

Biomasse per l'energia: aspetti ecologici, energetici ed economici

Giulia Fiorese
fiorese@elet.polimi.it

correlatori
prof. Giulio De Leo
prof. Marino Gatto
prof. Giorgio Guariso

Dottorato in ecologia
XX ciclo
Gennaio 2005 – Dicembre 2007

Università degli Studi di Parma



This land is your land and this land is my land,
sure, but the world is run by those that never
listen to music anyway.

Bob Dylan, 1970

Indice

Indice delle figure.....	vii
Indice delle tabelle.....	xi
Ringraziamenti	xv
1 Introduzione.....	1
2 I cambiamenti climatici e la questione energetica.....	3
2.1 I cambiamenti climatici globali	3
2.1.1 Cenni fisici.....	6
2.1.2 Trend di emissione	6
2.1.3 Scenari futuri di cambiamenti climatici globali	8
2.2 Il settore dell'energia	10
2.2.1 Scenari futuri per l'energia.....	13
2.2.2 Il contesto europeo.....	16
2.2.3 Il contesto italiano	18
2.3 Politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici globali	20
2.3.1 Le fonti rinnovabili di energia	22
2.3.2 La cattura del carbonio	25
2.3.3 Kyoto e oltre: gli obiettivi dell'UE.....	26
2.3.4 L'attuazione del Protocollo di Kyoto in Italia	29
2.4 Bibliografia.....	30
3 Le biomasse come fonte rinnovabile di energia	33
3.1 Biomasse, bioenergia e biocombustibili.....	34
3.1.1 Le colture energetiche	36
3.2 Energia da biomasse in cifre.....	38
3.3 Trend e potenzialità	40
3.4 Tipologia di risorse e disponibilità sul territorio italiano	44
3.5 Processi di conversione	45
3.6 Applicazioni e relative filiere	47
3.7 Benefici e criticità della bioenergia	52
3.7.1 Benefici.....	52
3.7.2 Criticità	55
3.7.3 Fattori di emissione	56
3.8 Bibliografia.....	60
4 Potenzialità delle colture energetiche	63
4.1 Introduzione.....	63
4.2 Metodo proposto.....	65
4.3 Selezione delle specie adatte alle colture energetiche	68
4.4 Quali terreni destinare alle colture energetiche	72
4.4.1 Terreni adatti: vocazionalità tramite GIS	72
4.4.2 Terreni disponibili: terreni agricoli abbandonati e set-aside	73
4.4.3 Assegnazione di ciascuna coltura ai terreni a maggiore vocazionalità disponibili	74

4.4.4	Localizzazione degli impianti.....	74
4.5	Flussi di gas serra	75
4.6	Caso studio: applicazione all'Emilia-Romagna	75
4.6.1	Potenziale regionale delle colture energetiche	76
4.6.2	Mitigazione dei CCG tramite le colture energetiche	79
4.7	Discussione e conclusioni.....	80
4.8	Bibliografia.....	81
5	Biomasse residuali	85
5.1	I sottoprodotti agricoli	85
5.2	I sottoprodotti forestali	89
5.3	I residui dell'industria del legno.....	94
5.4	Caso di studio: applicazione all'Emilia-Romagna	96
5.4.1	Sottoprodotti agricoli in Emilia-Romagna	96
5.4.2	Sottoprodotti forestali in Emilia-Romagna.....	102
5.4.3	Residui dell'industria del legno in Emilia-Romagna	107
5.5	Disponibilità di biomasse residuali totale.....	107
5.6	Bibliografia.....	109
6	Localizzazione ottima e valutazione energetica, emissiva ed economica	113
6.1	Introduzione.....	113
6.2	Scenari di raccolta, produzione e utilizzo.....	114
6.2.1	Disponibilità di biomasse	114
6.2.2	Impianti di produzione di energia.....	115
6.2.3	Alternative di utilizzo delle biomasse	116
6.3	Formulazione del problema decisionale	116
6.3.1	Variabili di decisione.....	116
6.3.2	Le funzioni obiettivo	117
6.3.3	Calcolo dei costi e benefici legati all'utilizzo energetico delle biomasse 118	
6.3.4	Vincoli e risoluzione.....	121
6.4	Caso di studio: applicazione alla provincia di Cremona	122
6.5	Conclusioni.....	124
6.6	Bibliografia.....	125
7	Produrre biocombustibili a emissioni zero	127
7.1	Introduzione.....	127
7.1.1	Tecnologie per la conversione in energia	128
7.1.2	Biomasse in ingresso	129
7.2	Localizzazione dell'impianto di conversione	130
7.3	Approvvigionamento dei combustibili	131
7.3.1	Approvvigionamento del carbone	132
7.3.2	Approvvigionamento delle biomasse	132
7.4	Emissioni a monte dell'impianto di conversione	134
7.5	Tecnologie di conversione.....	135
7.5.1	Prestazioni dell'impianto e flussi del carbonio.....	136
7.6	Risultati e conclusioni	138
7.7	Bibliografia.....	142

8	Conclusioni.....	143
8.1	Bibliografia.....	149
	Appendice I.....	151
	Processi termochimici	151
	Processi biochimici.....	152
	Appendice II	155
	L'agricoltura in Italia.....	155
	Appendice III.....	159
	Schema dell'impianto C-V-FT alimentato a carbone e dell'impianto CB-V-FT alimentato a carbone e biomassa	159

Indice delle figure

Figura 2.1: Andamento della concentrazione di CO ₂ 1958-2005 a Mauna Loa (Keeling e Whorf, 2005; Tans, 2007).....	5
Figura 2.2: Temperatura media globale; sulla sinistra è misurata l'anomalia rispetto al 1961-1990, sulla destra è indicata la temperatura media globale; i trend lineari sono mostrati per gli ultimi 25, 50, 100 e 150 anni (Solomon <i>et al.</i> , 2007).	7
Figura 2.3: le quattro principali economie globali e il loro contributo alle emissioni di CO ₂ (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature © 2007).	7
Figura 2.4: Emissioni di gas serra in Italia dal 1990 al 2004 (APAT, 2006).	8
Figura 2.5: Le linee spesse sono le medie globali di più modelli del riscaldamento della superficie (rispetto al periodo 1980-1999) per gli scenari A2, A1B e B1; le aree ombreggiate indicano l'intervallo di più o meno una deviazione standard delle medie annuali di ogni singolo modello. Le barre grigie a destra indicano la miglior stima (linea solida all'interno di ciascuna barra) e l'intervallo di probabilità valutato per i sei scenari di riferimento SRES (IPCC, 2007a).	10
Figura 2.6: Andamento dal 1971 al 2005 dei consumi finali di energia per regione, in Mtep (figura riprodotta con l'autorizzazione della IEA, Key world energy statistics © 2007, pag. 28).	12
Figura 2.7: Energia primaria pro capite (figura riprodotta con l'autorizzazione della IEA, IEA Energy Statistics © 2007, http://www.iea.org/Textbase/country/maps/world/tpes.htm).	13
Figura 2.8: Relazione tra l'indice di sviluppo umano e i consumi di energia primaria pro capite (IEA, 2007a; UNDP, 2006).....	13
Figura 2.9 : Trend di popolazione urbana e rurale a livello globale (UN, 2006).	14
Figura 2.10: Andamento della domanda globale di energia primaria per fonte nello scenario di riferimento (figura riprodotta con l'autorizzazione della IEA, World Energy Outlook © 2005, Figura 2.1, pag. 83).	15
Figura 2.11: Andamento del prezzo di petrolio, carbone e gas naturale (The Economist, 2007a) (c) The Economist Newspaper Limited, London. All rights reserved. This material may not be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior permission of The Economist Newspaper Limited.....	16
Figura 2.12: Consumo lordo per fonte nei paesi EU-25 (EU, 2006).....	17
Figura 2.13: Consumi finali di energia per settore nei paesi EU-25 (Eurostat, 2007). ..	17
Figura 2.14: Andamento dei consumi di energia per fonte, dell'intensità energetica e del carbonio in Europa (Commissione Europea, 2005a).....	18
Figura 2.15: Consumi finali di energia per settore in Italia (Eurostat, 2007).....	19
Figura 2.16: I 7 “cunei” per la stabilizzazione, in inglese <i>stabilization wedges</i> , delle emissioni di carbonio (Pacala e Socolow, 2004; riprodotto con l'autorizzazione della AAAS).	20
Figura 2.17: Energia primaria in Italia nel 2001 per fonte (Berlen, 2004).....	24

