segheria e il restante 50 % è un prodotto forestale primario. Tutto il pellet impiegato negli impianti di gassificazione è importato dall'estero (90 % dall'Austria e il 10 % dalla Polonia).

A partire dall'unità funzionale dell'LCA, si è ricostruita la quantità totale di biomassa necessaria a produrre 1 tonnellata di biochar, prendendo in considerazione gli input, gli output e i dati relativi alla perdita di biomassa nei processi antecedenti la gassificazione. Nel caso in cui non vengano estratti olii essenziali, prima della gassificazione, per la produzione di 1 t di biochar sono necessarie a livello provinciale 33,47 t di biomassa legnosa. Se invece nella filiera viene inserito il processo di estrazione Soxhlet, allora sono necessarie 34,62 t di biomassa e, se si applica il processo di estrazione con CO₂ supercritica, ne sono necessarie 34,52 t. La differenza nelle due stime è da imputare alla diversa perdita di biomassa nei due sistemi di estrazione. Maggiori dettagli saranno forniti nel paragrafo relativo al processo di estrazione (2.3.3.).

I processi descrittivi della produzione di biomassa sono stati selezionati dal database Ecoinvent 3, scegliendo quelle che sono state considerate come le migliori approssimazioni. Nel caso in cui i dati non fossero disponibili per il

contesto alto-atesino o italiano, si sono scelti i dati relativi a contesti assimilabili. In questo caso i processi selezionati sono la produzione di tondame e cippato in Svizzera da una filiera forestale sostenibile di legno tenero e la produzione di cippato da una segheria. I consumi elettrici riportati in Ecoinvent associati alla produzione di biomassa legnosa sono stati adeguati al mix di fonti energetiche elettriche italiano.

Gli input di carbonio biogenico, ossia l'assorbimento della CO₂ per mezzo della fotosintesi e dell'accrescimento degli alberi, sono stati eliminati dai processi selezionati in Ecoinvent 3, relativi alla produzione della biomassa, poiché già considerati nel *workbook* LCA, in cui la gassificazione è stata valutata come un processo di produzione energetica "ad emissioni zero" (Direttiva EU 2018/2001 sugli obiettivi di energia rinnovabile nell'Unione Europea, European Parliament and Council, 2018).

2.3.2 Trasporto della biomassa agli impianti di gassificazione

Il trasporto della biomassa legnosa verso l'impianto di gassificazione avviene attraverso autocarro o treno merci. Nel caso degli scenari che includono la fase di estrazione degli olii essenziali, si è ipotizzato che questa avvenga presso l'impianto di gassificazione, perciò non è necessario contabilizzare un'ulteriore fase di trasporto della biomassa.

Nel caso in cui la biomassa provenga dall'Alto Adige, si è assunto che il 100 % del trasporto avvenga su gomma; per la biomassa proveniente dall'estero si è ipotizzato che il 50 % del trasporto avvenga su gomma e il 50 % su rotaia. Il viaggio di ritorno del mezzo di trasporto è stato assunto essere a carico vuoto. Questa assunzione potrebbe non essere sempre vera, ma consente stime conservative.

La lunghezza del tragitto è stata definita sulla base delle regioni di origine della biomassa e calcolata con *Google Maps* (2020). Le distanze medie, viaggi di andata e ritorno, risultano essere 150 km se il trasporto avviene all'interno dell'Alto Adige, 800 km se il carico proviene dall'Austria e dalla Slovenia e 2400 km dalla Polonia.

Inoltre, ai fini delle analisi di sensibilità, è stata lasciata la possibilità di inserire manualmente, all'interno del *workbook* LCA, delle distanze teoriche, per valutarne gli impatti.

Si è assunto che, durante il trasporto, non si verifichino perdite di biomassa, quindi le quantità totali trasportate, relative all'unità funzionale, sono le stesse indicate per la produzione di biomassa, nella sezione precedente (2.3.1).

Al fine di calcolare gli impatti della fase di trasporto, sono stati selezionati su Ecoinvent i processi che possono rappresentarla con buona approssimazione. Per il trasporto su autocarro si sono selezionati i dati relativi al trasporto, in Europa, al di fuori della Svizzera, su camion di 16-32 tonnellate con livello di emissioni *EURO5*. Per il trasporto su rotaia è stato selezionato un processo di trasporto merci austriaco per la biomassa proveniente da Austria, Polonia e Slovenia dato che non erano disponibili dati specifici anche per gli altri due Paesi. Tutti i dati di impatto includono l'uso proporzionale delle infrastrutture, ad esempio l'uso delle strade e la produzione dei mezzi di trasporto.

2.3.3 Estrazione di composti ad elevato valore prima della gassificazione

I dati relativi all'estrazione di composti ad elevato valore commerciale dalla biomassa legnosa, olii essenziali, sono stati prodotti dall'Università di Bolzano nell'ambito del progetto Wood-Up. I dati di laboratorio, prodotti in riferimento all'estrazione *Soxhlet* (SOX) e all'estrazione con anidride carbonica (CO₂) supercritica (SFE), sono stati scalati a livello di piccoli impianti industriali relativamente all'unità funzionale dell'LCA. Per una descrizione dettagliata dei due metodi di estrazione si veda il capitolo 2 del presente volume. I dati riguardanti la SOX si riferiscono a un ipotetico impianto industriale capace di processare 20 kg di biomassa alla volta; i dati relativi all'SFE rappresentano un impianto con una capacità di 100 kg. I dati di input e output ottenuti in laboratorio, relativi all'SFE, sono stati scalati utilizzando un fattore di 0,25 poiché non è realistico ipotizzare un *up-scaling* lineare (1:1) dei fattori di input e output con l'aumentare della taglia dell'impianto. Ad esempio, gli impianti industriali, di più grandi dimensioni rispetto alle strumentazioni di laboratorio, presentano un utilizzo più efficiente dell'energia.

Si è assunto che l'estrazione di olii essenziali avvenga direttamente sul sito dell'impianto di gassificazione, per cui non si prevedono ulteriori fasi di trasporto e, ad eccezione del pellet, il 100 % della biomassa legnosa (tondame e

cippato) è sottoposto al processo di estrazione degli olii essenziali, nel caso in cui tale processo sia selezionato negli scenari di analisi.

Il *workbook* LCA offre anche la possibilità di valutare l'impatto della diffusione di una sola tecnologia o di un mix delle due. Nel caso si assuma che entrambe le tecnologie possano essere impiegate diffusamente a livello provinciale, il grado di diffusione delle due è stato determinato sulla base dell'efficienza dei due processi, ossia sulla base del rapporto fra olii essenziali estratti e biomassa legnosa in ingresso (5 % per l'estrazione SOX e 4,6 % per l'estrazione SFE). Conseguentemente la biomassa è stata allocata proporzionalmente, con più biomassa destinata al processo più efficiente: 52 % all'estrazione Soxhlet (SOX) e 48 % all'estrazione con CO₂ supercritica (SFE).

Gli impatti dello sminuzzamento della biomassa prima del suo ingresso nell'impianto di estrazione e gli impatti del funzionamento degli impianti stessi sono stati calcolati sulla base dei consumi energetici dei suddetti processi. I fattori di emissione sono stati ottenuti sulla base di processi assimilabili a quelli oggetto di studio, contenuti nel database Ecoinvent, adeguando i dati al mix energetico italiano di medio voltaggio. Le emissioni associate alla produzione e all'uso dell'esano, il solvente utilizzato per la SOX, e dell'etanolo, utilizzato per la SFE, sono stati esclusi a causa della mancanza di dati consolidati. La CO₂ utilizzata nelle reazioni SFE non è stata contabilizzata perché viene riciclata nel processo di estrazione.

2.3.4 Gassificazione con tecnologia attuale

Il processo di gassificazione include la fase di riduzione della biomassa alla dimensione corretta per l'impianto (se la fase di estrazione degli olii essenziali non è inclusa nella filiera) e la gassificazione stessa, con la produzione di energia termica, elettricità, biochar, catrame e ceneri.

Nel caso in cui la fase di estrazione non sia inclusa nella filiera, allora si è assunto che il 50 % della biomassa necessiti di cippatura da parte del gestore dell'impianto. Le emissioni della cippatura sono calcolate con un processo Ecoinvent per una cippatrice mobile alimentata a diesel. Si è assunto che le cippatrici siano posizionate nei pressi dell'impianto di gassificazione, quindi non sono stati contabilizzati ulteriori trasporti. Non si è valutato l'impatto dell'essiccazione della biomassa separatamente dalla gassificazione, poiché i

processi di Ecoinvent relativi alla gassificazione, includono già la fase di essiccazione. Questi processi sono stati applicati a tutti i tipi di biomassa (non solo a tondame e cippato, ma anche al pellet), motivo per il quale le stime di impatto fornite sono conservative.

