

LUISA NIGRISOLI, MARIO BALDINI, LUCIA PIANI

*Valutazione della sostenibilità energetico - ambientale di una filiera *Jatropha curcas* - biofuel nel nord est del Brasile*

Introduzione

Ad oggi certamente i combustibili fossili giocano un ruolo fondamentale nel settore energetico, ma allo stesso tempo sono responsabili del 56,6% delle emissioni di gas serra di origine antropica in atmosfera (IPCC, 2011). La relazione tra il consumo di combustibili fossili e la produzione di gas serra è stata sottolineata dal Protocollo di Kyoto, il quale ha individuato alcuni obiettivi di rilevanza internazionale per la riduzione delle emissioni. A causa dell'aumento della popolazione mondiale, è stimato come tra gli anni 2005 e 2030 la domanda energetica sia destinata a crescere dell'1,6% all'anno (UNCTAD, 2006). In questo contesto le fonti energetiche di tipo rinnovabile sono considerate una valida alternativa ai combustibili fossili, in grado di garantire benefici di tipo ambientale (CHERUBINI *et al.*, 2009).

Attualmente i combustibili fossili sono responsabili del 98% del consumo energetico per quanto riguarda il settore trasporti (IEA, 2011). L'interesse nei confronti dei biocarburanti (o biofuels) come valide alternative ai combustibili tradizionali è però in continua crescita. Ad oggi le tipologie di biocarburanti maggiormente impiegate nel settore trasporti coincidono con biocarburanti di I e II generazione, ottenuti rispettivamente dalla trasformazione di materie prime agricole coltivate *ad hoc* e da materiale organico non destinato all'alimentazione, mentre sono ancora in fase di studio e perfezionamento i cicli produttivi di biofuels di generazioni successive. A livello

nazionale e internazionale sono stati proposti numerosi targets per stimolare il mercato dei biocarburanti, tra questi la Direttiva 2009/28/CE adottata dall'Unione Europea che prevede il raggiungimento del 10% di biofuels nel settore trasporti entro il 2020 (EU, 2009).

Un paese leader a livello di politica a favore dei biocarburanti è il Brasile, considerando che il suo primo programma riguardante i biofuels è stato sviluppato nel 1975 (*"Programa Nacional do Alcool"*). Nel 2004 è stato approvato un programma nazionale per la produzione e l'utilizzo del biodiesel (*"Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel"*, PNPB), che prevede tra i suoi obiettivi il raggiungimento del 5% di biodiesel in miscela al diesel fossile per l'autotrazione a partire dal 2013. Il Governo Federale ha scelto di sviluppare il programma in un'ottica di supporto dell'agricoltura familiare, attraverso l'introduzione del marchio di *"Combustível social"* per le aziende produttrici di biodiesel che si impegnano ad acquistare una percentuale minima di materia prima da piccoli agricoltori, stipulare con essi contratti equi e garantire loro supporto tecnico. Il programma è inoltre supportato da una tassazione ridotta in funzione del tipo di materia prima, della regione di provenienza e delle caratteristiche del produttore.

Oltre che come materia prima per la produzione del biodiesel, l'olio vegetale puro può essere utilizzato tal quale, grezzo o raffinato, negli impianti cogenerativi o direttamente in motori per autotrazione opportunamente modificati, assumendo così un ruolo

lo di primaria importanza tra i biocarburanti (ESTEBAN *et al.*, 2011).

La fascia dei tropici possiede grandi potenzialità per la produzione di biocarburanti a causa delle proprie caratteristiche climatiche e dell'abbondanza di materie prime, ne è un chiaro esempio il Brasile (AMIGUN *et al.*, 2011). Nonostante il recente ampliamento del mercato mondiale, rimane però ancora aperto il dibattito incentrato sulla reale sostenibilità della produzione dei biofuels. Le dinamiche che principalmente appaiono ancora controverse consistono nella sicurezza alimentare, la destinazione d'uso del suolo, il bilancio dei gas serra del ciclo di vita dei biocarburanti e i reali benefici economici e sociali dello stesso. Per risolvere tali problematiche, soprattutto considerando la fascia tropicale, è necessario individuare una coltura rustica e non food, che non preveda alti input (entità in ingresso) di coltivazione, in modo da poter essere facilmente praticata dagli agricoltori locali, e che sia in grado di valorizzare i terreni marginali (AMIGUN *et al.*, 2011). Tutte queste caratteristiche sono ritrovabili nella *Jatropha curcas* L. (*Jatropha*), un'euforbiacea identificata come pianta promettente per la produzione di biofuels (ACHTEN *et al.*, 2010a). A causa della incompleta domesticazione della specie e dalle scarse conoscenze riguardo alle sue esigenze ecologiche e appropriate tecniche di coltivazione, sussistono ancora alcuni dubbi sulla sostenibilità della coltivazione della *Jatropha* su larga scala (MAES *et al.*, 2009, TRABUCCO *et al.*, 2010, ALMEIDA *et al.*, 2014).

Anche in Brasile, la *Jatropha* è considerata una potenziale materia prima per la produzione di biocombustibili, ma non è ad oggi ancora stata promossa dal PNPB dato che il Ministero dell'Agricoltura è in fase di ricerca per verificarne la sostenibilità del ciclo produttivo (EMBRAPA, 2009). Recentemente diversi studi hanno focalizzato la loro attenzione sulla sostenibilità della *Jatropha* come coltura energetica (CARELS, 2009), effettuando bilanci ambientali ed energetici della produzione di olio vegetale e di biodiesel da *Jatropha* in varie aree del mondo, spesso utilizzando il metodo "Life

Cycle Assessment" (LCA, "Analisi del Ciclo di Vita") (NDONG *et al.*, 2009, ACHTEN *et al.*, 2010b, WANG *et al.*, 2011, HAGMAN *et al.*, 2013). Tale metodologia, negli ultimi 20 anni, è diventata uno strumento fondamentale per descrivere le risorse utilizzate e le conseguenze ambientali di tutte le attività necessarie per produrre, usare e smaltire un oggetto, un prodotto o un servizio. Ad oggi l'analisi LCA è considerata idonea, e largamente utilizzata, anche per la valutazione dei potenziali benefici e rischi associati alla produzione di biofuels (CHERUBINI *et al.*, 2009).