Figura 2.18: Sistema di CCS; sono mostrate le possibili fonti di carbonio e le opzioni di trasporto e stoccaggio (IPCC, 2005).....	25
Figura 3.1: Schema delle varie tipologie di biomasse e loro provenienza.	34
Figura 3.2: Fasi del processo di generazione di energia da biomassa.	35
Figura 3.3: Energia primaria per fonte a livello mondiale (IEA, 2005).	39
Figura 3.4: Offerta potenziale di biomasse (in EJ l'anno) per l'energia al 2100 come previsto da diversi studi (). È indicato l'attuale consumo globale di energia primaria, pari a 365 EJ/anno nel 1999-2000 (ristampato da Biomass & Bioenergy 25, Berndes <i>et al.</i> , The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, © 2003, con il permesso di Elsevier).	41
Figura 3.5: contributo dei paesi industrializzati e in via di sviluppo all'offerta globale di biomasse secondo diversi studi (ristampato da Biomass & Bioenergy 25, Berndes <i>et al.</i> , The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, © 2003, con il permesso di Elsevier).	41
Figura 3.6: Potenzialità delle biomasse nei paesi dell'EU15 secondo diversi scenari (1, breve periodo 10-20 anni; 2, medio periodo 20-40 anni; 3, lungo periodo, oltre 40 anni; <i>a</i> e <i>b</i> invece distinguono rispettivamente un alto e un basso prelievo della biomassa forestale e dei residui agricoli); la prima barra mostra l'uso di biomasse nell'EU15 nel 2001; la seconda barra mostra l'obiettivo di energia da biomasse al 2010 della Commissione Europea (ristampato da Biomass & Bioenergy 30, Ericsson e Nilsson, Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach, © 2006, con il permesso di Elsevier).	42
Figura 3.7: contributo di specifici settori all'offerta globale di biomassa secondo diversi studi (ristampato da Biomass & Bioenergy 25, Berndes <i>et al.</i> , The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, © 2003, con il permesso di Elsevier).....	43
Figura 3.8: : processi di conversione energetica relativi alle diverse tipologie di biomasse.	46
Figura 3.9: Localizzazione dei principali impianti di teleriscaldamento in Alto Adige.	48
Figura 3.10: Ciclo del biossido di carbonio legato all'utilizzo di biomasse come combustibile.	53
Figura 4.1: Schema del metodo proposto per la selezione delle aree adatte per la coltivazione di colture per l'energia.	66
Figura 4.2: resa per turno di taglio per le colture arboree ed erbacee.	69
Figura 4.3: elevazione del terreno e mappa di uso del suolo dell'Emilia-Romagna.	76
Figura 4.4: terreno potenzialmente adatto alla coltivazione dei cloni del pioppo I-214, BL Costanzo e Lux, salice e robinia; si noti che il clone Lux e il salice possono essere coltivati secondo le stesse esigenze sui medesimi suoli.	78
Figura 4.5: Terreno agricolo marginale per comune che può essere destinato alla coltivazione di specie arboree a seconda dell'area ottimale disponibile in ogni comune.	79
Figura 4.6: Terreno agricolo in set-aside per comune che può essere destinato alla coltivazione di specie sorgo a seconda dell'area ottimale disponibile in ogni comune.	79

Figura 5.1: Relazione tra la percentuale di copertura del suolo e la quantità di residui agricoli raccolti nel caso di un campo non irrigato coltivato a grano e legumi annuali negli USA (Andrews, 2006).	87
Figura 5.2: informazioni necessarie per la stima delle biomasse forestali.	93
Figura 5.3: Estensione delle colture in regione (Regione Emilia Romagna, 2004).	96
Figura 5.4: Andamento delle rese (ton/ha) medie regionali dei prodotti agro-alimentari dal 1996 al 2004 (Regione Emilia Romagna).	97
Figura 5.5: Figura 2.3: distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dal frumento duro.	100
Figura 5.6: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dal frumento tenero.	100
Figura 5.7: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dal granoturco.	100
Figura 5.8: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dall'orzo.	101
Figura 5.9: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dalla soia.	101
Figura 5.10: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dalla vite.	101
Figura 5.11: Origine dei residui agricoli per provincia e in tutta la regione.	102
Figura 5.12: Frequenze dei boschi nell'Appennino Emiliano Romagnolo rilevate dall'Inventario Forestale della regione (1997).	105
Figura 5.13: Figura 6 Frequenze dei boschi rilevate dalla cartografia vettoriale di Uso del suolo del 2003.	105
Figura 5.14: distribuzione spaziale in Regione della biomassa ricavabile dai residui forestali.	108
Figura 5.15: Distribuzione spaziale in Regione della biomassa ricavabile dagli scarti dell'industria del legno.	108
Figura 5.16: Figura 12 Suddivisione della biomassa totale con e senza SRF.	109
Figura 5.17: Distribuzione spaziale in Regione della biomassa totale comprese le SRF.	109
Figura 6.1: Le tre alternative di utilizzo della biomassa si distinguono per la tipologia e la quantità di biomassa in ingresso, per l'impianto considerato e per la produzione di energia termica e/o elettrica; il trasporto della biomassa dal luogo di raccolta a quello di utilizzo è considerato in tutte le alternative.	118
Figura 6.2: mappa della disponibilità di biomasse residuali (sinistra) e di biomasse da SRF (destra) in provincia di Cremona.	122
Figura 6.3: Localizzazione impianti e bacini di conferimento, caso I – obiettivo energetico.	124
Figura 7.1: mappa delle contee considerate, delle rese in mais.	130
Figura 7.2: nella mappa sono indicate le miniere di carbone funzionanti (in nero) e non (in bianco) nel 1996 (Stiff, 1997). È inoltre indicato lo spessore del Mt. Simon Sandstone (MGSC, 2005); la CCS è possibile per spessore maggiori di 501 feet.	131

Figura 7.3: configurazione del processo di conversione per il sistema energetico (a) C-FT-V, solo carbone in ingresso, carbonio emesso in atmosfera; (b) C-FT-CoC, solo carbone in ingresso, carbonio in CCS; (c) CB-FT-CoC, carbone e biomasse in ingresso, carbonio in CCS.	136
Figura 7.4: CB-FT-CoC: caratteristiche dei combustibili in ingresso (biomasse e carbone) e dei prodotti in uscita (energia elettrica, liquidi FTL) all'impianto di conversione; flussi di carbonio in tonnellate per giorno.....	139
Figura 7.5: diagram of carbon and energy flows in the C-FT-V case.	140
Figura 7.6: Diagram of carbon and energy flows in the C-FT-CoC case.....	141
Figura 7.7: Diagram of carbon and energy flows in the C/B-FT-CoC case; this solution gives zero net emissions to the atmosphere.....	141