I dati relativi alle tecnologie di gassificazione attualmente in uso in Alto Adige, sono stati raccolti nell'ambito del WP 5 del progetto Wood-Up attraverso dei questionari rivolti ai gestori degli impianti (Capitolo 1 del presente volume). Sulla base dei dati raccolti, la stima della produzione annuale di biochar nella provincia autonoma di Bolzano è di 1249,61 t, distribuite su 42 impianti. Gli impianti sono stati raggruppati per tipo di funzionamento (tecnologia a *letto fisso/letto fluido*; *up-draft/down-draft*), tipo di biomassa utilizzata (cippato/pellet), azienda fabbricatrice dell'impianto, taglia dell'impianto etc.. Poiché alcuni gestori non hanno risposto ai questionari, o lo hanno fatto solo parzialmente, i dati dei questionari sono stati estrapolati a tutti gli impianti della Provincia sulla base delle categorie sopra citate.

Complessivamente in Alto Adige esistono 10 tecnologie di gassificatori e solo una di queste prevede, alla fine del processo, la combustione del biochar (*post-reforming*), trasformando quindi il biochar in cenere e riducendo notevolmente il volume del prodotto finale. Il *workbook* LCA però non distingue fra cenere e biochar, comportando una sovrastima nella produzione annua di biochar per questa tecnologia.

Uno degli impianti con tecnologia *post-reforming* conferisce la cenere a un cementificio locale, per la produzione di calcestruzzo. Di questo conferimento sono stati stimati gli impatti in termini di trasporto e sostituzione di materie prime (cemento).

I processi di gassificazione del legno in Ecoinvent calcolano i fattori di emissione relativi all'unità di processo di un m³ di *syngas*, per le tecnologie a letto fisso e fluido. Il *syngas* è una miscela di gas (monossido di carbonio (CO), idrogeno (H₂), metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂)) che viene generato dalla gassificazione della biomassa e che viene utilizzato come combustibile, per generare energia elettrica. La quantità di *syngas* (m³) prodotto da ogni tecnologia, e quindi gli impatti ad esso associati, è stata stimata sulla base della produzione del biochar/cenere e dei suddetti processi Ecoinvent.

Al fine di quantificare l'energia fossile sostituita dall'energia prodotta con la gassificazione, si è calcolata la produzione netta di elettricità e calore degli impianti. Per produzione netta si intende l'energia prodotta dall'impianto al netto dei consumi interni. I dati di consumo interno di elettricità sono stati dichiarati dai gestori degli impianti, mentre per l'energia termica si è assunto un consumo interno del 25 %.

I processi di Ecoinvent selezionati per calcolare i fattori di emissione dei gasificatori a letto fisso e fluido sono relativi alla Svizzera, poiché non erano disponibili dati per l'Italia e la Svizzera è stata considerata un'approssimazione ragionevole. I due processi (letto fisso e mobile) non rappresentano la varietà di tecnologie e taglia di impianto evidenziati dalla raccolta dei questionari, ma sono stati considerati come un'approssimazione media accettabile al fine di calcolare i fattori di emissione. Come per gli input di carbonio biogenico, nei processi di produzione della biomassa, anche gli output di carbonio biogenico (la CO₂ emessa dalla gassificazione del legno) sono stati eliminati dai processi Ecoinvent poiché l'energia prodotta dalla biomassa per gassificazione è considerata "a emissioni zero" (Direttiva EU 2018/2001 sugli obiettivi di energia rinnovabile nell'Unione Europea, (European Parliament and Council, 2018)).

2.3.5 Gassificazione con tecnologia migliorata

Come detto in precedenza, il biochar prodotto dagli impianti di gassificazione attualmente presenti in Alto Adige non rispetta le norme italiane che permettono il suo impiego in agricoltura (vedi capitolo 1). Ciononostante, alcune tecnologie si sono dimostrate più idonee a produrre biochar con una bassa concentrazione di inquinanti. Su tale base si è proposto di adottare un gasificatore a letto fisso, alimentato a cippato, al fine di produrre un biochar che rispetti i parametri di legge (G.U. 186 12.08.2015). Maggiori dettagli possono essere trovati nel capitolo 1 del presente libro specificatamente dedicato alla tecnologia di gassificazione migliorata.

Nell'analisi LCA, al fine di confrontare l'impatto delle tecnologie attuali con quella migliorata, si è assunto che la quantità di biochar prodotto annualmente a livello provinciale resti costante in tutti gli scenari.

La nuova tecnologia proposta nel progetto ha un'efficienza energetica leggermente maggiore (0,97 kg biomassa/kWh) rispetto alla media ponderata delle

tecnologie attualmente diffuse sul territorio (1,01 kg biomassa/kWh). Al contrario, il rapporto fra biochar e energia prodotta è circa la metà nella tecnologia attuale (11,56 kg biochar/kWh) rispetto alla media ponderata delle tecnologie utilizzate oggi (21,68 kg biochar/kWh). Quindi per la produzione della stessa quantità di biochar (unità funzionale dell'LCA), negli Scenari 3-7, la produzione energetica da gassificazione, associata alla produzione del biochar, aumenterebbe di 1,87 volte, e così anche la quantità di biomassa richiesta dalla filiera.

Quindi, a fini comparativi, si è voluto sviluppare anche un approccio in cui gli scenari che impiegano la gassificazione migliorata (Scenario 3-7) siano confrontati con gli scenari che impiegano le tecnologie di gassificazione attuali (Scenari 1 e 2) mantenendo stabile la quantità di energia prodotta piuttosto che la quantità di biochar.

2.3.6 Trasporto del biochar, ceneri e catrame agli impianti di smaltimento o nei terreni agricoli

Similmente a quanto descritto nel paragrafo relativo al trasporto della biomassa, il trasporto di biochar, ceneri e catrame agli impianti di smaltimento o nei campi agricoli, si realizza con un camion con livello di emissioni EURO5 da 16-32 tonnellate.

Una distanza di trasporto di 50 km (viaggio di solo andata) è stata ritenuta un'approssimazione ragionevole per descrivere la distanza media dei siti di smaltimento o dei campi agrari dagli impianti di gassificazione in Alto Adige. Come per il trasporto della biomassa, si è ipotizzato che il viaggio di ritorno avvenisse a vuoto e che non ci fossero perdite durante il trasporto.

La produzione di catrame dagli impianti di gassificazione è stata riportata nei questionari in litri/anno e poi trasformata in massa per i calcoli relativi al trasporto. La conversione si basa su un peso del catrame di 1,05 kg/litro (Engineering ToolBox (2020) Density of Selected Solids. Online: https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html).

2.3.7 Smaltimento dei rifiuti prodotti della gassificazione

Negli scenari in cui il biochar non è applicato nei terreni agricoli, diversi percorsi di smaltimento sono stati considerati per gli scarti della gassificazione. Sulla base dei questionari compilati dai gestori degli impianti risulta che il 33,87 % dei rifiuti venga smaltito come rifiuto non pericoloso, sotto il Codice Europeo dei Rifiuti (CER) 10 01 01, il 59,68 % come CER 10 01 03, non pericoloso anch'esso, e il 6,45 % come cenere destinata alla produzione di calcestruzzo. Si è assunto che il 90 % del biochar classificato come CER 10 01 01 e CER 10 01 03 sia incenerito e il 10 % conferito in discarica. Uno dei gestori degli impianti ha dichiarato che per un periodo ha esportato il biochar in Austria, dove poteva essere utilizzato come ammendante agricolo. Al momento però l'esportazione è stata interrotta.

Per i fattori di emissione relativi all'incenerimento e allo stoccaggio in discarica si è attinto dal database Ecoinvent. Non essendo disponibili dati per l'Italia, si sono scelte le approssimazioni più ragionevoli. Per l'incenerimento si è scelto un inceneritore comunale di ceneri da legna in Svizzera, adattando gli impatti sulla base del mix energetico italiano. Per il conferimento in discarica, l'approssimazione scelta è lo smaltimento di rifiuti inerti in una discarica in Svizzera, essendo il biochar un materiale relativamente inerte.