Il presente studio analizza la sostenibilità energetica e ambientale di una filiera *Jatropha*-olio vegetale puro localizzata in una zona rurale dello Stato del Ceará utilizzando il metodo LCA, ed è pienamente giustificato dal recente interesse alla coltivazione di *Jatropha* a scopi energetici da parte dello stato brasiliano (FOLEGATTI MATSUURA *et al.*, 2011). I risultati dello studio, relativi alla produzione di bio-olio di *Jatropha*, sono stati comparati con i valori caratteristici della filiera produttiva di diesel fossile.

Materiali e metodi

L'obiettivo dell'analisi e i confini del sistema

Gli obiettivi dell'analisi consistono nella valutazione del fabbisogno energetico e delle emissioni in atmosfera di gas serra in una filiera produttiva di olio vegetale puro di *Jatropha* localizzata nel nord-est del Brasile in comparazione con la produzione di diesel fossile. Tale ciclo di produzione è stato analizzato tramite la metodologia LCA applicata mediante software SimaPro. Le informazioni utilizzate per la costruzione dell'inventario dei processi caratterizzanti il sistema, consistono in dati raccolti in una piantagione di *Jatropha* localizzata nella parte settentrionale dello Stato del Ceará, integrati con indagini socio-ambientali effettuate da ONG operanti nella stessa area, opportuna bibliografia e quanto riportato nel database EcoInvent 2.2.

Il sistema analizzato essenzialmente comprende la fase di coltivazione della *Jatropha* (inclusa la fase di vivaio), volta alla produzione di seme, e la successiva fase di estrazione dell'olio, da utilizzare a scopo energetico (Fig. 1). Il sistema è stato valutato considerando una durata di vita della coltivazione pari a 20 anni.

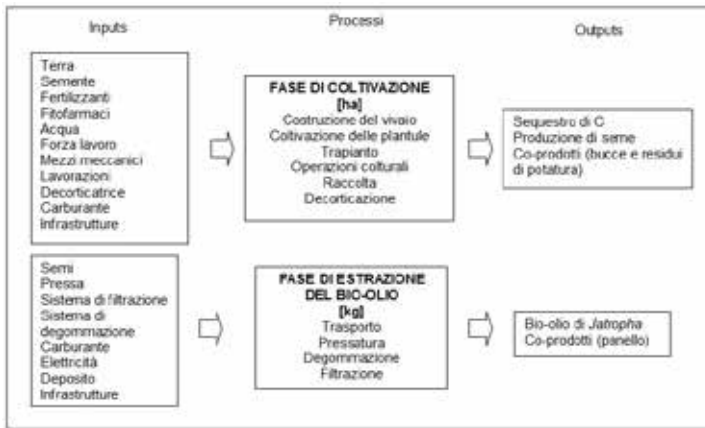


Figura 1 - Confini del sistema analizzato nell'analisi LCA della filiera *Jatropha*-biofuel.

Per quanto concerne la fase di coltivazione, tutti gli impatti sia energetici che ambientali, sono stati calcolati in riferimento alla superficie (1 ha di coltivazione), mentre per quanto riguarda la successiva fase di trasformazione, gli stessi impatti sono stati espressi su base produttiva (1 kg di bio-olio) ed energetica (1 MJ di energia del bio-olio). Sono stati utilizzati i metodi “Cumulative Energy Demand” (CED) e “Global Warming Potencial” (GWP) per individuare, rispettivamente, il fabbisogno energetico e le emissioni in atmosfera della filiera. La comparazione con il diesel è stata effettuata su base energetica [MJ], tenendo in considerazione il differente contenuto energetico dei due combustibili.

Le caratteristiche del territorio oggetto di studio

Il territorio analizzato rientra nei confini del Municipio di Uruoca (Lat. S 3°18'50”, Long. W 40°33'24”), nello Stato del Ceará.

L'area presenta un clima semi-arido, con temperature medie annuali 26-28° C e precipitazioni annuali pari a 957 mm concentrate nella stagione delle piogge, tra i mesi di gennaio e giugno (IPECE, 2014). Il terreno possiede una tessitura sabbiosa-franca, con ridotto contenuto di sostanza organica ma senza particolari anomalie. Il territorio

su cui si sviluppa l'area analizzata è attualmente caratterizzato da una copertura vegetale alterata rispetto a quella originaria, denominata *caatinga*. Ciò è dovuto principalmente alle annuali operazioni di preparazione del terreno per la semina, effettuate dagli agricoltori locali attraverso l'utilizzo del fuoco. Al termine del ciclo produttivo, il terreno viene colonizzato da una copertura rada costituita da arbusti fini, denominata *capoeira*, che risulta notevolmente più povera rispetto alla vegetazione nativa.

In questo contesto la coltivazione di *Jatropha* è stata sviluppata con lo scopo di arrivare a coinvolgere i piccoli agricoltori locali, in modo da creare una rete di produttori di semente da cui poter estrarre olio vegetale impiegabile localmente per la produzione di energia elettrica, accessibile per la comunità rurale stessa. L'obiettivo del progetto è lo sviluppo di un modello di agricoltura multifunzionale, così da riuscire a migliorare le condizioni di vita degli agricoltori locali e delle loro famiglie e salvaguardare l'area dal degrado ambientale. In quest'ottica quindi le valutazioni effettuate sulla piantagione di *Jatropha* rappresentano il primo passo per una corretta pianificazione dell'attività agricola, anche a livello di agricoltura familiare.

Fase di coltivazione

Tutti i materiali e l'energia necessari per questa fase sono riportati in tabella 1 e 2.

Operazioni	Unità di misura	Quantità
Fertilizzanti (NPK 10-10-10)	kg/ha	9,49
Semi	kg seme/ha	1,48
Sacchetti in plastica (fitocelle)	kg sacchetti/ha	5
Irrigazione	m3/ha	12
Fitofarmaci (dimethoate)	kg dimethoate/ha	0,005

Tabella 1 - Principali inputs agronomici impiegati durante la fase di coltivazione (fonte: prove di campo effettuate sulla piantagione).