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Caratteristiche dei principali gas serra (in aggiunta al vapore acqueo).....	4
Tabella 2.2: Valore assoluto (10^{12} kg = 1 Pg = 1000 megaton) e relativo (%) delle emissioni di CO ₂ nelle principali aree del mondo (Netherlands Environmental Assessment Energy, 2007).	7
Tabella 2.3: primary energy world reserves, production and consumption (BP, 2007; UNDP, 2004).	11
Tabella 2.4: contributo per fonte alla domanda globale di energia primaria nel 2006 (IEA, 2007a).	11
Tabella 2.5: Popolazione mondiale e consumi finali di energia nel 2005 per regione (IEA, 2007a).	12
Tabella 2.6: Principali tecnologie e pratiche di mitigazione per settore. I settori e le tecnologie sono elencate senza un ordine particolare. Le pratiche non tecnologiche, come il cambiamento dello stile di vita, che sono trasversali, non sono incluse in questa tabella (IPCC, 2007b)	21
Tabella 2.7: Quadro riassuntivo della situazione attuale e degli obiettivi del Libro Bianco sulle fonti rinnovabili (Berlen, 2004).....	23
Tabella 2.8: Capacità globale di stoccaggio di CO ₂ (Herzog e Golomb, 2004).	26
Tabella 2.9: Emissioni di CO ₂ equivalente nel 1990, 2000 e in 2 scenari per il 2010 (www.minambiente.it, 2005).	30
Tabella 3.1: Proprietà di alcuni tipi di biomassa (Quaak <i>et al.</i> , 1999).	36
Tabella 3.2: Composizione elementare media della biomassa (Quaak <i>et al.</i> , 1999).	36
Tabella 3.3: Indici caratterizzanti la produzione di biomassa in colture arboree.	37
Tabella 3.4: Resa energetica di alcuni tipi di biomassa (McKendry, 2002a).	37
Tabella 3.5: Incidenza delle biomasse sulla produzione energetica totale (IEA, 2005).	39
Tabella 3.6: Classificazione delle colture energetiche e dei relativi prodotti.....	44
Tabella 3.7: Principali processi di conversione della biomassa	47
Tabella 3.8: Energia termica da biomassa in Italia, valori in TJ (Enea, 2004).	47
Tabella 3.9: Impianti di teleriscaldamento da biomassa in Italia (ITABIA, 2005; Provincia Autonoma di Bolzano, 2006)	48
Tabella 3.10: Impianti di produzione di energia elettrica da biomasse in Italia (Itabia, 2005).	49
Tabella 3.11: Caratteristiche dei combustibili legnosi.	51
Tabella 3.12: Caratteristiche dei pellets	52
Tabella 3.13: Composizione tipica e potere calorifico di biomassa vergine, proveniente da residui (reflui zootecnici e rifiuti solidi urbani), torba e carbone (Klass, 1998).	58
Tabella 3.14: stima della combustione stechiometrica per alcuni combustibili solidi (Klass, 1998).	59

Tabella 3.15: Concentrazione di alcuni inquinanti in mg/m^3 al camino di piccoli impianti domestici alimentati a biomasse. L'efficienza della combustione è espressa come $= [\text{CO}_2] / ([\text{CO}_2] + [\text{CO}])$ (fonte: Kjällstrand e Olsson, 2004).	59
Tabella 3.16: limiti di emissione in funzione della potenza termica nominale complessiva installata (MW) _a (DPCM 8/3/2002) (in corsivo i valori medi giornalieri).	60
Tabella 4.1: caratteristiche delle colture energetiche; la resa annuale è mediata su tutta la durata del ciclo colturale.....	70
Tabella 4.2: SRF operations; over the life cycle, numbers stand for the year when each operation takes place.	71
Tabella 4.3: Consumi di energia in MJ/ha per le operazioni colturali e per il trasporto. I fattori di emissione per il diesel sono: $74 \cdot 10^3 \text{ kg CO}_2/\text{MJ}$, $0.04 \cdot 10^3 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{MJ}$, $0.028 \cdot 10^3 \text{ kg CH}_4/\text{MJ}$. Si assume che l'energia necessaria per la produzione di fertilizzanti e prodotti fitosanitari sia fornita da energia elettrica; le emissioni prodotte da 1 kWh sono 0.58 kg CO_2	72
Tabella 4.4: flussi di carbonio equivalente per ogni specie; i cloni del pioppo I-214 e BL Costanzo sono soggetti alle stesse operazioni colturali.	75
Tabella 4.5: uso del suolo nel settore agricolo in Emilia-Romagna (ISTAT, 2000).....	76
Tabella 4.6: potenzialità di mitigazione delle emissioni di GHG delle colture energetiche; ; le alternative per il pioppo di alti (HI) e bassi (LI) input colturali sono descritti in Figura 4.2 per le rese e Tabella 4.2 per le attività colturali.	78
Tabella 5.1: Parametri per la stima della quantità di residuo rispetto alla quantità di prodotto principale delle colture agricole.....	86
Tabella 5.2: Categorie di residui delle colture tradizionali e loro attuale utilizzo (Itabia, 2003).....	87
Tabella 5.3: Categorie di residui delle colture tradizionali e loro attuale utilizzo (Itabia, 2003).....	88
Tabella 5.4: Parametri utilizzati per la stima della biomassa proveniente dai residui agro-alimentari (Anpa e Onr, 2001).	89
Tabella 5.5: Estensione delle macrocategorie inventariali Bosco e Altre terre boscate, secondo FRA2000 (IFN, 2007)	90
Tabella 5.6: volume complessivo dei prelievi legnosi, in bosco e fuori foresta (ISTAT, 2002, 2003, 2004, 2005).....	90
Tabella 5.7: Utilizzazioni legnose per assortimento e specie legnosa - Anno 2003 (ISTAT, 2005).	91
Tabella 5.8: Caratteristiche dei boschi cedui nazionali - Anno 1997 (Bernetti, 1998). .	91
Tabella 5.9: classificazione della pendenza (Regione Piemonte, 2002).....	93
Tabella 5.10: Distanze per accessibilità buona e scarsa in funzione della classe di pendenza (Regione Piemonte, 2002).....	93
Tabella 5.11: Rese in (ton tq/ha) per coltura e provincia, dati relativi al 2004 (Regione Emilia-Romagna, 2006).	97