2.3.8 Applicazione del biochar in terreni agricoli

Uno scenario alternativo allo smaltimento del biochar è l'applicazione ai suoli delle più diffuse colture agrarie altoatesine. Questo è possibile solo nel caso in cui si impieghino le tecnologie di gassificazione migliorate proposte nel progetto Wood-Up e quindi il biochar prodotto rispetti i parametri di legge. In queste condizioni, si è assunto che il 100 % del biochar sia utilizzato come ammendante agricolo. L'impatto di questa fase della filiera è stato valutato separatamente per vigneti e meleti, in due scenari distinti. Buona parte dei dati è stata prodotta negli esperimenti di campo realizzati dall'Università di Bolzano e il Centro di Sperimentazione Laimburg in un vigneto e nei pressi di Merano (BZ) e in un meleto a Laimburg, Vadena (BZ).

In questo capitolo riportiamo i risultati per una dose di applicazione di biochar al terreno di 25 t/ha. In particolare, si è analizzato l'effetto che 25 t/ha di biochar hanno su:

- impiego di fertilizzanti di sintesi;
- ricorso all'irrigazione;
- sequestro di carbonio nel suolo;
- emissioni di gas serra dal suolo: protossido di azoto (N_2O) e metano (CH_4).

L'effetto che il biochar ha sull'impiego di fertilizzanti è stato calcolato sulla base della sua composizione chimica (N, P, K disponibili) e sulla quantità di fertilizzanti utilizzata in campi controfattuali, ossia campi nei quali il biochar non è stato distribuito e dove si implementano le pratiche agricole tipiche della provincia di Bolzano. La quantità di fertilizzanti (kg/ha) utilizzata nei terreni controfattuali è descritta nelle linee guida della provincia (AGRIOS Gruppo di lavoro per la frutticoltura integrata dell'Alto Adige HausdesApfels, 2017) e abbiamo selezionato quelle relative a campi con resa agricola media e con impianti di età superiore ai due anni.

I fattori di emissione associati ai fertilizzanti di sintesi si riferiscono a azoto, fosfati (P_2O_5) e ossido di potassio (K_2O) e sono stati calcolati con il tool BioGrace (BioGrace-I Version 4d, 2015, www.biograce.net).

Il contributo del biochar al sequestro di carbonio nel suolo è stato calcolato sulla base del contenuto di carbonio del biochar (58,9 %), le perdite causate dall'erosione per mezzo di vento e pioggia (28 %, (Major, 2010)) e il suo tasso di degradazione (0,002 %/anno (Wang, Xiong, & Kuzyakov, 2016)). Il tasso di decomposizione è stato applicato su un periodo di 100 anni. L'insieme di questi fattori ha permesso di valutare lo stoccaggio di carbonio nel suolo ottenuto con l'applicazione di una tonnellata di biochar ai terreni agricoli e conseguentemente con l'utilizzo di tutto il biochar prodotto a livello Provinciale.

La valutazione degli effetti del biochar sulle emissioni di gas serra (N_2O e CH_4) dal suolo si basa sulle misure di campo realizzate dall'Università di Bolzano nell'ambito del progetto Wood-Up e si riferiscono, per quanto riguarda i vigneti a parcelle ammendate con 25 t/ha di biochar, mentre per i meleti a parcelle ammendate da 25 t/ha di biochar miscelato a 45 t/ha di compost. In tutti gli altri processi dell'LCA l'impatto del compost non è stato quantificato, poiché considerato al fuori dei confini del sistema. L'impatto che il biochar ha sul ciclo del carbonio nel suolo è stato descritto attraverso i dati relativi alla sua degradazione e dalle emissioni di CO_2 ad essa associate. Si sono ritenute inin-

fluenti le emissioni di anidride carbonica derivanti da un surplus di decomposizione della sostanza organica del suolo, causato dal biochar stesso, il cosiddetto effetto “priming”, riportato in precedenti lavori (Ventura et al., 2015).

Gli impatti del biochar sulle emissioni di gas serra del suolo (kg/ha/anno) sono stati calcolati sulla base del confronto con campi controfattuali. Nel vigneto, in media, si è osservato un aumento del 6,81 % delle emissioni di N_2O e una riduzione del 10,7 % delle emissioni di CH_4 , nei due anni e mezzo di esperimento rispetto a campi non ammendati con biochar. Nel meleto, dove 25 t/ha di biochar sono state ammendate insieme a 45 t/ha di compost, l’aumento delle emissioni di N_2O è stato in media del 74,84 % mentre le emissioni di CH_4 sono diminuite in media del 13,4 %. Come detto in precedenza, le emissioni di gas serra dal suolo rappresentano l’unica voce dell’LCA che includa l’effetto del compost, poiché non è stato possibile, nelle misure svolte direttamente in campo, distinguere la frazione dei gas serra derivante dall’applicazione del biochar e quella derivante dal compost.

Al fine di esprimere i dati delle emissioni di N_2O e CH_4 come CO_{2eq} , si è utilizzato il potenziale di riscaldamento globale dei due gas (265 e 28 $kgCO_{2eq}$, rispettivamente, (IPCC, 2014)).

Infine, l’LCA valuta gli impatti del biochar sui bisogni irrigui dei campi, in termini di emissioni e consumi energetici associati a questo processo. Il tipo di irrigazione più utilizzato in Alto Adige è l’irrigazione a goccia. Le emissioni e i consumi energetici di questa pratica sono stati stimati sulla base dei consumi elettrici delle pompe idriche, mentre nei calcoli non è stato incluso l’impatto della fabbricazione delle infrastrutture irrigue, poiché al di fuori dei confini del sistema. L’impatto del biochar è stato quantificato sulla base dei consumi idrici medi in Alto Adige: circa 1.500 $m^3/ha/anno$ per i vigneti (Centro di consulenza per la fruttivicoltura Dell’Alto Adige, 2019) e 3.000 $m^3/ha/anno$ per i meleti (AGRIOS Gruppo di lavoro per la frutticoltura integrata dell’Alto Adige HausdesApfels, 2017). I consumi energetici dovuti all’irrigazione sono stati stimati essere 428,57 kWh/ha/anno per i vigneti e 1.142,86 kWh/ha/anno per i meleti. La riduzione dei bisogni irrigui conseguente all’applicazione del biochar è stata stimata essere pari al 20 %, sulla base di dati di letteratura

(Baronti et al., 2014; Hardie et al., 2014; Mukherjee & Lal, 2013; Piccolo et al., 1996; Uzoma et al., 2011)

2.3.9 Sostituzione di energia/materiali attraverso la gassificazione e smaltimento rifiuti

L'LCA include anche il calcolo delle emissioni evitate e dei consumi energetici evitati grazie alla produzione di energia da gassificazione e all'utilizzo di cenere per la produzione del calcestruzzo. È stato assunto che il biochar non sia valorizzato a fini energetici se conferito in discarica o incenerito.

Si è assunto che l'elettricità prodotta con la gassificazione (tecnologia attuale o migliorata) sia immessa nella rete elettrica nazionale. I fattori di emissione dell'elettricità, sostituita grazie alla gassificazione, sono stati calcolati sulla base dei processi di Ecoinvent relativi alla produzione di energia elettrica a medio voltaggio in Italia.

Al contrario, si è assunto che l'energia termica prodotta sia utilizzata a livello locale, nella provincia di Bolzano, e che questa vada a sostituire energia termica prodotta per il 53 % con gas naturale; 23,56 % con biomassa (tondame, cippato, pellet); 12,54 % con teleriscaldamento da biomassa legnosa; 9 % con gasolio; 1,9 % con solare termico (Battiston, 2014).

Per calcolare i fattori di emissione delle varie fonti energetiche, i processi più rappresentativi sono stati selezionati su Ecoinvent. Per il gas naturale, la biomassa, il solare termico e il gasolio le approssimazioni più accettabili sono state considerate quelle della Svizzera. Per il teleriscaldamento a biomassa i dati sono relativi a un impianto di cogenerazione italiano. Per le biomasse legnose le emissioni di carbonio biogenico sono state eliminate dal processo per rispettare l'assunto di gassificazione "a emissioni zero".

Infine, il risparmio di cemento per la produzione di calcestruzzo, grazie all'impiego della cenere da gassificazione, è stato stimato utilizzando i fattori di emissione di un generico processo di produzione di cemento in Ecoinvent, non relativo al contesto locale. Si è assunto che tutta la cenere prodotta dalla gassificazione sia stata destinata alla produzione del calcestruzzo e non sia stata incenerita o conferita in discarica.

3. Risultati e Discussione

Di seguito riportiamo i risultati dell'analisi LCA per i sette scenari presentati nella sezione 2.1. I risultati sono relativi a tutta la provincia, ossia si riportano le emissioni di gas serra e il consumo di fonti energetiche fossili della produzione, smaltimento/utilizzo in agricoltura delle circa 1.250 tonnellate di biochar prodotte ogni anno in Alto Adige.