Operazioni	Unità di misura	Quantità
Allestimento e cura del vivaio	energia [MJ/h]	4,1
	tempo [h/anno]	0,32
Preparazione delle fitocelle	energia [MJ/h]	4,1
	tempo [h/anno]	1,28
Irrigazione	energia [MJ/h]	3,6
	tempo [h/anno]	0,02
Distribuzione dei fitofarmaci	energia [MJ/h]	4,0
	tempo [h/anno]	0,17
Guida mezzi meccanici	energia [MJ/h]	2,1
	tempo [h/anno]	0,68
Preparazione del terreno	energia [MJ/h]	6,6
	tempo [h/anno]	40
Trapianto	energia [MJ/h]	4,1
	tempo [h/anno]	35
Potatura	energia [MJ/h]	3,6
	tempo [h/anno]	138
Diserbo	energia [MJ/h]	4
	tempo [h/anno]	0,6
Raccolta	energia [MJ/h]	3,4
	tempo [h/anno]	457,12

Tabella 2 - Caratteristiche del lavoro manuale impiegato durante la fase di coltivazione (fonti: per l'energia necessaria allo svolgimento di ciascuna operazione si è applicato lo standard FAO/WHO/UNU, 2001, le tempistiche sono state valutate dalle attività di campo effettuate sulla piantagione).

Per la costituzione del vivaio si sono utilizzati semi con germinabilità pari all'84%. Le fitocelle sono state preparate manualmente: il substrato è stato costruito con una miscela di terreni locali, sabbiosi e a grana più fine, a cui sono stati aggiunti sostanza organica e fertilizzante minerale. Le piantule sono state mantenute all'interno del vivaio fino a 50 giorni dopo l'emergenza, durante i quali sono state irrigate e sottoposte a trattamenti fitosanitari.

Mezzi meccanici	Unità di misura	Quantità
Caterpillar	consumo di carburante [l/h]	24
	tempo [h/anno]	0,43
Trattore (con assolcatore)	consumo di carburante [l/h]	5
	tempo [h/anno]	0,35
Pick up	consumo di carburante [km/l]	9
	distanza [km/anno]	608
Decorticatrice	consumo di energia elettrica [kWh]	0,75
	tempo [h/anno]	5,46

Tabella 3 - Mezzi meccanici impiegati nella filiera *Jatropha-biofuel* (fonti: caratteristiche tecniche dei mezzi verificate durante le attività di campo, eccetto che per la decorticatrice per la quale si è fatto riferimento a FACT, 2010).

Il trapianto delle piantine in pieno campo è avvenuto nei primi mesi del 2011, su una superficie totale di 50 ha. Le operazioni di preparazione del terreno sono state effettuate sia manualmente che con l'ausilio di mezzi meccanici (tab. 3). Per la valutazione della fase di trasporto si è tenuto conto della distanza media tra il vivaio e l'area di coltivazione, pari a 9 km. L'investimento a ettaro è di 1660 piante, con un sesto di impianto di 2 m sulla fila per 3 m tra le fila. E' stato considerato un intervento di potatura nel secondo anno di vita dell'impianto, caratterizzato dalla riduzione del 50% della biomassa aerea della pianta. L'eliminazione delle infestanti viene effettuata sia manualmente che con l'ausilio di un sarchiatore, a cadenza annuale durante i primi 3 anni di vita dell'impianto. Dopo tale periodo le piante sono in grado di coprire completamente l'interfila, riducendo il rischio di emergenza di malerbe (FACT, 2010).

La raccolta dei frutti, effettuata nel 2012 al termine della stagione piovosa, ha comportato una resa pari a 1000 kg/ha di seme, con precipitazioni che durante l'anno 2012 sono state inferiori del 50% rispetto ai valori caratteristici dei 10 anni precedenti (FUNCEME, 2012). Tale considerazione è stata utilizzata come riferimento per ipotizzare le rese future a piena maturità dell'impianto, che avviene di norma dopo i 3 anni dal trapianto. Al fine di effettuare un'analisi di sensibilità, sono stati quindi individuati 3 scenari produttivi, in relazione alle future possibili condizioni climatiche e di crescita:

1. Scenario standard (relativo allo studio), prevede rese annue a maturità pari a 4000 kg/ha similmente a quanto riportato da altre analisi sulla *Jatropha* effettuate in Brasile (FOLEGATTI MATSUURA *et al.*, 2011);
2. Diminuzione delle rese del 50% rispetto allo scenario standard (2000 kg/ha) nel caso di condizioni di crescita avverse;
3. Aumento delle rese del 50% rispetto allo scenario standard (6000 kg/ha) considerando condizioni molto favorevoli.

La raccolta dei frutti è stata effettuata manualmente da lavoratori agricoli locali: si è tenuto conto di una capacità di raccolta quotidiana pari a 70 kg di seme (FACT, 2010). I frutti sono stati poi decorticati meccanicamente utilizzando una decorticatrice con capacità di lavorazione pari a 1000 kg di frutta all'ora. Le operazioni di essiccazione non si sono rese necessarie a causa delle caratteristiche climatiche locali, che durante la fase di raccolta garantiscono un clima sufficientemente secco.

Fase di estrazione dell'olio

Questa fase comprende i processi di estrazione meccanica dell'olio dai semi di *Jatropha* e la sua successiva parziale raffinazione, tramite i processi di filtrazione e degommaggio. Da un'analisi con metodo Soxhlet (AOAC, 1990) si è verificato come il contenuto in olio dei semi di *Jatropha* oggetto di studio sia in media pari al 31% in peso sulla sostanza secca. L'impianto di pressatura, idoneo per l'estrazione di olio da differenti specie vegetali e utilizzato nel

Caratteristiche dei processi di estrazione e raffinazione	Quantità
capacità di lavoro [kg seme/h]	26
efficienza [%]	75
acqua impiegata per la degommazione [kg/kg olio]	0,02
consumo di elettricità [kWh]	15

Tabella 4 - Caratteristiche principali del sistema di estrazione dell'olio di *Jatropha* (fonti: dati a disposizione dell'Università di Udine, eccetto che per la degommazione per la quale si è fatto riferimento a ESTEBAN *et al.*, 2011).

presente studio, consiste in una pressa meccanica MPS 60 MT (Mailca, Italia), le cui caratteristiche vengono riportate in tabella 4.

Le operazioni di raffinazione analizzate dallo studio consistono in filtrazione e degommazione, effettuata con acqua (ESTEBAN *et al.*, 2011).

Per la valutazione della fase di trasporto dei semi, si è considerata la distanza media tra la piantagione e l'impianto, pari a 17 km.

Metodi di allocazione

Il problema delle allocazioni si pone quando un processo ha come risultato differenti outputs (entità in uscita) cioè quando, oltre al prodotto principale, sono ottenuti altri co-prodotti. Nel presente studio è stato necessario individuare un'adeguata allocazione per i residui, ottenuti dalle fasi di potatura e sbucciatura, e per il pannello, co-prodotto del processo di estrazione del bio-olio.