Tabella 5.12: Disponibilità di biomassa in regione suddivisa per provincia e tipologia di residuo.	99
Tabella 5.13: Disponibilità di biomassa in regione per coltura applicando due percentuali di raccolta.....	102
Tabella 5.14: Estensione, valori medi ed errore standard di numero di alberi, area basimetrica, volume ed incremento corrente dei singoli tipi di bosco (IFR, 2006).	103
Tabella 5.15: Massa legnosa nei boschi della regione, accrescimento e utilizzazione annui (Piano forestale regionale, 2006).....	104
Tabella 5.16: Corrispondenza dei dati tra la carta dell'uso del suolo e il Piano Forestale (2006).	106
Tabella 5.17: Estensione in ettari delle aree boscate per tipologia di bosco.	106
Tabella 5.18: Biomassa ricavabile dai residui forestali e dagli scarti dell'industria del legno.	107
Tabella 5.19: Biomassa totale suddivisa per provincia.	108
Tabella 6.1: quantità di residui, frazione disponibile e umidità per le quattro colture più diffuse in provincia di Cremona (tonnellate di residui umidi per tonnellata di prodotto principale), per la lavorazione del legno (tonnellate di sottoprodotto umido per addetto) e per le superfici biscalate (percentuale dell'area sottoposta diramanti).....	115
Tabella 6.2: Caratteristiche della SRF di pioppo.....	115
Tabella 6.3: Parametri che descrivono il territorio considerato e la biomassa presente.	119
Tabella 6.4: Parametri che compongono gli obiettivi energetico, emissivo ed economico.....	119
Tabella 6.5: Stima della quantità di biomasse utilizzabili nella provincia di Cremona.	122
Tabella 6.6: Valori ottimi degli obiettivi energetico, emissivo ed economico per le tre alternative; confronto con il consumo di energia elettrica e di combustibili fossili del 1996 e con le emissioni di CO ₂ del 2001.....	123
Tabella 7.1: Caratteristiche dei combustibili in ingresso, biomassa e carbone, e dei liquidi FTL in uscita.	131
Tabella 7.2: Generazione di elettricità in Illinois, marzo 2007 (EIA, 2007).....	132
Tabella 7.3: Costi delle operazioni logistiche di raccolta e trasporto delle <i>prairie grasses</i>	134
Tabella 7.4: Tassi di emissione a valle della conversione nell'impianto; l'emissione ha valori positivi, il sequestro ha valori negativi (Argonne National Laboratory, 2007; Tilman <i>et al.</i> , 2006).	135
Tabella 7.5: Prestazioni complessive dei tre sistemi energetici.	137
Tabella 7.6: Flussi di carbonio per i tre sistemi energetici; i flussi sono espresso in tonnellate di carbonio per giorno.....	137
Tabella 7.7: Sintesi dei costi di produzione delle biomasse e dei guadagni degli imprenditori agricoli nel caso di conversione della coltivazione da mais a <i>prairie grasses</i> per l'energia.....	140

Ringraziamenti

Desidero ringraziare calorosamente i professori che mi hanno accompagnata nel percorso di studi e di ricerca: hanno sempre dimostrato una grandissima disponibilità e amicizia nell'aiutarmi a sviluppare il progetto di tesi e, insieme a me, si sono appassionati al tema delle biomasse per l'energia. In particolare, grazie a Marino Gatto per l'occasione offertami di lavorare insieme, per tutte le mail e le correzioni con la penna rossa. Grazie a Giorgio Guariso per i lavori svolti insieme, per l'idea di pubblicare un libro e per le discussioni. Grazie a Giulio De Leo per aver sempre mostrato grande entusiasmo nel nostro lavoro. Infine, grazie a tutti per aver usato Skype a tutte le ore per parlare con me.

Dedico inoltre un ringraziamento particolare al professor Stefano Consonni, a Bob Williams e a Eric Larson con cui ho potuto collaborare presso il Princeton Environmental Institute.

Un caro saluto ai colleghi del DEI e agli studenti del LITA con cui ho condiviso molti caffè, pranzi e discussioni, ai colleghi e agli amici di Parma e di Princeton. In particolare, ringrazio Luca Bolzoni, per essere stato il mio agente a Parma e per tutte le volte che mi ha aiutato; Gianmarco Paris, per avermi aiutato con i GIS; Antonio Lazzarin e Renato Razzano, per aver scritto insieme a Giorgio Guariso e me un best-seller; Fabrizio Ferrari, per avermi aiutato nella realizzazione di parte del lavoro.

Ringrazio il MIUR per aver finanziato i periodi trascorsi presso il Princeton Environmental Institute nell'ambito del progetto di internazionalizzazione Interlink (II04CE49G8). Un ringraziamento anche alla Regione Emilia-Romagna per aver finanziato il progetto ECATE presso il LEAP, Laboratorio Energia e Ambiente di Piacenza, nell'ambito del quale si sviluppa parte del lavoro di tesi. Infine, un sentito ringraziamento alla Provincia di Cremona che per prima ha mostrato interesse verso le bioenergie e che è stata l'origine di tutto.

Un affettuoso ringraziamento a Lucia, Enrico e Claudio Landoni per la consulenza e a Giorgio Alicante per il cioccolato.

Il ringraziamento più caloroso ai miei genitori per avermi sempre spronato, per il supporto morale, le nuotate e i ritagli di giornale che mi hanno seguito in giro per il mondo. Un grazie dal cuore a Paolo che mi ha accompagnata, incoraggiata e resa felice in questi anni.

1 Introduzione

Le biomasse sono una fonte rinnovabile di energia la cui caratteristica principale è di essere intrinsecamente legata al territorio, sono infatti disponibili ovunque e largamente diffuse, anche se in qualità e quantità diverse. Proprio per la loro diversità sono disponibili numerose tecnologie di conversione che producono altrettante forme finali di energia (energia elettrica e/o termica, combustibili liquidi, biogas). Infine, poiché le biomasse sono diffuse sul territorio è necessario organizzarne la raccolta e il trasporto o, addirittura, la coltivazione stessa in colture energetiche dedicate. L'utilizzo delle biomasse a scopo energetico è uno degli strumenti indicati per la riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera: il bilancio della CO₂ relativo alla conversione delle biomasse in energia è considerato neutro. Le emissioni di CO₂ prodotte dalla biomassa sono compensate dalla quantità di CO₂ assorbita, attraverso la fotosintesi, durante la crescita della biomassa stessa. Al bilancio bisogna aggiungere le emissioni di CO₂ equivalenti derivate dal trasporto e dalle altre attività correlate alla produzione, raccolta e trattamento delle biomasse. Da questa breve introduzione, emerge chiaramente la necessità di studiare con attenzione i sistemi di produzione di energia da biomasse, intendendo con sistemi non solo l'impianto di conversione in energia, ma anche ciò che si trova a valle, approvvigionamento delle biomasse, e a monte, i flussi di gas serra e l'utilizzo finale dell'energia. Obiettivo di questo studio è quindi fornire un metodo per analizzare la produzione di energia derivante dalle biomasse in un dato territorio. In particolare, l'obiettivo è rispondere alle seguenti domande:

- Quali sono le potenzialità delle biomasse per la produzione di energia da fonti rinnovabili e per la mitigazione dei cambiamenti climatici?
- Quali sono le potenzialità della conversione alla bioenergia dei suoli agricoli?
- Le biomasse residuali possono contribuire alla disponibilità di biomasse per l'energia?
- I costi del trasporto (sia in termini di emissioni GHG, di energia spesa, di costi) possono essere controllati tramite la pianificazione della localizzazione degli impianti di trasformazione?
- I biocombustibili liquidi sono una vera alternativa ai combustibili fossili?
- Come si può affrontare la questione della biodiversità e dell'utilizzo sostenibile delle biomasse?