3.1 Scenario 1 – Scenario attuale

Questo scenario rappresenta una stima degli impatti della filiera della gassificazione attualmente presente in Alto Adige ed include le tecnologie di gassificazione in uso al momento e il conferimento del biochar, ceneri e catrame in discarica. Lo scenario non prevede l'estrazione di olii essenziali e l'impiego del biochar come ammendante agricolo. Gli impatti associati allo scenario 1 sono pari a -4.220,19 t di petrolio equivalente in termini di consumo di energie fossili e -12.696,04 t di CO₂eq in termini di cambiamento climatico. Il dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera è presentato nella Fig. 2.

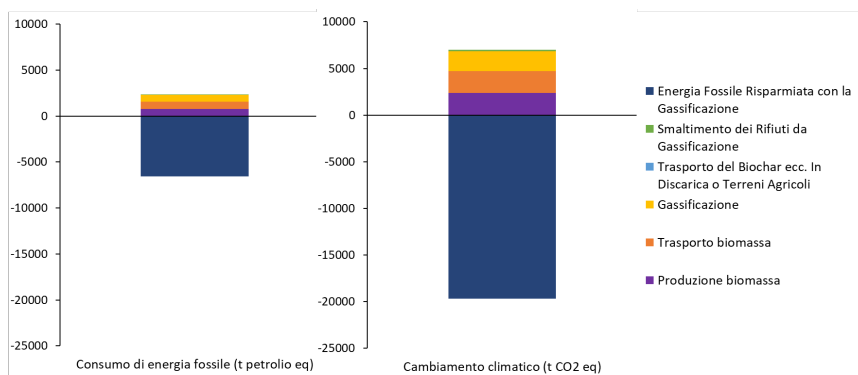


Fig. 2 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 1

I bilanci netti negativi, per entrambe le categorie di impatto, indicano che la filiera attualmente presente in Alto Adige ha un impatto ambientale favorevole. Questo risultato è dovuto alla produzione di energia rinnovabile considerata ad emissioni zero, attraverso la gassificazione (unica voce al di sotto

dello zero, Fig. 2), energia che va a sostituire quella prodotta con l'impiego di fonti fossili, a più alto impatto ambientale. Nel grafico, i valori al di sopra dello zero indicano invece i consumi di energia fossile e le emissioni di gas serra associate alla produzione della biomassa, alle operazioni di trasporto e alle emissioni dirette del processo di gassificazione stesso (cippatura della biomassa, e funzionamento degli impianti).

3.2 Scenario 2 – Scenario attuale + Estrazione di composti di elevato valore

Questo scenario prevede le stesse impostazioni dello Scenario 1, ma include l'estrazione di olii essenziali dalla biomassa prima della gassificazione. Dal confronto di questo scenario con lo scenario 1 è possibile isolare l'impatto del processo di estrazione. Gli impatti a livello provinciale, ipotizzando l'estrazione di olii essenziali dal 100% della biomassa utilizzata, sono: -2.018 t di petrolio equivalente e -5.572,34 t di CO₂eq. Il dettaglio degli impatti dello Scenario 2 è presentato nella Fig. 3.

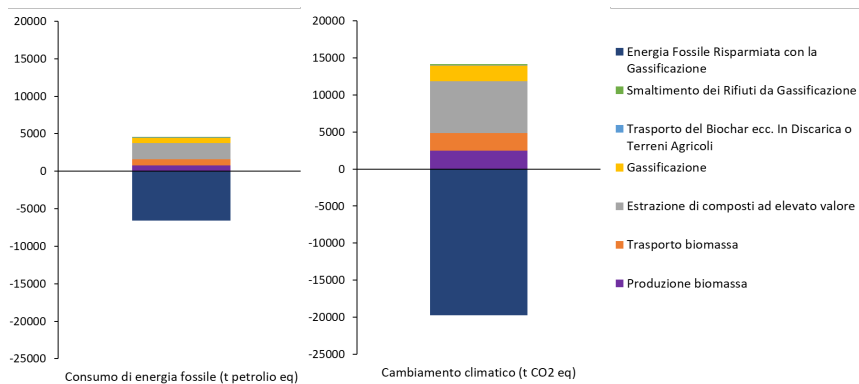


Fig. 3 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 2

L'aggiunta del processo di estrazione aumenta considerevolmente il consumo di energia fossile e l'impatto sul cambiamento climatico della filiera, dimezzando il bilancio netto negativo rispetto allo scenario 1. L'estrazione di olii essenziali provoca infatti un consumo di 2.167,85 t di petrolio equivalente e

l'emissione di 7.019,7 t di CO₂eq. Il bilancio netto della filiera resta comunque al di sotto dello zero per entrambe le categorie di impatto.

Questi dati si riferiscono a un mix di impiego delle due tecnologie di estrazione così distribuito: 52 % estrazione Soxhlet (SOX) e 48 % l'estrazione con CO₂ supercritica (SFE). In queste proporzioni l'estrazione SFE presenta di gran lunga i maggiori impatti con 1.358,43 t di petrolio equivalente e 4.398,73 t di CO₂eq rispetto alla SOX (610,55 t di petrolio equivalente e 1.977,03 t di CO₂eq). Poiché i costi di investimento sono estremamente minori per l'estrazione SOX rispetto all'estrazione SFE, è altamente probabile che la prima si diffonda in misura maggiore. Nel caso ipotetico di uso esclusivo della SOX (100 %), l'impatto della filiera migliorerebbe del 35,5 % per il consumo di energia fossile e del 41,3 % per le emissioni di gas serra.

3.3 Scenario 3 – Scenario attuale + Gassificazione migliorata

Nel presente scenario, le impostazioni sono le stesse dello Scenario 1, ma la gassificazione impiega la tecnologia migliorata proposta da UNIBZ nell'ambito del progetto Wood-Up, permettendo un confronto fra gli impatti delle tecnologie attuali e di quelle migliorate. Lo scenario non include il processo di estrazione di olii essenziali dalla biomassa e l'applicazione del biochar ai suoli agricoli. Gli impatti associati a 1.250 t di biochar in questo scenario sono: - 14.028,80 t di petrolio equivalente e -41.595,68 t di CO₂eq. Il dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera è presentato nella Fig. 4.

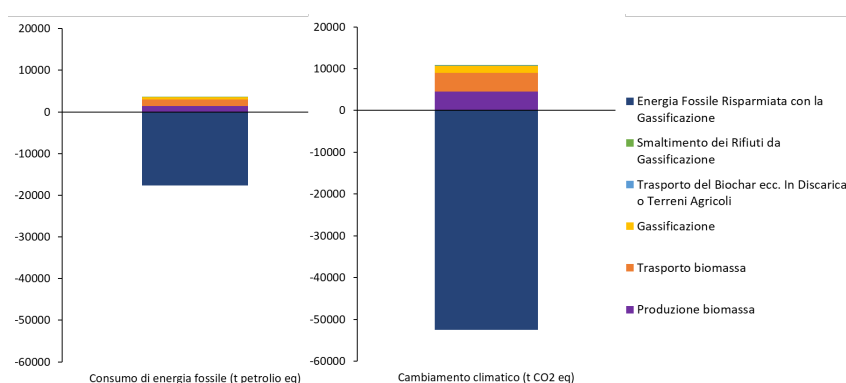


Fig. 4 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 3

I risultati mostrano che la tecnologia migliorata risulta avere un impatto netto 3,3 volte migliore rispetto al mix delle tecnologie attualmente utilizzate in Alto Adige (scenario 1). Questo è dovuto principalmente a un minore rapporto biochar/energia prodotti da parte della nuova tecnologia di gassificazione. Per questo motivo, a parità di biochar prodotto (1.250 t/anno, unità funzionale dell’LCA), la generazione di energia rinnovabile è considerevolmente più alta. Conseguentemente la voce “Energia fossile risparmiata con la gassificazione” è maggiore nello Scenario 3 (-17.669,09 t di petrolio equivalente e -52.458,81 t di CO₂eq) rispetto allo scenario 1 (-6.554,09 t di petrolio equivalente e -19.700,04 t di CO₂eq).

3.4 Scenario 4 – Gassificazione migliorata + Estrazione di composti di elevato valore

Questo scenario include l’impiego di tecnologie di gassificazione migliorata e l’estrazione di composti ad elevato valore dalla biomassa. Gli impatti associati a 1.250 t di biochar sono: -9.795,95 t di petrolio equivalente e -27.914,24 t di CO₂eq. Il dettaglio degli impatti dello Scenario 4 è presentato nella Fig. 5.