L'Unione Europea raccomanda l'uso di un metodo di allocazione di tipo energetico per quanto riguarda i co-prodotti dei processi produttivi di biofuels, con l'eccezione dei residui di coltivazione che possono essere considerati a contributo energetico nullo (UE, 2009). Seguendo queste indicazioni, non sono stati valutati gli impatti energetici dei residui di potatura e di sbucciatura, eguagliandoli a residui colturali. Invece per il pannello, fondamentale co-prodotto del

Caratteristica	Olio di <i>Jatropha</i>	Pannello di estrazione
PCI [MJ/kg]	37 ¹	19,5 ²
Frazione della massa totale del seme [%]	23,25	76,75
Frazione dell'energia totale del seme [%]	36,9	63,1

¹ EU, 2009

² REINHARDT *et al.*, 2008

Tabella 5 - Valori di riferimento per la modalità di allocazione.

processo di produzione del olio di *Jatropha*, si è scelta un'allocazione di tipo energetica, sulla base dei valori riportati in tabella 5.

Valutazione degli impatti

Per la valutazione del fabbisogno energetico della filiera si è utilizzato il metodo “*Cumulative Energy Demand*” (CED), che calcola in MJ il consumo di energia, da fonti rinnovabili e non, dovuto a ciascun processo. In particolare per la valutazione del lavoro manuale si è fatto riferimento alla metodologia “*Human Energy Requirement*” che quantifica il costo energetico dell'attività antropica sulla base del sesso e dell'età (FAO/WHO/UNU, 2001). L'efficienza del sistema è stata invece verificata tramite il rapporto tra l'energia prodotta dal ciclo produttivo e quella consumata, attraverso l'indice “*Energy Return On Investment*” (EROI) (ESTEBAN *et al.*, 2011). Per la comparazione con il diesel si è tenuto conto del differente contenuto energetico dei due combustibili (potere calorifico inferiore, PCI), pari a 37 MJ/kg per quanto riguarda l'olio di *Jatropha* e 43 MJ/kg per il diesel.

Le emissioni in atmosfera sono state calcolate tramite il metodo “*Global Warming Potential*” (GWP) che comporta il calcolo di tutte le emissioni prodotte dal sistema in un arco di tempo di 20 anni. Tutti i gas serra sono valutati sulla base del loro effetto potenziale sull'aumento del riscaldamento globale, così da esprimere il GWP in kg CO₂ equivalenti emessi. E' stato inoltre possibile quantificare le emissioni di N₂O e CH₄: le prime sono state calcolate secondo il metodo IPCC (IPCC, 2006), le seconde invece sono state valutate come pari all'1% degli apporti di N al suolo (CHERUBINI *et al.* 2009).

Lo studio valuta anche gli effetti del cambiamento d'uso del suolo (“*Land Use Change*” (LUC)), che consistono nella modificazione degli stocks di carbonio nella copertura vegetale e nel terreno, in caso di conversione colturale (IPCC, 2006). Considerando le categorie d'uso del suolo analizzate dall'IPCC, la vegetazione precedente

all'impianto di *Jatropha* è classificata come una copertura “*grassland*”, corrispondente a piante erbacee con componente arborea piuttosto rada e da situazioni intermedie tra prateria e foresta. E' questo il caso dell'area oggetto di studio, coperta da vegetazione degradata a seguito degli interventi antropici precedentemente descritti.

Tutti i risultati sono presentati come valori medi annuali, considerando 20 la durata di vita del sistema.

Risultati e Discussione

Fase di coltivazione

La figura 2a riporta il fabbisogno energetico dovuto alla fase di coltivazione, evidenziando come il procedimento che risulta essere energeticamente più dispendioso coincida con la fase di raccolta dei semi, corrispondente al 70% del CED. Considerando invece le emissioni in atmosfera (Fig. 2b), si nota come la fase di preparazione del terreno presenti valori negativi. Ciò significa che l'impatto del LUC dovuto all'im-

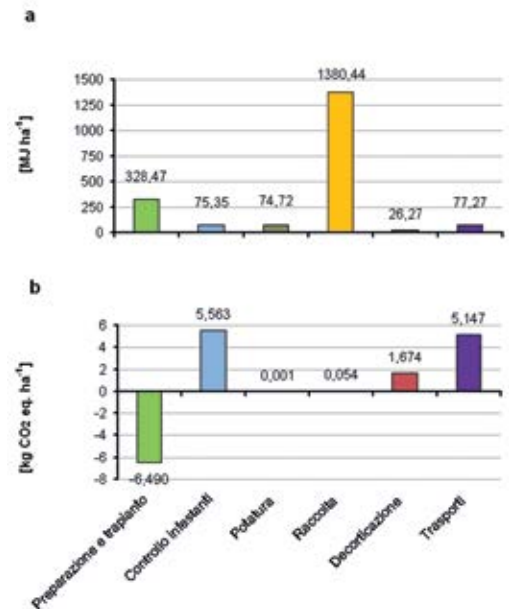


Figura 2 - CED (a) e GWP (b) caratteristici della fase di coltivazione.

pianto di *Jatropha* comporta un risparmio nelle emissioni di gas serra, a causa del maggiore contenuto di carbonio immagazzinato nella nuova piantagione rispetto alla copertura vegetale precedente all'impianto. D'altro canto si nota come le operazioni di eliminazione della flora infestante e di decorticazione dei semi comportino i maggiori impatti su GWP.

In generale comunque la tecnica agronomica analizzata dal presente studio risulta caratterizzata da bassi input, sia in termini energetici che da un punto di vista dei materiali utilizzati. Il principale intervento agronomico effettuato annualmente consiste infatti nella fase di raccolta dei frutti, mentre la potatura e il diserbo meccanico, essendo limitati ai primi anni di vita dell'impianto, presentano una limitata incidenza. Proprio grazie all'adozione di tale tecnica agronomica, i valori caratteristici di CED e GWP risultano notevolmente inferiori rispetto a quanto rilevato in studi caratterizzati da maggiori input colturali (PRUEKSAKORN *et al.*, 2010, NDONG *et al.*, 2009, WANG *et al.*, 2011) e comparabili con quanto invece rilevato in studi focalizzati sull'analisi di filiere produttive a basso input (HAGMAN *et al.*, 2013). Concentrandosi sulla valutazione degli impatti dovuti al processo di fertilizzazione chimica, legato a tecniche agronomiche ad alto input, è stato infatti verificato come questi possano incidere per il 29-30% sul totale delle emissioni in una filiera *Jatropha*-biodiesel (SIREGAR *et al.*, 2015, PRUEKSAKORN & GHEEWALA, 2006), eguagliando quasi totalmente, in termini assoluti, le emissioni dovute all'intera filiera qui analizzata (SIREGAR *et al.*, 2015).