Nel capitolo 2 si introducono le tematiche che riguardano i cambiamenti climatici e la questione energetica per poter comprendere il contesto internazionale e nazionale in cui i temi legati allo sfruttamento delle biomasse devono inserirsi. Il capitolo 3 è dedicato alla descrizione delle biomasse, alle loro caratteristiche e utilizzi per la produzione di energia e, quindi, a benefici e criticità che comportano. Nel capitolo 4 è formulata una metodologia per stimare la potenzialità di un territorio nella produzione di biomasse attraverso l'individuazione dei suoli ottimali ad oggi potenzialmente convertibili a colture energetiche dedicate. Nel capitolo 5 viene descritto un metodo per stimare la potenzialità delle biomasse residuali, in particolare da residui delle principali colture alimentari, da sottoprodotti della lavorazione del legno nelle industrie di settore e, infine, da residui della manutenzione delle foreste. Per entrambi questi capitoli, il

metodo presentato è applicato alla regione Emilia-Romagna. Nel capitolo 6 si affronta il problema della localizzazione ottima degli impianti di conversione a partire dalla disponibilità di biomasse a livello locale, dalla rete stradale e dalle caratteristiche dell'impianto di conversione. Il problema di ottimizzazione formulato serve quindi per definire la localizzazione ottimale degli impianti di conversione e i relativi bacini di conferimento. Il metodo presentato in questo capitolo è applicato alla provincia di Cremona. Nel capitolo 7 è descritto un sistema energetico alimentato a carbone e a biomasse che produce energia elettrica e biocombustibili e con la cattura e lo stoccaggio del carbonio nel sottosuolo; il sistema è dimensionato in modo che le emissioni di CO₂ in atmosfera del sistema siano nulle. Nel capitolo 8, infine, si riassumono i risultati ottenuti e, rilevando punti deboli e futuri ambiti di ricerca, si traggono le conclusioni del lavoro.

2 I cambiamenti climatici e la questione energetica

«Gli antropologi affermano che la quantità di energia consumata pro capite sia un buon indice dello stato di avanzamento di una società. Ebbene, negli ultimi duecento anni le società occidentali hanno utilizzato più energia di tutte le altre civiltà che si sono avvicendate sul nostro pianeta. Abbiamo raggiunto un tenore di vita senza precedenti e dobbiamo questa fortuna a giacimenti di combustibili fossili formatisi milioni di anni fa. Una manna, certo. Che però non è venuta dal cielo, ma delle viscere della terra».

Jeremy Rifkin, 2002

Le parole dell'economista Jeremy Rifkin, tratte da "Economia all'idrogeno" (2002), esprimono con efficacia un concetto ben noto: ai consumi energetici sono strettamente connessi la qualità della vita e gli impatti ambientali. Fin dal secolo scorso, epoca caratterizzata da un notevole sviluppo tecnologico ed economico, si è riscontrata una forte correlazione tra tale crescita e i consumi energetici. L'energia è uno dei fattori trainanti dell'economia mondiale. La produzione di energia primaria, a livello globale, è quasi raddoppiata dal 1973 al 2005 (passando da 6.128 a 11.435 milioni di tonnellate di petrolio equivalente) e ci si attende un ulteriore raddoppio dei consumi nei prossimi anni (IEA, 2007a). La straordinaria crescita dei consumi, non solo di energia primaria, ha aumentato le pressioni sull'ambiente, trainata anche dall'aumento della popolazione umana (da 1,6 miliardi nel 1900 a oltre 6 miliardi nel 2000; UN, 2005). La superficie coltivata, a livello globale, è cresciuta dal 1961 al 2001 del 10% (da 5.023 a 5.562 milioni di ettari) e si prevede che continui ad aumentare fino a circa 6.000 milioni di ettari nel 2020 (Smith *et al.*, 2007); la produzione alimentare, invece, è triplicata negli ultimi 50 anni (Mosier *et al.*, 2004). Inoltre il clima terrestre sta modificandosi ad una velocità senza precedenti per cause non solo naturali, bensì principalmente antropogeniche. Il rapporto dell'Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) pubblicato all'inizio del 2007 non lascia molti dubbi al proposito. Nel rapporto si afferma che "il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile, come è ora evidente dalle osservazioni dell'aumento delle temperature medie globali dell'aria e delle temperature degli oceani, dello scioglimento diffuso di neve e ghiaccio, e dell'innalzamento del livello del mare medio globale" (IPCC, 2007a).

2.1 I cambiamenti climatici globali

Alcuni gas presenti nell'atmosfera, i cosiddetti gas serra (GHG, dall'inglese *Green House Gases*) sono in grado di assorbire il calore di una parte delle radiazioni solari destinate, in assenza di tali gas, alla dispersione verso lo spazio, dopo essere state riflesse dalla superficie della Terra. La radiazione solare incidente è pari in media a 342 W m^{-2} . Facendo pari a 100 unità la costante solare, si può descrivere sinteticamente il bilancio planetario globale limitandosi in prima approssimazione ai tre comparti più importanti: stratosfera, troposfera e superficie terrestre. Ciascuno di questi tre comparti deve essere più o meno in equilibrio termico e quindi la differenza tra i flussi di calore entranti e uscenti in ogni comparto deve essere pari a zero. I flussi termici sono tutti radiativi, a parte quelli ceduti dalla superficie della terra sotto forma di calore sensibile

(che si traduce nei moti convettivi dell'atmosfera) e di calore latente (legato all'evaporazione delle masse d'acqua). La radiazione proveniente dal sole è praticamente tutta formata da onde corte e di essa circa il 20% è assorbito dall'atmosfera, circa il 30% è riflesso sotto forma di onde corte dall'aria, dalle nubi e dalla superficie terrestre mentre il rimanente 50% è assorbito dalla superficie terrestre. Poiché le temperature della superficie terrestre e dell'atmosfera sono molto minori di quella del sole, le radiazioni vengono emesse nello spettro delle onde lunghe (legge di Wien). In particolare la superficie terrestre emette una radiazione infrarossa di potenza pari a più del 110% della costante solare. Una grandissima parte di queste onde lunghe è catturata dalle nubi, dal vapor d'acqua, dall'ozono, dal metano, dall'anidride carbonica e da altri gas presenti nella troposfera e nella stratosfera. Ecco perché si dice che sono dei gas serra: essi sono infatti in grado di trattenere il calore nell'atmosfera. Quest'ultima irraggia anch'essa onde lunghe, di cui più della metà verso la superficie terrestre (radiazione di ritorno). In complesso, la superficie terrestre riceve 50 unità dal sole nello spettro visibile e 89 unità dall'atmosfera nell'infrarosso per un totale di 139 unità, mentre cede 110 unità per irraggiamento di onde lunghe e 29 unità come calore sensibile e latente sempre per un totale di 139 unità. È quindi chiaro che la temperatura della superficie della terra è fondamentalmente determinata dalla radiazione di ritorno. Se, da una parte, i gas serra permettono di mantenere la superficie della terra a una temperatura relativamente calda (senza di essi la temperatura sarebbe di circa -18°C), dall'altro un aumento anche modesto della loro concentrazione porta a incrementi apprezzabili della temperatura media della superficie terrestre e può comportare effetti climatici rilevanti; a oggi, la comunità scientifica internazionale è unanime nel riconoscere queste relazioni (IPCC, 2007a). I principali gas serra (Tabella 2.1) sono: il biossido di carbonio (CO_2), i clorofluorocarburi (CFC), il metano (CH_4), il protossido di azoto (N_2O), l'ozono troposferico (O_3).

Tabella 2.1: Caratteristiche dei principali gas serra (in aggiunta al vapore acqueo).