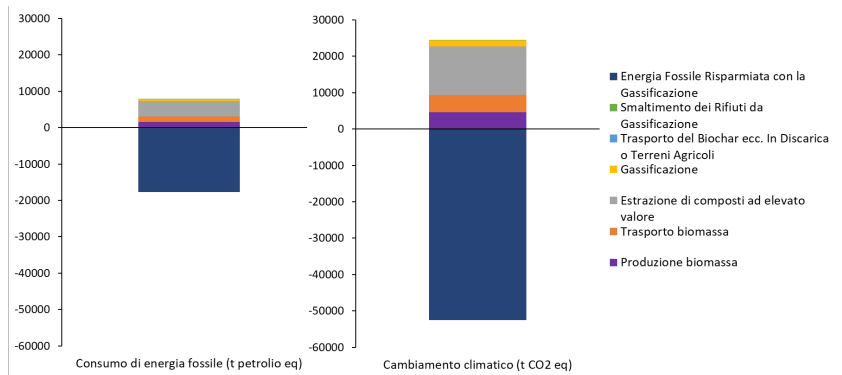


Fig. 5 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 4

Come nel caso dello Scenario 2 rispetto allo Scenario 1, l’aggiunta della fase di estrazione degli olii essenziali dalla biomassa nello Scenario 4 aumenta gli impatti della filiera rispetto allo scenario con sola gassificazione migliorata (Scenario 3).

In questo caso però, l'impatto dell'estrazione è circa il doppio di quello quantificato nello Scenario 2 poiché la nuova tecnologia di gassificazione, per produrre la stessa quantità di biochar, richiede un maggiore quantitativo di biomassa. Questo maggiore quantitativo di biomassa sarà destinato anche all'estrazione di olii essenziali. Nonostante i consumi energetici legati all'estrazione, il bilancio netto della filiera è ampiamente al di sotto dello zero ed è più negativo di quello dello Scenario 2 per la maggiore sostituzione di energia fossile da parte del nuovo processo di gassificazione.

3.5 Scenario 5 – Gassificazione migliorata + Applicazione del biochar nei campi agricoli (vigneto)

Questo scenario presenta le stesse impostazioni dello Scenario 3 ma prevede l'impiego del biochar come ammendante agricolo nei vigneti piuttosto che il suo conferimento in discarica o inceneritore. Grazie a questo scenario, si possono valutare gli impatti dell'utilizzo del biochar nel settore agricolo, rispetto alle pratiche attuali di smaltimento, ipotizzando una dose di applicazione di 25 t/ha. Gli impatti associati a 1250 t di biochar per lo Scenario 5 sono: -14.116,28 t di petrolio equivalente e -42.888 t di CO₂eq. Il dettaglio degli impatti è presentato nella Fig. 6.

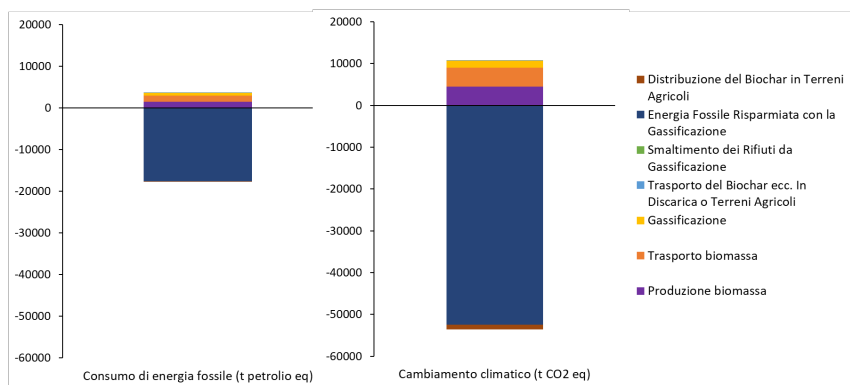


Fig. 6 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 5

Questo scenario è basato sui dati delle tecnologie di gassificazione migliorata poiché questo avanzamento tecnologico ha avuto lo scopo di produrre un biochar idoneo all'impiego in agricoltura. I risultati possono essere confrontati con lo Scenario 6 per misurare le differenze di impatto fra l'applicazione nei vigneti e nei meleti.

I risultati dimostrano che l'applicazione del biochar ha impatti favorevoli per l'ambiente: -42,33 t di petrolio equivalente e -1.158,203 t di CO₂eq. Questi benefici ambientali derivano in larga parte dal sequestro di carbonio nel suolo e, in minor misura, dall'evitato utilizzo di fertilizzanti di sintesi. La minore necessità di irrigazione nei campi ammendati rispetto ai terreni controfattuali e, in parte, l'impatto sulle emissioni di gas serra, contribuiscono alla riduzione delle emissioni, ma in maniera trascurabile rispetto al bilancio complessivo dello scenario in considerazione. Nel complesso, anche il bilancio di emissioni negative dello Scenario 5 è principalmente attribuibile alla sostituzione di energia fossile attraverso l'energia rinnovabile prodotta con la gassificazione (-17.669,09 t di petrolio equivalente e -52.458,81 t di CO₂eq).

3.6 Scenario 6 – Gassificazione migliorata + Applicazione del biochar nei campi agricoli (meleto)

Per lo Scenario 6, sono state utilizzate le stesse impostazioni dello Scenario 5 ma si assume che il biochar sia stato distribuito nei meleti invece che nei vigneti altoatesini. Questo scenario facilita il confronto fra gli impatti/benefici dell'applicazione del biochar in diversi tipi di terreni agricoli. La dose distribuita è di 25 t/ha di biochar e 45 t/ha di compost, ma si deve ricordare che gli impatti del compost non sono parte della presente analisi LCA, se non per le emissioni di gas serra dal suolo. Gli impatti associati a 1.250 t di biochar risultano essere -14.178 t di petrolio equivalente e -42.885,7 t di CO₂eq. Il dettaglio degli impatti dello Scenario 6 è presentato nella Fig. 7.

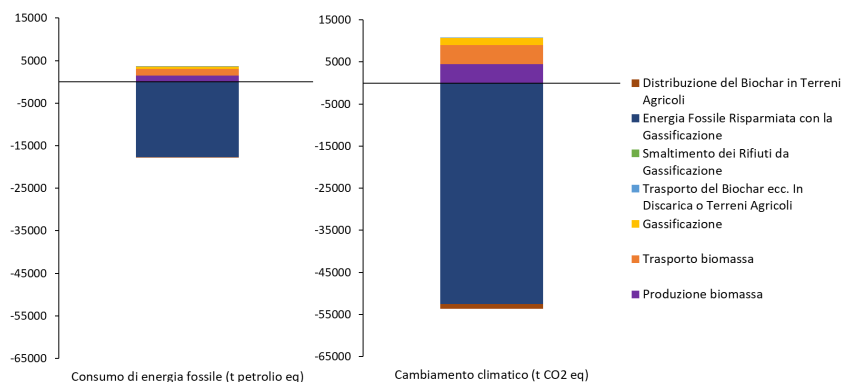


Fig. 7 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 6

Il presente scenario è quello che presenta i minori impatti a livello di filiera fra quelli esaminati. I risultati sono leggermente più favorevoli, in termini di consumo di energia fossile, rispetto a quelli della filiera in vigneto e questo è dovuto a un maggiore impatto positivo dell'applicazione del biochar in agricoltura (-104,05 t di petrolio equivalente). Questa differenza è dovuta al fatto che nei meleti controfattuali si impiega un maggiore quantitativo di acqua rispetto ai vigneti (circa 4 milioni l/ha/anno e 1,5 milioni l/ha/anno rispettivamente) (AGRIOS Gruppo di lavoro per la frutticoltura integrata dell'Alto Adige HausdesApfels, 2017; Centro di consulenza per la fruttivitticoltura Dell'Alto Adige, 2019) e quindi nei meleti si è osservato un maggiore risparmio energetico, associato all'irrigazione a goccia, rispetto ai vigneti (Comunicazione personale Martin Thalheimer, Laimburg Research Center).

L'impatto sulle emissioni di gas serra, invece, è leggermente peggiore (+2,3 t di CO₂eq) in questo scenario rispetto allo Scenario 5 poiché l'applicazione del biochar insieme al compost, ha causato un maggiore impatto, rispetto ai terreni controfattuali, sulle emissioni di gas serra dei suoli (N₂O: +6,81 % in vigneto e +74,84 % in meleto; CH₄: -10,7 % in vigneto e -13,4 % in meleto). Tali differenze sono da attribuire al fatto che nel meleto il biochar è stato applicato in combinazione con il compost. Le altre voci di emissione, relative ai processi agricoli, sono uguali per gli Scenari 5 e 6, dato che il compost non entra nei confini del sistema analizzato, se non per la voce relativa alle emissioni di gas serra dal suolo.