Nel caso del presente studio inoltre, la coltivazione di *Jatropha* determina un incremento del contenuto di carbonio in comparazione con la copertura vegetale precedente all'impianto, mentre è spesso verificato come il cambiamento d'uso del suolo comporti un aumento nelle emissioni in atmosfera, anche in caso di altre colture energetiche (ACHTEN *et al.*, 2012). Inoltre la scelta di tecniche agronomiche a basso input, come la minima lavorazione o la scelta di lasciare i residui colturali in campo, de-

terminano un ulteriore aumento del contenuto di carbonio nel suolo (IPCC, 2006).

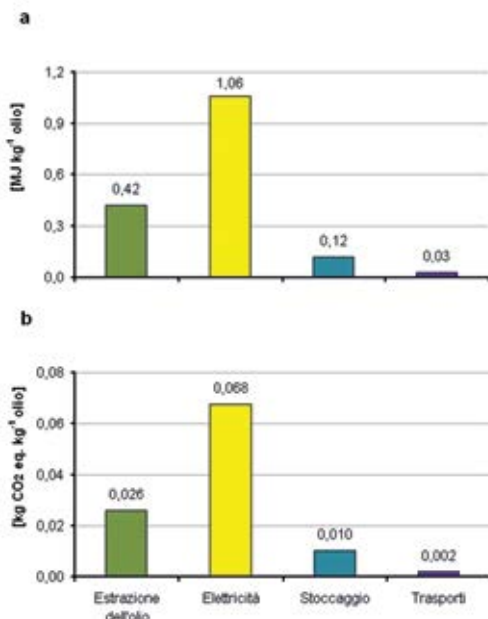


Figura 3 - CED (a) e GWP (b) caratteristici della fase di estrazione del bio-olio di *Jatropha*.

CED risultano dovuti al processo di estrazione dell'olio e al consumo di elettricità, pari rispettivamente al 25,8% e al 63,5% dell'intero CED (Fig. 3a).

Per quanto riguarda le emissioni in atmosfera, la maggioranza del GWP risulta essere causata dal consumo di energia elettrica (Fig. 3b). Tale consumo risulta difficilmente riducibile, ai fini di migliorare gli impatti energetici e ambientali della filiera, perché strettamente legato alle esigenze dell'impianto di estrazione. Una soluzione potrebbe però essere la sostituzione dell'energia elettrica proveniente dalla rete nazionale con l'elettricità prodotta localmente possibilmente da fonti rinnovabili.

Metodo di allocazione del pannello

Anche se il bio-olio costituisce il principale prodotto della filiera oggetto di studio, il pannello di estrazione in termini energetici rappresenta il 63,1% della produzione e

quantitativamente corrisponde al più importante output dell'intera filiera. Per questo la scelta tra differenti modalità di allocazione potrebbe comportare conclusioni anche molto differenti rispetto a quanto presentato nella presente analisi (BAILIS & BAKA, 2010).

Nel contesto oggetto di studio ad oggi la destinazione del pannello consiste nel suo impiego come fertilizzante organico o per la produzione di energia da biomassa e quindi una sua allocazione energetica risulta corretta.

Nonostante il pannello di *Jatropha* possieda valori nutritivi interessanti, non può essere utilizzato per l'alimentazione animale a causa della sua tossicità, per la presenza di esteri del forbolo (MAKKAR & BECKER, 2009). Attualmente le esistenti tecniche di detossificazione risultano efficaci, ma energeticamente ed economicamente dispendiose (OPENSHAW, 2000). Perciò la soluzione più facilmente praticabile in un prossimo futuro, sarà la coltivazione di *Jatropha* non tossica, sulla quale si stanno concentrando numerosi studi (EMBRAPA, 2009).

Analisi dell'intera filiera

I risultati riferiti all'intera filiera sono suddivisi in varie fasi: coltivazione, produzione dell'olio, consumo di energia elettrica e trasporti. Il CED totale corrisponde a 2,6 MJ/kg olio (Fig. 4a) mentre il GWP risulta pari a 0,11 kg CO₂ eq/kg olio (Fig. 4b). La componente che presenta un peso maggiore su entrambe le analisi risulta essere il consumo di energia elettrica, necessario per vari processi della filiera (decorticazione, estrazione dell'olio, filtrazione e degommazione), che costituisce il 42% del CED e il 63% del GWP. Per riuscire a ridurre tali impatti, l'elettricità necessaria per le varie fasi del sistema produttivo potrebbe essere ottenuta localmente sfruttando l'energia contenuta nell'olio di *Jatropha*.

Analizzando l'intera filiera inoltre si può notare come la fase di coltivazione incida per il 34% sul CED: ciò è principalmente dovuto all'impiego di forza lavoro manuale

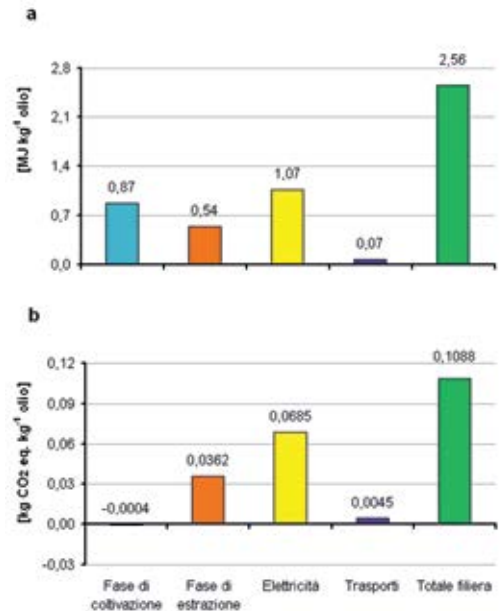


Figura 4 - CED (a) e GWP (b) relativi all'intera filiera per la produzione di bio-olio di *Jatropha*.

per la raccolta dei frutti. In termini di tempo, effettuare la raccolta su 1 ha di piantagione richiede circa 457 ore di lavoro, se svolta manualmente, ma solo 5-13 ore se meccanizzata. L'elevato impiego di manodopera certamente contribuisce al fatto che il 61% dell'energia necessaria alla filiera derivi da risorse rinnovabili, confermando come il consumo di energia di origine fossile caratteristico della presente analisi sia inferiore rispetto a quanto rilevato in altri studi (HAGMAN *et al.*, 2013). D'altro canto però, se si considerasse una piantagione di grandi dimensioni, il lavoro manuale potrebbe comportare un alto costo energetico oltretutto economico, che sarebbe necessario verificare per valutare la reale sostenibilità socio-economica di una filiera *Jatropha*-biofuels su grande scala.