Gas serra	Concentrazione 1750	Concentrazione 1998	Cambiamento percentuale	Cause naturali e antropogeniche
Anidride carbonica	280 ppm	365 ppm	30 %	Decomposizione; Incendi; Vulcani; Combustibili fossili; Deforestazione; Cambiamenti di uso del suolo
Metano	0,70 ppm	1,75 ppm	150 %	Zone umide; Decomposizione; Termiti; Estrazione di gas naturale e di petrolio; Combustione di biomasse; Coltivazione del riso; Bestiame; Discariche
Protossido di azoto	280 ppb	314 ppb	12 %	Foreste; Praterie; Oceani; Suoli; Coltivazione dei suoli; Fertilizzanti; Combustione di biomasse; Combustibili fossili
Clorofluorocarburi (CFC)	0	900 ppt		Refrigeranti; Propellenti spray; Solventi
Ozono	Sconosciuta	Varia con la latitudine e con la quota in atmosfera	Decrementato nella stratosfera e incrementato vicino alla superficie terrestre	Creato naturalmente dall'azione della luce solare sull'ossigeno molecolare e artificialmente come smog fotochimica

Per meglio definire l'apporto che ciascun gas serra fornisce al fenomeno del riscaldamento globale, si utilizza il potenziale di riscaldamento globale (Global

Warming Potential, GWP). Questo valore rappresenta il rapporto fra il riscaldamento globale causato in un determinato periodo di tempo (di solito 100 anni) da un chilogrammo di una particolare sostanza e il riscaldamento provocato da un chilogrammo di biossido di carbonio (CO_2). Così, posto il GWP della CO_2 pari a 1, il metano ha GWP pari a 21, il CFC-12 pari a 8.500, mentre il CFC-11 pari a 5.000; vari HCFC e HFC hanno un GWP variabile fra 93 e 12.100. L'esafluoruro di zolfo è un gas serra estremamente potente e ha un GWP pari a 23.900, il che vuol dire che una tonnellata di SF_6 provoca un aumento dell'effetto serra pari a quello causato da 23.900 tonnellate di CO_2 . Una misura utilizzata per comparare le emissioni dei vari gas serra sulla base del loro potenziale di riscaldamento globale sono gli equivalenti di biossido di carbonio (carbon dioxide equivalent), comunemente espressi in "milioni di tonnellate di anidride carbonica". Gli equivalenti di biossido di carbonio di un determinato gas si ricavano moltiplicando le tonnellate di gas emesso per il rispettivo GWP.

Dall'inizio dell'800, con l'avvento della rivoluzione industriale, la concentrazione dei gas serra risulta in costante crescita: dalle 280 ppmv (parti per milione in volume) del 1850, è arrivata a toccare le 381 ppmv (ottobre 2006). Il trend di crescita della concentrazione di anidride carbonica è ben rappresentato nel grafico in Figura 2.1, che illustra l'incremento della concentrazione a Mauna Loa dal 1958 al 2006 (Keeling e Whorf, 2005). L'anidride carbonica svolge un ruolo determinante nel fenomeno del riscaldamento globale poiché rappresenta, a livello mondiale, oltre il 90% delle emissioni di gas serra. La CO_2 è rilasciata in atmosfera soprattutto quando vengono bruciati combustibili fossili (olio, benzina, gas naturale e carbone), rifiuti solidi, legno e prodotti derivati dal legno. Anche la deforestazione e, in generale il cambio di uso del suolo, svolge un ruolo determinante. La vegetazione infatti funge da serbatoio di CO_2 ; la distruzione di questo patrimonio ambientale contribuisce in modo decisivo all'aumento della quantità di anidride carbonica in atmosfera. Parte della CO_2 proviene anche dai terreni coltivati; i terreni contengono grandi quantitativi di sostanza organica, in particolare sotto forma di humus. Con pratiche agricole improprie, come le lavorazioni frequenti e profonde del terreno ed il suolo lasciato privo dalla copertura vegetale (specialmente nella stagione estiva), l'apporto di CO_2 dei terreni coltivati può essere consistente e non dovrebbe quindi essere sottovalutato (Paustian *et al.*, 2006).

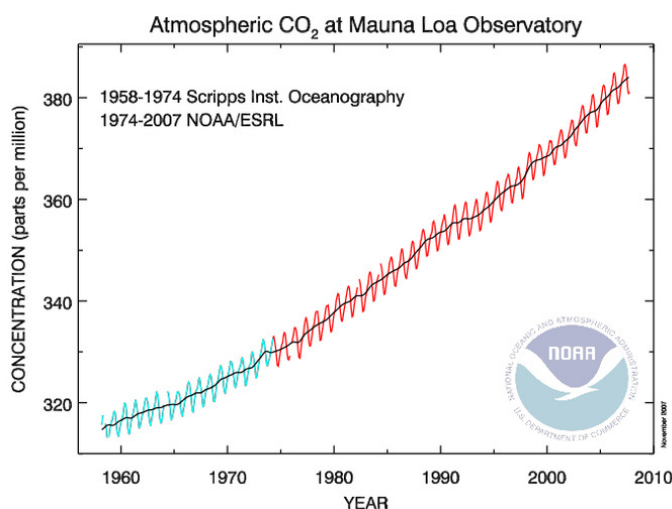


Figura 2.1: Andamento della concentrazione di CO_2 1958-2005 a Mauna Loa (Keeling e Whorf, 2005; Tans, 2007).

L'aumento degli altri gas serra è stato meno rilevante rispetto all'anidride carbonica, ma comunque significativo. La concentrazione in atmosfera di metano è aumentata del 145% negli ultimi 10 anni. Le ragioni dell'aumento della concentrazione di metano non sono evidenti come nel caso dell'anidride carbonica; le più plausibili sembrano: l'espansione degli allevamenti zootecnici (per la produzione di metano da parte dei sistemi digerenti degli animali, soprattutto a opera dei quasi 2 miliardi di bovini presenti sulla Terra), le coltivazioni di riso e la crescita dell'estrazione e dell'uso del metano. Un altro settore responsabile delle emissioni di metano è quello delle discariche di rifiuti. Il metano, infine, viene emesso durante la produzione e il trasporto di carbone, del gas naturale e dell'olio naturale. Il protossido d'azoto è emesso durante le attività agricole e industriali, come del resto nel corso della combustione dei rifiuti e dei combustibili fossili.

I rimanenti gas serra contribuiscono all'effetto serra per il 7%: tra di essi il protossido d'azoto è da ricondurre in prevalenza alle attività agricole, l'ozono alle reazioni fra gli agenti inquinanti presenti in atmosfera, i clorofluorocarburi alle industrie chimiche e manifatturiere. Si prevede una riduzione nel breve periodo della concentrazione dei CFC anche in seguito alle prescrizioni contenute nel Protocollo di Montreal del 1987. In sostituzione dei CFC è pronosticato un aumento dell'impiego di idrofluorocarburi, dei perfluorocarburi e dell'esafluoruro di zolfo.

2.1.1 Cenni fisici

L'aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera è misurato e documentato sia per epoche recenti (con i moderni strumenti a disposizione) sia per le epoche più lontane (tramite variabili proxy si risale fino a quattrocentomila anni fa). La correlazione tra l'aumento dei gas serra, in particolare della CO₂, e l'attività antropica è un fenomeno accettato dalla comunità scientifica internazionale, anche se i meccanismi non sono completamente spiegati: non è semplice valutare in modo accurato le emissioni di gas serra dovute all'attività antropica, così come non è semplice stimare i flussi di CO₂ tra oceano, foreste, suoli e atmosfera. Ancora più complesso è stabilire quale aumento di temperatura corrisponda a una variazione delle concentrazioni di gas serra. La Figura 2.2 mostra la variabilità, anche interannuale, della temperatura terrestre; in figura è evidente il trend crescente della temperatura media nel ventesimo secolo e, in particolare, negli ultimi anni. L'aumento totale della temperatura dal 1850-1899 al 2001-2005 è di $0,76 \pm 0,19^{\circ}\text{C}$; inoltre, undici degli ultimi dodici anni (1995-2006) si classificano fra i più caldi mai registrati dal 1850, cioè da quando si hanno misure globali di temperatura alla superficie (Solomon *et al.*, 2007).