3.7 Scenario 7 – Gassificazione migliorata + Estrazione di composti di elevato valore + Applicazione del biochar nei campi agricoli (vigneto)

L'ultimo scenario presenta le stesse impostazioni dello Scenario 5 ma include anche l'estrazione di olii essenziali dalla biomassa, prima della gassificazione. Gli impatti associati a questo scenario sono: -9.883,43 t di petrolio equivalente e -29.206,56 t di CO₂eq. Il dettaglio degli impatti dello Scenario 7 è presentato nella Fig. 8.

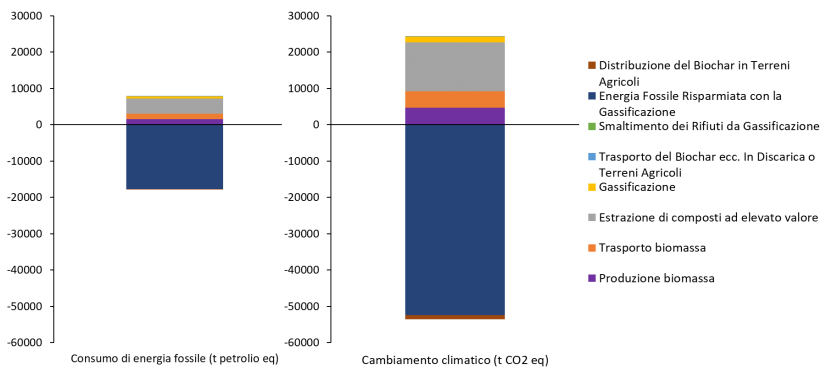


Fig. 8 – Dettaglio degli impatti di ogni fase della filiera dello Scenario 7

Questo scenario presenta gli impatti della filiera proposta al completo: estrazione di olii essenziali prima della gassificazione, gassificazione con tecnologie migliorate e applicazione del biochar nei terreni agricoli (vigneto). I risultati dimostrano che l'estrazione degli olii essenziali provoca maggiori impatti (4.128,58 t di petrolio equivalente e 13.368,73 t di CO₂eq) di quanto l'applicazione del biochar nei terreni agricoli possa compensare (-42,33 t di petrolio equivalente e -1.158,03 t di CO₂eq), portando quindi ad un bilancio netto meno favorevole rispetto allo Scenario 3, in cui si verificano gli impatti di una filiera con la sola applicazione di tecnologie di gassificazione migliorate.

Il bilancio dello Scenario 7 resta comunque ampiamente al di sotto dello zero. Risultati ancora migliori si ottengono se, invece del mix delle due tecnologie di estrazione (SOX e SFE), si opta solo per il metodo di estrazione più efficiente e meno costoso (SOX) che porta a un bilancio netto complessivo di -11.391,13 t

di petrolio equivalente e -34.089,68 t di CO₂eq. Inoltre, se il biochar fosse applicato in meleto invece che in vigneto, si osserverebbe un bilancio netto complessivo leggermente diverso (-61.71 t di petrolio equivalente e +2.30 t di CO₂eq).

3.8 Confronto fra scenari

I sette scenari sono messi a confronto nella Fig. 9.

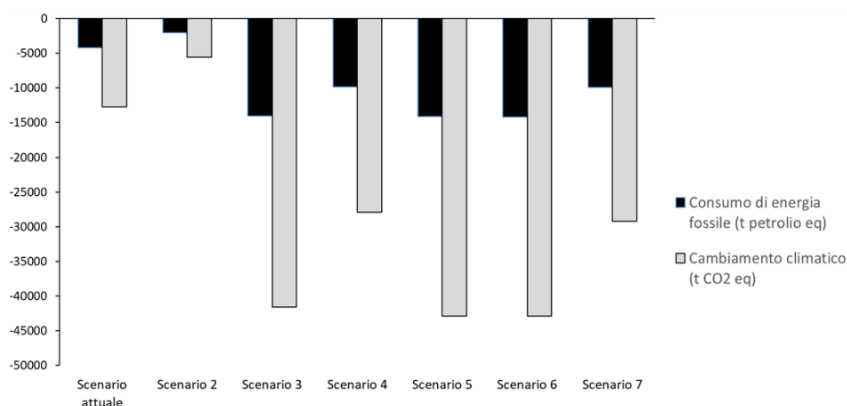


Fig. 9 – Confronto dei risultati dei 7 scenari analizzati nel presente lavoro

Questo grafico dimostra che gli impatti della filiera, associati a circa 1.250 t di biochar, sono favorevoli da un punto di vista ambientale (bilancio netto minore di zero) per tutti gli scenari analizzati. Inoltre, non si sono osservati *trade-off* fra le due categorie di impatto, ossia a minori consumi energetici fossili corrispondono sempre minori impatti in termini di cambiamento climatico.

I fattori determinanti per questo risultato favorevole sono la sostituzione di energia fossile, grazie alla gassificazione, e l'applicazione del biochar nei terreni agricoli. Le emissioni invece derivano principalmente dall'estrazione di olii essenziali, a causa dell'alto consumo elettrico, seguiti dalla produzione e trasporto della biomassa e le emissioni derivanti dal processo di gassificazione, diverse dalle emissioni biogeniche, ossia le emissioni legate alla cippatura della biomassa, e al funzionamento degli impianti.

Lo scenario con minori impatti positivi a livello ambientale è lo Scenario 2 (gassificazione attuale + estrazione di olii essenziali). Bisogna però notare che gli impatti associati a questo processo non sono stati confrontati con metodi alternativi di produzione di olii essenziali, poiché, così facendo, l'analisi sarebbe uscita dai confini del sistema. Inoltre, bisogna ricordare che l'impatto dell'estrazione si riduce molto se, invece di impiegare entrambe le tecnologie analizzate, si optasse solo per il metodo di estrazione più efficiente e meno costoso (SOX).

L'analisi LCA ha anche dimostrato che l'impatto del trasporto del biochar, ceneri e catrami ai luoghi di smaltimento o ai campi agricoli e i processi di smaltimento di questi materiali hanno impatti trascurabili in tutti gli scenari. Il bilancio netto degli scenari cambia se, invece di assumere che la produzione di biochar resti stabile, assumiamo che la produzione energetica degli impianti resti costante (Fig. 10). Questa analisi è stata realizzata poiché, dato che la tecnologia migliorata proposta dal progetto Wood-Up ha un rapporto biochar/energia prodotta minore rispetto alla media delle tecnologie attualmente presenti in Alto Adige, gli Scenari 3-7 per produrre la stessa quantità di biochar attuale, a livello Provinciale, richiederebbero una quantità doppia di biomassa, risultando in una maggiore produzione energetica (quasi il doppio) rispetto agli Scenari 1 e 2 (Figura 9). Questo confronto fra scenari, anche se corretto, delinea una situazione molto diversa da quella attuale, con implicazioni complesse, che richiederebbe il supporto di scelte politiche incisive.

Nella Fig. 10 quindi presentiamo il confronto fra scenari nel caso in cui l'impiego delle nuove tecnologie migliorate non comporti un'aumentata produzione energetica. Agli Scenari 3-7 si è quindi applicato lo stesso rapporto biochar/energia prodotta degli Scenari 1 e 2.

Anche se normalizzati per la produzione di energia, gli scenari proposti hanno comunque un bilancio netto negativo, e quindi un impatto ambientale favorevole, e i vantaggi della nuova tecnologia di gassificazione, in grado di produrre biochar idoneo all'agricoltura, restano evidenti (Scenari 3-7) anche se meno marcati rispetto a quanto presentato in precedenza (Fig. 9).