Analisi di sensibilità

Le figure 5a e 5b mostrano come differenti rese annuali siano in grado di influenzare, rispettivamente, CED e GWP. E' evidente come il fabbisogno energetico

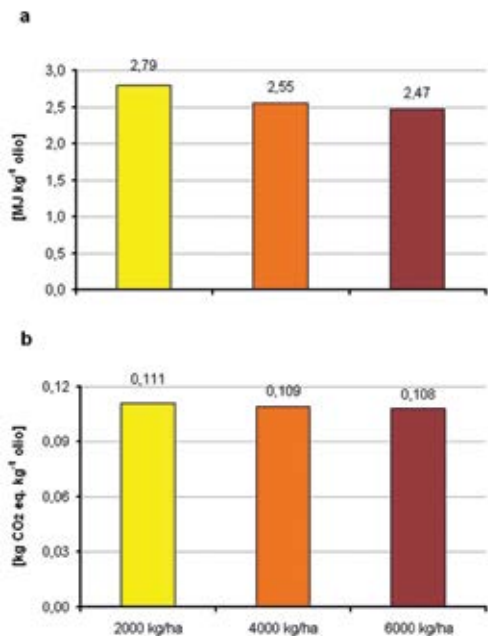


Figura 5 - CED (a) e GWP (b) dell'intera filiera *Jatropha*-biofuel considerando i 3 differenti scenari produttivi.

e le emissioni di gas serra per kg di bio-olio prodotto diminuiscano quando le rese aumentano, comportando di conseguenza un aumento dell'efficienza del sistema. L'efficienza della filiera può inoltre essere presentata tramite la relazione tra la resa di seme prodotto annualmente e la superficie necessaria per produrre 1 MJ di olio di *Jatropha*. Considerando una resa di 2000, 4000 o 6000 kg/ha all'anno, la superficie necessaria per la produzione di 1 MJ di olio vegetale puro risulta rispettivamente pari a 0,40, 0,21 e 0,14 m². In generale si può quindi affermare come alti livelli produttivi implicino una maggiore efficienza. Bisogna però considerare come per garantire rese abbondanti sia necessario mantenere apporti idrici ottimali e alti livelli di fertilità del suolo (FACT, 2010) e se questo avviene mediante numerosi interventi irrigui e abbondanti fertilizzazioni chimiche non è detto che il bilancio energetico-ambientale risulti pienamente sostenibile. Ciò significa che la resa produttiva e la riduzione del fabbisogno energetico e delle emissioni in atmosfera dell'intera filiera devono raggiun-

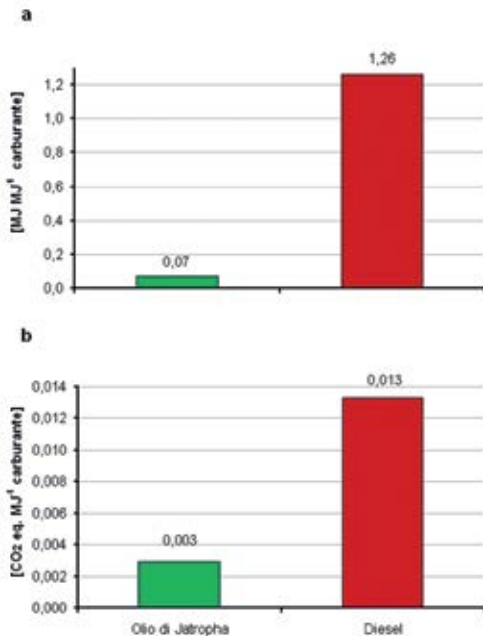


Figura 6 - Comparazione dei valori di CED (a) e GWP (b) caratteristici della filiera oggetto di studio e della produzione di diesel fossile.

gere e mantenere un equilibrio, mediante l'adozione di una tecnica agronomica efficiente, a basso input e idonea all'ambiente specifico di coltivazione.

Confronto tra olio di *Jatropha* e diesel fossile

La filiera *Jatropha*-biofuel presenta un fabbisogno energetico e un'emissione di gas serra decisamente più favorevoli rispetto alla filiera produttiva di diesel fossile, comportando un risparmio del 94% sul CED e del 77% sul GWP (Fig. 5a e 6b) Tali risultati particolarmente incoraggianti potrebbero rendere appetibile l'esportazione dell'olio di *Jatropha* prodotto in Brasile verso l'Unione Europea. Volendo considerare tale possibilità, tramite le informazioni contenute nel database EcoInvent, è stata valutata un'ipotesi di trasporto del bio-olio dall'area rurale del Ceará fino al porto di Fortaleza (circa 300 km di distanza, percorsi con camion di capacità pari a 16-28 t) e, successivamente, via nave fino alle coste

italiane (circa 8000 km di distanza, tramite nave cargo contenente containers con capacità pari a 22 t). Con tali presupposti, i valori di CED e GWP sono aumentati rispettivamente di 3 e 4 volte rispetto ai valori della filiera caratterizzata da utilizzo locale, vanificando completamente i vantaggi ambientali di cui sopra.

Il rapporto tra l'energia prodotta e quella consumata (output e input) dalle due filiere è evidenziato dall'EROI che risulta pari a 14,5 per il bio-olio e 0,8 per il diesel (Fig. 7). Il valore individuato per la filiera *Jatropha*-biofuels è tipico dei sistemi produttivi con colture perenni e significativamente più alto rispetto a filiere in grado di fornire olio vegetale puro da colture energetiche a ciclo annuale, come la colza (*Brassica napus* var. *oleifera*) che presenta valori di EROI compresi tra 2,34 e 4,51 (ESTEBAN *et al.*, 2011).