2.1.2 Trend di emissione

In Tabella 2.2 sono riportate le emissioni di CO₂ nelle principali aree del pianeta. Nell'estate del 2007, la Cina ha superato gli Stati Uniti come principale emettitore di biossido di carbonio (Netherlands Environmental Assessment Agency, 2007). Le emissioni cinesi sono principalmente dovute all'utilizzo dei combustibili fossili e alle industrie del cemento (il 44% del cemento prodotto a livello mondiale è oggi usato in Cina). In Figura 2.3 sono mostrate le emissioni, la popolazione e le emissioni pro capite di Cina, USA, Europa e India: gli Stati Uniti continuano a predominare come paese con maggiori emissioni pro capite. L'intensità di carbonio, cioè la quantità di CO₂ emessa per produrre una determinata quantità di PIL (prodotto interno lordo; GDP, gross

domestic product), è peggiore in Cina. In tutte e quattro le economie, l'intensità di carbonio è diminuita dal 1990 al 2006.

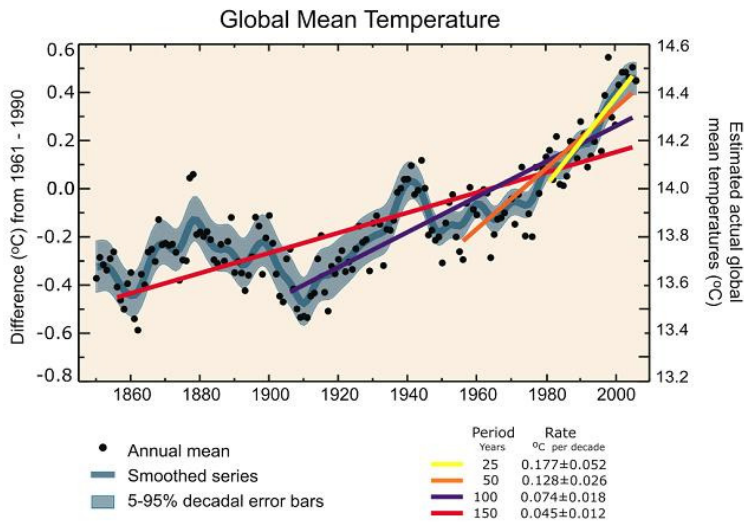


Figura 2.2: Temperatura media globale; sulla sinistra è misurata l'anomalia rispetto al 1961-1990, sulla destra è indicata la temperatura media globale; i trend lineari sono mostrati per gli ultimi 25, 50, 100 e 150 anni (Solomon *et al.*, 2007).

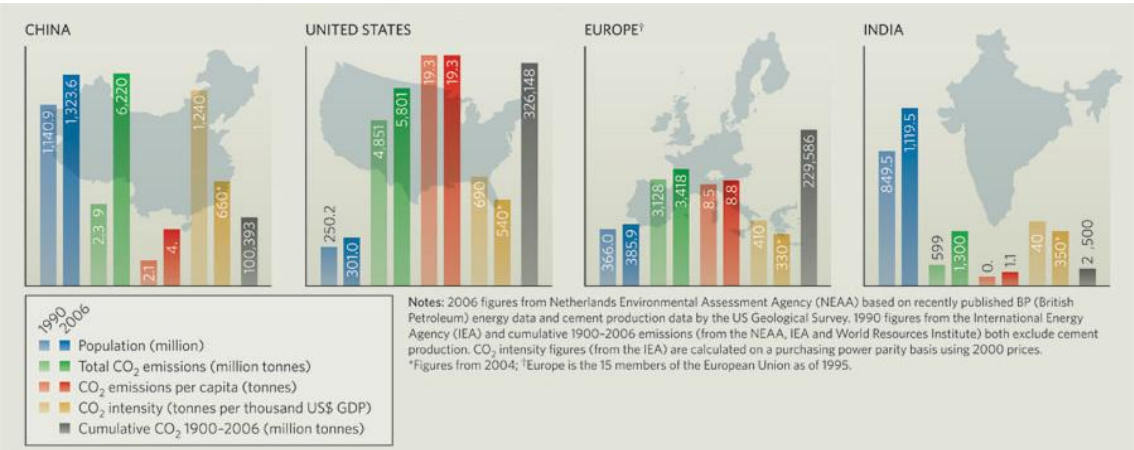


Figura 2.3: le quattro principali economie globali e il loro contributo alle emissioni di CO₂ (Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: Nature © 2007).

Tabella 2.2: Valore assoluto (10¹² kg = 1 Pg = 1000 megaton) e relativo (%) delle emissioni di CO₂ nelle principali aree del mondo (Netherlands Environmental Assessment Energy, 2007).

	USA	EU-15	Japan	Other Annex II	Russian Feder.	Other Annex I-EIT*	China	Other Big DC***	Other non-Annex I****	Intern. Transport	Total
1990	4,84	3,12	1,06	0,78	2,03	2,33	2,26	1,68	2,03	0,66	20,78
%	23,3	15,0	5,1	3,8	9,8	11,2	10,9	8,1	9,8	3,2	100,00
2006	5,75	3,33	1,21	1,05	1,62	1,62	5,68	3,06	3,95	0,89	28,16
%	20,4	11,8	4,3	3,7	5,8	5,8	20,2	10,9	14,0	3,2	100,00

L'Italia contribuisce alle emissioni globali di gas serra con il 2% circa; la Figura 2.4 riporta le emissioni percentuali dei principali GHG responsabili del rilascio di CO₂. L'Italia ha firmato il Protocollo di Kyoto, impegnandosi a ridurre nel 2010 le proprie emissioni di GHG del 6,5% rispetto all'anno base (corrispondente al 1990 per CO₂, CH₄

e N₂O ed al 1995 per HFCs, PFCs ed SF₆) di GHG al 2010. Le emissioni nazionali totali dei sei gas serra, espresse in CO₂ equivalente, sono però aumentate dal 1990 al 2002 del 9%, come mostrato nella serie storica dei dati di emissione in Italia di Figura 2.4. La CO₂ contribuisce all'85% del totale delle emissioni italiane annue, con una crescita dell'8,8% dal 1990; le emissioni relative al solo settore energetico sono aumentate del 15,3%. Anche le emissioni relative al settore rifiuti rappresentano una criticità, mentre si sono stabilizzate le emissioni del settore agricolo. Le emissioni di metano e di protossido di azoto sono pari rispettivamente a circa il 6% e l'8% del totale e presentano andamenti in diminuzione per il metano (-7,7%) e in crescita (+10,4%) per il protossido di azoto. Gli altri gas serra, HFCs, PFCs e SF₆, hanno un peso complessivo intorno all'1,5% sul totale delle emissioni; le emissioni di questi ultimi gas sono in forte crescita per quanto riguarda gli HFCs e in diminuzione per gli altri due. Anche se al momento non rilevanti ai fini del raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni, il forte trend di crescita li renderà sempre più importanti nei prossimi anni (Apat, 2006).