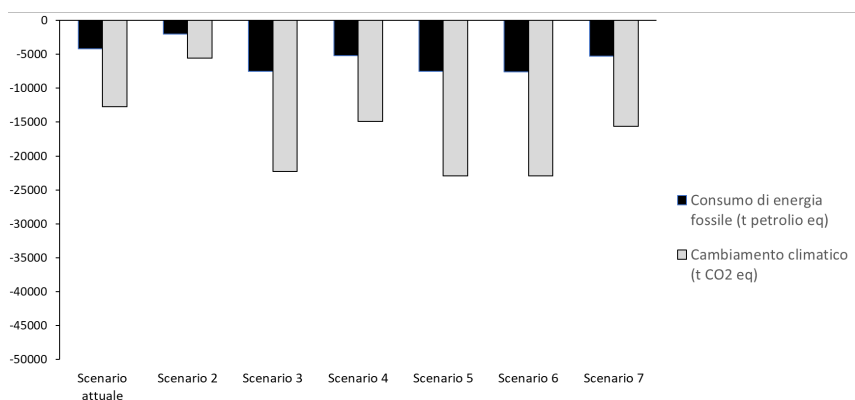


Fig. 10 – Confronto dei risultati dei 7 scenari analizzati nel presente lavoro con l'assunzione che la produzione energetica degli impianti di gassificazione resti costante

3.9 Analisi di sensibilità

Uno strumento utile per esplorare quali siano i processi che impattano in maniera determinante sui risultati dell'LCA, in maniera positiva o negativa, è l'analisi di sensibilità, un procedimento nel quale gli input dell'LCA vengono alterati al fine di valutarne gli impatti corrispondenti. Inoltre, questo approccio permette di valutare l'influenza delle assunzioni che sottostanno all'LCA e le incertezze ad esse legate, fornendo una valutazione dell'accuratezza delle stime. Dato che l'LCA è basata su un mix di dati prodotti nell'ambito del progetto e dati desunti sia dal database Ecoinvent che dalla letteratura, è necessario valutare l'influenza che le assunzioni alla base della scelta di questi dati hanno sugli impatti.

Un'analisi di sensibilità è stata eseguita sulla distanza del trasporto della biomassa dato che, una parte considerevole di questa, viene importata dall'estero, comportando importanti emissioni. Se, ad esempio, ipotizziamo che nello Scenario 1, quello attuale, tutta la biomassa venga importata dalla Polonia (distanza: 2.400 km, viaggio di andata e ritorno) e non dall' Alto Adige (150 km distanza, viaggio di andata e ritorno), Austria e Slovenia (800 km distanza, viaggio di andata e ritorno), allora l'impatto della fase di trasporto passerebbe da 809,64 t petrolio equivalente e 2.353,9 t di CO₂ equivalente a 7.512,39 t di petrolio equivalente e 21.059,43 t di CO₂eq, rispettivamente. Di conseguenza, il bilancio netto della filiera passerebbe da -4.220,19 t di petrolio

equivalente e -12.696,04 t di CO₂eq a 2.484,68 t di petrolio equivalente e 6.015,89 t di CO₂eq, risultando quindi in una filiera ad emissioni maggiori di zero. Questo dimostra che il trasporto della biomassa è un fattore importante da considerare quando si valuta la sostenibilità della filiera del biochar in Alto Adige e che, approvvigionarsi da fonti locali di biomassa, può migliorare ampiamente il bilancio netto. Ulteriori miglioramenti potrebbero essere raggiunti utilizzando veicoli più efficienti o alimentati a biocarburanti, nel caso di trasporto su gomma (Anderson & Mitchell 2016; Conti 2003; Homagain et al., 2016).

L'impatto del trasporto della biomassa è un esempio di come i risultati dell'LCA siano sensibili alle assunzioni che sottostanno a questo processo. I calcoli attuali utilizzano delle stime rappresentative delle distanze medie che possono essere percorse se l'origine della biomassa è in Alto Adige, Austria, Slovenia o Polonia e si assume che tutti i camion compiano un viaggio di ritorno a vuoto. Modificare questi assunti può alterare considerevolmente gli impatti del processo di trasporto. In ogni caso gli assunti forniscono delle stime di impatto conservative, dato che è probabile che almeno una parte dei camion provenienti dall'estero trasportino un altro carico, nel viaggio di ritorno.

Oltre al trasporto della biomassa, la voce maggiore di consumo netto di energia fossile e di emissioni climalteranti è il processo di estrazione di composti ad alto valore dalla biomassa legnosa. Come detto in precedenza, i calcoli per questo processo sono stati basati su dati di laboratorio, adattati alla scala industriale. Tuttavia l'incertezza associata a questo tipo di up-scaling può essere considerevole e influenzare i risultati finali dell'LCA, quindi sarebbe auspicabile utilizzare dati validati a livello industriale per una descrizione più accurata e realistica degli impatti dell'estrazione, tanto più che questi sono calcolati per tutta la biomassa necessaria alla produzione dell'unità funzionale (per ogni tonnellata di biochar prodotto, sono necessarie 34,62 t di biomassa per l'estrazione Soxhlet e 34,52 t per l'estrazione SFE) e quindi eventuali inesattezze vengono amplificate dall'analisi LCA. In ogni caso, è improbabile che una maggiore accuratezza per l'estrazione porti ad un bilancio netto signifi-

cativamente diverso, negli scenari che includono questa fase, tenuto in considerazione l'impatto molto maggiore che ha la gassificazione, in termini di emissioni evitate.

Il più grande contributo al bilancio netto della filiera è dato dalla sostituzione dell'energia elettrica (mix italiano) e termica (all'interno dell'Alto Adige: gas naturale, altre fonti di biomassa, solare e gasolio) con la bioenergia ottenuta dalla gassificazione della biomassa legnosa. Le assunzioni alla base dei processi di gassificazione potrebbero influenzare significativamente l'impatto complessivo dell'analisi LCA.

Il contributo considerevole della gassificazione al bilancio netto dell'LCA è il risultato dell'assunzione che la gassificazione del legno sia una tecnologia ad emissioni zero, cioè che le emissioni biogeniche di CO₂ derivanti dalla gassificazione del legno siano compensate dalla quantità di CO₂ rimossa dall'atmosfera durante la crescita della biomassa stessa. Questo assunto fa sì che le emissioni associate ad 1 m³ di syngas siano 0,006 kg di CO₂eq mentre, se contabilizzassimo le emissioni biogeniche di CO₂ derivanti dalla biomassa gassificata, le emissioni associate a un m³ di syngas salirebbero a 0,378 kg di CO₂eq. Questo assunto, determinante per il bilancio netto dell'LCA, è in linea con le regolamentazioni europee che fissano gli obiettivi dell'Unione per l'energia rinnovabile (European Commission, 2019; European Parliament and Council, 2018). Se anche si decidesse di includere nell'analisi una parte delle emissioni biogeniche di CO₂, la sostituzione di fonti energetiche fossili, ad alto impatto ambientale, darebbe comunque un bilancio netto favorevole.

4. Prospettive

Dall'analisi LCA svolta, si deduce che l'impiego della gassificazione come fonte energetica, è una strategia vincente per contribuire alla mitigazione dei cambiamenti climatici, sia che si impieghino le tecnologie attualmente distribuite sul territorio, sia che si ricorra a una nuova tecnologia "migliorata", così come suggerito dal progetto Wood-Up. L'impiego della nuova tecnologia permetterebbe da una parte una maggiore produzione di energia rinnovabile e, dall'altra, la produzione di un biochar idoneo all'impiego in agricoltura. L'applicazione del biochar nei suoli agricoli altoatesini comporterebbe un ulteriore beneficio ambientale, principalmente dovuto allo stoccaggio di carbonio nei suoli. Tuttavia l'impatto della componente agricola della filiera risulta nettamente minore rispetto all'impatto dei processi energetici.

D'altra parte, l'applicazione di 1.250 t di biochar all'anno, permetterebbe di assorbire circa 1.150 t di CO₂ equivalente, compensando le emissioni annue pro-capite di 250 cittadini altoatesini (Battiston, 2014).

Se la trasformazione tecnologica degli impianti permettesse la produzione dello stesso quantitativo di biochar, ma con caratteristiche idonee all'uso in agricoltura, e assumendo una dose di 25 t/ha, allora gli ettari che potrebbero essere ammendati ogni anno sarebbero solo 50. Considerando che gli ettari di vigneto in Alto Adige sono 5.500 e gli ettari di meleto 19.000 (Della Chiesa et al., 2019), per distribuire il biochar anche solo nella totalità dei meleti ci vorrebbero 110 anni.

Se l'applicazione del biochar da parte delle aziende agricole confermasse gli impatti positivi mostrati nel progetto Wood-Up, è immaginabile un incremento della domanda di biochar nel breve termine che dovrebbe essere importato, nell'attesa che impianti di nuova generazione siano installati in Alto Adige. D'altra parte, se il mercato del biochar crescesse in maniera importante, potrebbero diffondersi sul territorio anche impianti di produzione di biochar come prodotto primario, e non come sottoprodotto di una generazione energetica.

Non si può sottovalutare che la diffusione di impianti di gassificazione basati sulla nuova tecnologia causerebbe una maggiore richiesta di biomassa legnosa e una maggiore produzione energetica rispetto allo scenario attuale. Secondo

i risultati di questo lavoro, la richiesta di biomassa raddoppierebbe, incremento che comporterebbe un riassetto del mix energetico locale.