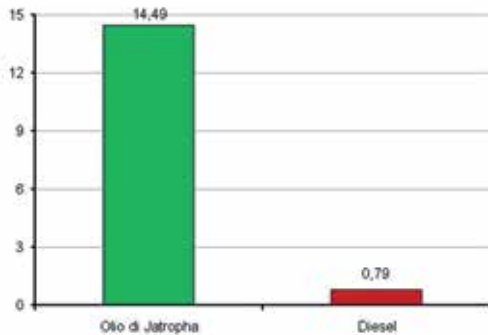


Figura 7 - Comparazione del rapporto tra l'energia prodotta e quella consumata (EROI) relativo alla produzione di olio di *Jatropha* e di diesel fossile.

Conclusioni

I risultati principali dello studio sottolineano come l'olio di *Jatropha*, ottenuto tramite una tecnica agronomica a basso input e un semplice processo di estrazione meccanica, presenti valori di sostenibilità energetica ed effetti sul cambiamento climatico decisamente più favorevoli in confronto alla produzione di diesel fossile. Inoltre la coltivazione di *Jatropha* in aree marginali, caratterizzate da clima semi-arido e da copertura vegetale parzialmente degradata e impoverita da precedenti attività antropi-

che, può garantire un aumento nel contenuto di carbonio al suolo e nella copertura vegetale. La tecnica agronomica adottata, basata essenzialmente sull'impiego di forza lavoro manuale, in particolare necessaria per la raccolta annuale del frutto, influenza favorevolmente il bilancio energetico e delle emissioni della filiera.

Lo studio evidenzia inoltre come la produzione di olio di *Jatropha*, condotta nel rispetto delle tecniche agronomiche a basso input adottate nell'ambiente oggetto di studio, risulta pienamente sostenibile da un punto di vista energetico-ambientale solo nel caso in cui l'utilizzazione dell'olio vegetale avvenga *in loco*; mentre un suo trasporto su lunga distanza ne annullerebbe completamente i benefici.

La filiera presentata dovrebbe quindi essere attuata con l'obiettivo di coinvolgere direttamente gli agricoltori locali, i quali potrebbero coltivare la *Jatropha* anche come siepe o in consociazione con colture alimentari, in modo da non sottrarre terreno alle colture food e allo stesso tempo incrementare le entrate familiari. L'olio ottenuto potrebbe essere impiegato per le necessità energetiche della stessa comunità rurale. Tale tipologia di filiera, oltre a una dimostrata sostenibilità energetico-ambientale, evidenzierebbe anche una piena sostenibilità sociale ed economica, risultando molto meno impattante rispetto a una filiera industriale di grande scala (COMMISSION ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2007, ACHTEN *et al.* 2010a).

Inoltre alcuni co-prodotti come i residui del processo di decorticazione (gusci) e di potatura potrebbero essere utilizzati in sostituzione di legna e carbone, ad oggi principali combustibili domestici, spesso ottenuti da pratiche di deforestazione incontrollata (GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2010).

BIBLIOGRAFIA

- AMIGUN B. *et al.*, 2011, *Biofuels and sustainability in Africa*, Renewable and sustainable energy reviews, 15 (2011), 1360-1372
- ACHTEN W. M. J. *et al.*, 2010a, *Jatropha: from global hype to local opportunity*, Journal of arid environment, 74 (2010) 164-165
- ACHTEN W. M. J. *et al.*, 2010b, *Life cycle assessment of Jatropha biodiesel as transportation fuel in rural India*, Applied energy, 87 (2010), 3652-3660
- ACHTEN W. M. J. *et al.*, 2012, *Global greenhouse gas implications of land conversion to biofuel crop cultivation in arid and semi-arid lands – Lessons learned from Jatropha*, Journal of arid environment (2012), 11 pp. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.06.015> (ultima visita: 11 Gennaio 2013)
- ALMEIDA J. *et al.*, 2014, *Effect of farming system and yield in the life cycle assessment of Jatropha-based bioenergy in Mali*, Energy for sustainable development, 23 (2014), 258-265
- AOAC, 1990, *Method 920.85 Fat (crude) or ether extract in flour*, Official Methods of Analysis of the Association of Official Chemists, 15. Ed., K. Helrich (Ed.), Arlington (Virginia)
- BAILIS R. E. & BAKA J. E., 2010, *Greenhouse gas emissions and land use change from Jatropha curcas- based jet fuel in Brazil*, Environmental science & technology, 44 (2010), 8684-8691
- CARELS N., 2009, *Jatropha curcas: a review*, Advances in botanical research, 50 (2009), 39-86
- CHERUBINI F. *et al.*, 2009, *Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: key issues, ranges and recommendations*, Resources, conservation and recycling, 53 (2009), 434-447
- EMBRAPA, 2009, *Pinhão manso – Matéria prima potencial para produção de biodiesel*, EMBRAPA/MAE/Governo Federal, 6 pp. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/578281/1/PinhaomansomateriaprimapotencialparaproducaodebiodieselnoBrasil.pdf> (ultima visita: 5 Dicembre 2012)
- ESTEBAN B. *et al.*, 2011, *Is it environmentally advantageous to use vegetable oil direct as biofuel instead of converting it to biodiesel?*, Biomass and bioenergy, 35 (2011), 1317-1328
- EU, 2009, *Direttiva sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili*, Parlamento Europeo, Direttiva 2009/28/CE, 23 aprile 2009, 47 pp
- FACT, 2010, *The Jatropha handbook – From cultivation to application*, FACT, 172 pp. http://www.snvworld.org/sites/www.snvworld.org/files/publications/fact_foundation_jatropha_handbook_2010.pdf (ultima visita: 6 Febbraio 2015)
- FAO/WHO/UNU, 2001, *Human energy requirement: report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation*, FAO, 96 pp. <ftp://ftp.fao.org/DOCREP/FAO/007/y5686e/y5686e00.pdf> (ultima visita: 10 Novembre 2012)
- FOLEGATTI MATSUURA M. *et al.*, 2011, *Life cycle inventory of physic nut biodiesel: comparison between the manual and mechanised agricultural production systems practiced in Brazil*, Towards life cycle sustainability management, 41 (2011), 425-436
- FUNCEME, 2012, <http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/grafico-de-chuvas-dos-postos-pluviometricos> (ultima visita: 5 Dicembre 2012)
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ, 2010, *Programa de ação estadual de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca – PAE – CE*, Segretaria dos recursos hídricos – Ceará, 374 pp
- HAGMAN J. *et al.*, 2013, *Do biofuels require more water than do fossil fuels? Life-cycle based assessment of Jatropha oil production in rural Mozambique*, Journal of Cleaner Production, 53 (2013), 176-185
- IEA, 2011, *Technology roadmap – Biofuels for transport*, OECD/IEA, 56 pp. http://www.iea.org/publications/free-publications/publication/biofuels_roadmap.pdf (accessed on 25 March 2013)
- IPCC, 2006, *Guidelines for national greenhouse gas inventories*, IPCC, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (ultima visita: 10 Novembre 2012)
- IPCC, 2011, *IPCC Special report on renewable energy sources and climate change mitigation*, Cambridge, Cambridge University Press, 1075 pp
- IPECE, 2014, *Perfil básico municipal 2014 - Uruoca*, IPECE, 17 pp, available at http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/pbm-2014/Uruoca.pdf (ultima visita: 6 Febbraio 2015)
- MAES W. H. *et al.*, 2009, *Climatic growing conditions of Jatropha curcas*, Biomass and bioenergy, 33 (2009), 1481-1485
- MAKKAR H. P. S. & BECKER K., 2009, *Jatropha curcas, a promising crop for the generation of biodiesel and value-added coproducts*, Eur. J. Lipid Sci. Technol., 111 (2009), 773-787
- NDONG R. *et al.*, 2009, *Life cycle assessment of biofuels from Jatropha curcas in west Africa: a field study*, GCB Bioenergy, 1 (2009), 197-210
- OPENSHAW K., 2000, *A review of Jatropha curcas: an oil plant of unfulfilled promise*, Biomass and bioenergy, 19 (2000), 1-15
- PRUEKSAKORN K. & GHEEWALA S. H., 2006, *Energy and greenhouse gas implication of biodiesel production from Jatropha curcas L.*, Proceeding of The 2nd Joint International Conference on “Sustainable energy and environments (SEE 2006)”, Bangkok - Thailand 2006, 6 pp
- PRUEKSAKORN K. *et al.*, 2010, *Energy analysis of Jatropha plantation systems for biodiesel production in Thailand*, Energy for sustainable development, 14 (2010), 1-5
- REINHARDT G. *et al.*, 2008, *Basic data for Jatropha production and use*, IFEU/CSMCRI/University of Hohenheim, 15 pp, available at http://jatropha.pro/PDF%20bestanden/en_jatropha-database-june-2008%5B2%5D.pdf (ultima visita: 19 Settembre 2012)

SIREGAR K. *et al.*, 2015, *A comparison of Life Cycle Assessment on Oil Palm (Elaeis guineensis Jacq.) and Physic Nut (Jatropha curcas Linn.) as Feedstock for Biodiesel Production in Indonesia*, Energy Procedia, 65 (2015), 170-179

TRABUCCO A. *et al.*, 2010, *Global mapping of Jatropha curcas yield based on response of fitness to present and future climate*, GCB Bioenergy, 2 (2010), 139-151

UNCTAD, 2006, *The emerging biofuels market: regulatory, trade and development implication*, UNCTAD, 52 pp. http://r0.unctad.org/ghg/events/biofuels/UNCTAD_DITC_TED_2006_4.Final.pdf (ultima visita: 18 Ottobre 2012)

WANG H. *et al.*, 2011, *Effects of replacing soybean meal by detoxified Jatropha curcas kernel meal in the diet of growing pigs on their growth, serum biochemical parameters and visceral organs*, Animal Feed Science and Technology, 170 (2011) 141-146

WANG Z. *et al.*, 2011, *Life cycle assessment of the economic, environmental and energy performance of Jatropha curcas L. biodiesel in China*, Biomass and bioenergy, 35 (2011), 2893-2902

Luisa Nigrisoli, Mario Baldini

Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università di Udine, via delle Scienze 206, 33100 Udine (Italia),
E-mail: nigrisoli.luisa@spes.uniud.it
E-mail: mario.baldini@uniud.it

Lucia Piani

Dipartimento di Scienze Umane, Università di Udine, via delle Scienze 206, 33100 Udine (Italia)
E-mail: lucia.piani@uniud.it

PAROLE CHIAVE: *Jatropha curcas L., sostenibilità ambientale, Life Cycle Assessment*

RIASSUNTO

L'aumento della domanda energetica globale mette in evidenza quanto il ruolo dei biocarburanti possa essere fondamentale per diversificare le fonti di approvvigionamento energetico, svincolare il settore dei trasporti dai prodotti petroliferi e ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera. In questo contesto la *Jatropha curcas* è considerata una specie molto interessante per la produzione di biocarburanti nei paesi della fascia tropicale e subtropicale. Il presente studio analizza una filiera produttiva di olio vegetale puro di *Jatropha curcas* in un'area rurale

del Nord Est del Brasile (Stato del Ceará). Attraverso la metodologia del "Life Cycle Assessment" si è valutata la sostenibilità energetica e ambientale dell'intero ciclo produttivo, comparandolo con quello di un analogo combustibile fossile. Si è potuto verificare come la produzione di olio vegetale di *Jatropha curcas* nel contesto oggetto di studio risulti notevolmente più conveniente, in termini energetici e ambientali, rispetto al processo produttivo di diesel fossile. Tali benefici sono risultati strettamente vincolati al consumo locale dei prodotti e dei co-prodotti della filiera, che potrebbe essere inserita a livello di agricoltura familiare in un'ottica di coinvolgimento della comunità rurale, valorizzazione e tutela del territorio e accesso all'energia.

KEY WORDS: *Jatropha curcas L., environmental sustainability, Life Cycle Assessment*

ABSTRACT

The increasing of the global energy demand underlines how biofuels are necessary in order to diversify energy sources, to separate the transport sector from fossil fuels and to reduce greenhouse gases emitted in the atmosphere. In this context *Jatropha curcas* is considered as a possible fundamental species for biofuels production in the tropical areas. This paper analyses the production chain of pure vegetable oil from *Jatropha curcas* in a rural area of the North-Eastern part of Brazil (Ceará State). Through an analysis based on the "Life Cycle Assessment" method, this study evaluates the energy and environmental sustainability of the complete production cycle, comparing it with that of an analogous fossil fuel. It allows to verify how the production of *Jatropha curcas* bio-oil in the analysed context is notably more convenient than diesel production, with regards to energy consumption and greenhouse gases emissions. These benefits are closely linked to the local consumption of the products and the co-products of the *Jatropha curcas* oil production chain. Furthermore, this chain could be integrated in the family farming system in order to directly involve the rural community, to promote and protect the land and to improve the access to energy.