D'altra parte, eventi estremi, quali la tempesta *Vaia* nel 2018 e le precipitazioni nevose estreme nel 2019, hanno reso disponibile un quantitativo enorme di biomassa legnosa in Alto Adige, tale da provocare un crollo del prezzo del legname e difficoltà di stoccaggio e gestione di tali volumi. I modelli climatici fanno prevedere una maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi (Se-neviratne et al., 2012) e quindi la necessità di trovare sbocco per la biomassa legnosa. Inoltre, l'approvvigionamento locale della biomassa permetterebbe di migliorare ulteriormente il bilancio netto della filiera studiata nel progetto Wood-Up, come suggerito dalle analisi di sensibilità.

Per quanto riguarda l'estrazione di olii essenziali dalla biomassa prima della gassificazione, l'LCA ha messo in evidenza gli alti consumi energetici di questo processo. D'altra parte, qualsiasi processo di produzione di olii essenziali ha un costo energetico, e l'estrazione proposta nel progetto Wood-Up ha il vantaggio di essere inserita all'interno di una filiera virtuosa, che propone una forma di riciclo della biomassa. Inoltre, i gestori che estraessero questi composti prima della gassificazione, ne trarrebbero vantaggi economici e occupazionali, tema che meriterebbe un maggiore approfondimento.

Nel complesso, la filiera proposta della gassificazione attuale, e ancora di più quella basata sulle tecnologie migliorate, permette all'Alto Adige di allinearsi alle politiche climatiche europee. Infatti, la Commissione Europea ha fissato obiettivi di produzione energetica da fonti rinnovabili per il 2030 e il 2050 al fine di raggiungere l'obiettivo più generale di "emissioni zero" per l'Unione Europea entro il 2050, e il Green Deal delinea la strategia per raggiungere tali obiettivi attraverso una crescita economica basata su un minore sfruttamento delle risorse naturali e un minore impatto sulla salute (European Commission, 2019).

5. Conclusioni

Lo scopo dell'analisi LCA sviluppata per il progetto Wood-Up è di valutare gli impatti della filiera della gassificazione del legno in Alto Adige e di confrontarla con una filiera valorizzata che include l'estrazione di composti ad elevato valore dalla biomassa, tecnologie di gassificazione migliorate e l'applicazione del biochar nei terreni agricoli.

Nonostante sussistano delle incertezze sui dati inclusi nell'inventario e sulle assunzioni alla base dell'analisi, l'LCA dimostra che la filiera alto-atesina della gassificazione del legno, che al momento produce 1.250 t di biochar all'anno, ha impatti positivi da un punto di vista ambientale, risultando in un risparmio di energia fossile e in emissioni di gas serra negative, rispetto a filiere controfattuali.

Il risultato deriva principalmente dalla sostituzione di fonti fossili grazie all'energia prodotta dalla gassificazione del legno. Ulteriori emissioni negative risultano dall'applicazione del biochar in agricoltura, ma in maniera assai meno rilevante. La maggior parte delle emissioni positive deriva dall'estrazione di olii essenziali dalla biomassa, seguito da, in circa egual proporzione, la produzione e il trasporto della biomassa legnosa e il funzionamento degli impianti di gassificazione.

La quantità di biochar prodotta annualmente a livello provinciale, se fosse idonea all'impiego in agricoltura, sarebbe sufficiente alla copertura di una superficie agricola molto ridotta (50 ha). Per sostenere un impiego diffuso del biochar in agricoltura sarebbe quindi necessario aumentare il numero di impianti di gassificazione o importare il biochar stesso.

D'altra parte le tecnologie migliorate proposte provocherebbero, a parità di biochar prodotto, una produzione quasi doppia di energia, richiedendo un aumento considerevole della biomassa impiegata per la gassificazione.

L'implementazione di questi scenari, se ritenuti di interesse, può risultare complessa e necessita di una pianificazione e un sostegno politico a livello provinciale.

Bibliografia

- Anderson, N.& Mitchell, D. (2016). Forest Operations and Woody Biomass Logistics to Improve Efficiency, Value, and Sustainability. *Bioenergy Research*, 9(2), pp. 518-533. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9735-1>
- AGRIOS Gruppo di lavoro per la frutticoltura integrata dell'Alto Adige Haus des Apfels. (2017). *Direttive per la frutticoltura integrata* (27a ed.). Terlan: AGRIOS.
- Baronti, S. et al. (2014). Impact of biochar application on plant water relations in *Vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy*, 53, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.003>
- Battiston, C. (2014). *Energiebilanz Südtirol 2008-2014/Bilancio energetico dell'Alto Adige*. 3. Tag der Energie in Südtirol/ 3a giornata dell'energia in Alto Adige. Bolzano: Abteilung 29 - Landesagentur für Umwelt, Autonome Provinz Bozen, Südtirol. / Ripartizione 29 - Agenzia per l' ambiente, Provincia Autonoma Di Bolzano - Alto Adige.
- Centro di consulenza per la fruttiviticoltura Dell'Alto-Adige. (2019). *Guida viticoltura*. Egna: Centro di consulenza per la fruttiviticoltura Dell'Alto-Adige.
- Conti, M. (2003). I vantaggi e i limiti della produzione di energia elettrica tramite biomasse legnose. In *L'impatto ambientale di centrali elettriche alimentate a biomasse legnose. Esperienze e valutazioni*. ENEA Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente.
- Della Chiesa, S. et al. (2019). Farmers as data sources: Cooperative framework for mapping soil properties for permanent crops in South Tyrol (Northern Italy). *Geoderma*, 342, 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.010>
- European Commission. (2019). *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, The European Green Deal*. Brussels.
- European Parliament and Council. (2018). Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*, 328, 82–209.

- Guinée, J. B. et al. (2011). Life Cycle Assessment: Past, Present, Future. *Environmental Science and Technology*, 45, 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hamedani, S. R., Kuppens, T., Malina, R., Bocci, E., Colantoni, A., & Villarini, M. (2019). Life Cycle Assessment and Environmental Valuation of Biochar Production: Two Case Studies in Belgium. *Energies*, 12, 1–21. <https://doi.org/doi:10.3390/en12112166>
- Hammond, J., Shackley, S., Sohi, S., & Brownsort, P. (2011). Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. *Energy Policy*, 39(5), 2646–2655. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.033>
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376, 347–361. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x>
- Homagain, K., Shahi, C., Luckai, N., Sharma, M. (2016). Life cycle cost and economic assessment of biochar-based bioenergy production and biochar land application in Northwestern Ontario, Canada. *Forest Ecosystems*, 3(21). <https://doi.org/10.1186/s40663-016-0081-8>
- Ibarrola, R., Shackley, S., & Hammond, J. (2012). Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. *Waste Management*, 32(5), 859–868. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.005>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L.A. Meyer, (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- ISO. (2006a). “*Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*” ISO 14040. Geneva, Switzerland.
- ISO. (2006b). “*Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*” ISO 14044. Geneva, Switzerland.
- JRC. (2010). *ILCD handbook - International Reference Life Cycle Data System, General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance* (Firts edit; European Commission - Joint Research Center - Institute for Environment and Sustainability, Ed.). <https://doi.org/10.2788/38479>

- Lugato, E. et al. (2013). An energy-biochar chain involving biomass gasification and rice cultivation in Northern Italy. *Global Change Biology Bioenergy*, 5, 192–201. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12028>
- Major, J. (2010). *Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems*. https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Application.pdf
- Matustík, J., Hnátková, T., & Kocí, V. (2020). Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- McManus, M. C., & Taylor, C. M. (2015). The changing nature of life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 82, 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.024>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy*, 3, 313–339. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>
- Nguyen, T. L. T., Hermansen, J. E., & Nielsen, G. R. (2013). Environmental assessment of gasification technology for biomass conversion to energy in comparison with other alternatives: the case of wheat straw. *Journal of Cleaner Production*, 53, 138–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.004>
- Piccolo, A., Pietramellara, G., & Mbagwu, J. S. C. (1996). Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of mediterranean soils. *Soil Use and Management*, 12, 209–213.
- Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. *Environmental Science and Technology*, 44(2), 827–833. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es902266r>
- Shaaban, M., Van Zwieten, L., Bashir, S., Younas, A., Núñez-delgado, A., Chhajro, M. A., ... Hu, R. (2018). A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of Environmental Management*, 228, 429–440. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.006>
- Seneviratne, S.I. et al. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: *Managing the Risks of Extreme*

- Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109-230.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 9, 1137–1143. <https://doi.org/10.1234/4.2011.2517>
- Ventura, M. et al. (2015). Biochar mineralization and priming effect on SOM decomposition in two European short rotation coppices. *GCB Bioenergy*, 7(5), 1150–1160. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12219>
- Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512–523. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12266>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218–1230. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