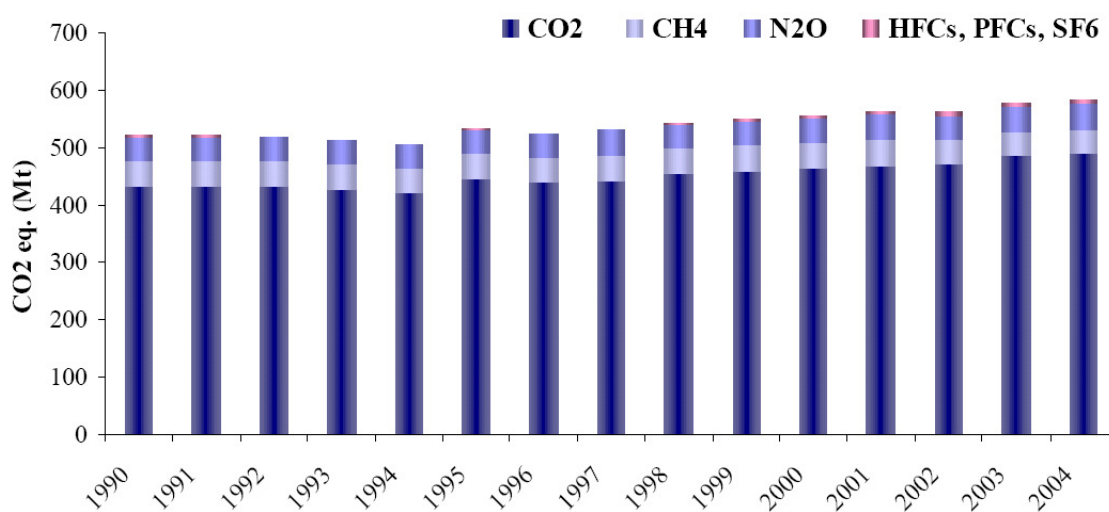


Figura 2.4: Emissioni di gas serra in Italia dal 1990 al 2004 (APAT, 2006).

2.1.3 Scenari futuri di cambiamenti climatici globali

Le emissioni future di GHG e aerosol sono il risultato di sistemi dinamici molto complessi determinati da forzanti esterne come lo sviluppo demografico e socio-economico, il settore energetico e, in generale, l'innovazione tecnologica. La loro futura evoluzione è quindi altamente incerta; le analisi sui cambiamenti climatici futuri si basano su diversi scenari possibili di emissione (per dettagli si rimanda a IPCC, 2000, in particolare al sito web <http://sres.ciesin.org/>), termine con cui l'IPCC intende: "... una descrizione solida, coerente in sé e plausibile di uno stato futuro del mondo" (IPCC, 2000). Per questo motivo, l'IPCC si riferisce sempre ad alcuni quadri alternativi, detti *storylines*, di come varieranno queste forzanti. Complessivamente, sono delineate 4 *storylines* che costituiscono le famiglie che poi raggruppano i vari scenari. Le quattro famiglie sono così caratterizzate:

- A1 (emissioni alte). Lo scenario A1 prevede uno sviluppo economico rapido nel quale le distinzioni di reddito fra paesi poveri e paesi ricchi tende a dissolversi. In A1 il trend economico e demografico sono strettamente correlati ed il benessere determina l'allungamento della vita media e famiglie di pochi individui (bassa mortalità e bassa fertilità). La popolazione globale cresce fino a 9 miliardi di individui al 2050 e declina fino a 7 miliardi al 2100. L'economia globale si espande

ad un tasso del 3% fino al 2100. Questa *storyline* si caratterizza anche per la presenza di tre sotto-famiglie di scenari distinte per la caratterizzazione tecnologica: A1FI prevede l'utilizzo intensivo di combustibili fossili, A1T prevede l'utilizzo soprattutto di fonti rinnovabili di energia e, infine, A1B prevede una situazione bilanciata tra le due precedenti.

- A2 (emissioni medio-alte). Lo scenario A2 prevede un riacutizzarsi delle tensioni internazionali con una conseguente minore cooperazione rispetto a A1 o B1. Persone, idee e capitali sono molto meno mobili cosicché anche la tecnologia ha una diffusione limitata. Lo sviluppo economico è regionalistico così come il reddito pro capite e il cambiamento tecnologico sono frammentati (diversi per regione) e lenti rispetto agli altri scenari. Le disparità internazionali di produttività sono accresciute rispetto alla situazione attuale determinando una conseguente disparità anche nel reddito pro capite. Questo scenario è inoltre caratterizzato da un incremento demografico costante (15 miliardi di individui entro il 2100) con una diminuzione del reddito pro capite rispetto a A1 e B1.
- B1 (emissioni basse). I punti focali dello scenario B1 sono l'alto livello di coscienza sociale ed ambientale unito con un approccio coerente allo sviluppo sostenibile. Si enfatizza la ricerca di soluzioni a livello globale per il raggiungimento della sostenibilità economica, sociale ed ambientale, verso una distribuzione più equa delle risorse a livello internazionale; inoltre, si ipotizza un particolare impegno nell'aumentare l'efficienza delle risorse utilizzate attraverso la promozione di tecnologie a basso impatto ambientale. La popolazione globale raggiunge i 9 miliardi di individui entro il 2050 diminuendo fino a 7 entro il 2100. Questo scenario è caratterizzato da un alto livello di attività economica ed un progresso significativo.
- B2 (emissioni medio-basse). Come lo scenario B1, anche il B2 presuppone un approccio sostenibile allo sviluppo ma con alcune differenze: la popolazione raggiunge 10 miliardi di unità in risposta ad una riduzione di mortalità ed un aumento della fertilità. Le differenze di reddito a livello internazionale diminuiscono, sebbene non così rapidamente come ipotizzato negli scenari A1 e B1. Le vie per raggiungere la sostenibilità economica, sociale ed ambientale sono ricercate a livello locale.

A partire dagli scenari di emissione, i modelli matematici che descrivono i processi fisici caratteristici del sistema climatico sono in grado di formulare, anche se con elevati gradi di incertezza, previsioni in merito alla risposta del clima. I modelli climatici più recenti AOGCM (*Atmospheric and Oceanic General Circulation Models*) descrivono in modo accoppiato, ossia dinamicamente interconnesso, il comportamento dell'atmosfera e degli oceani. I principali modelli sono: HadCM3 realizzato dall'Hadley Centre; Echam4-Opys3, ECMWF Hamburg 4 – Ocean Isopycnal 3, del Max Planck Institut; PCM, Parallel Climate Model, del National Center for Atmospheric Research.

Nei modelli climatici è previsto anche l'ingresso di forzanti esterne di origine antropica, ovvero gli scenari futuri di emissione già discussi; a seconda dello scenario considerato, quindi, si ottengono risultati differenti del modello. Per esempio, in Figura 2.5 è rappresentato l'aumento di temperatura atteso, rispetto alla temperatura media del 1961-90, secondo diversi scenari di emissione, rappresentati in diverse scale di grigio. Per tutti gli scenari sono previsti aumenti di temperatura, anche consistenti, al 2100; tuttavia, l'incertezza è elevata, come si può vedere dall'area grigia che mostra l'intervallo dei risultati ottenuti per il 2100 da diversi modelli AOGCM (IPCC, 2007a).

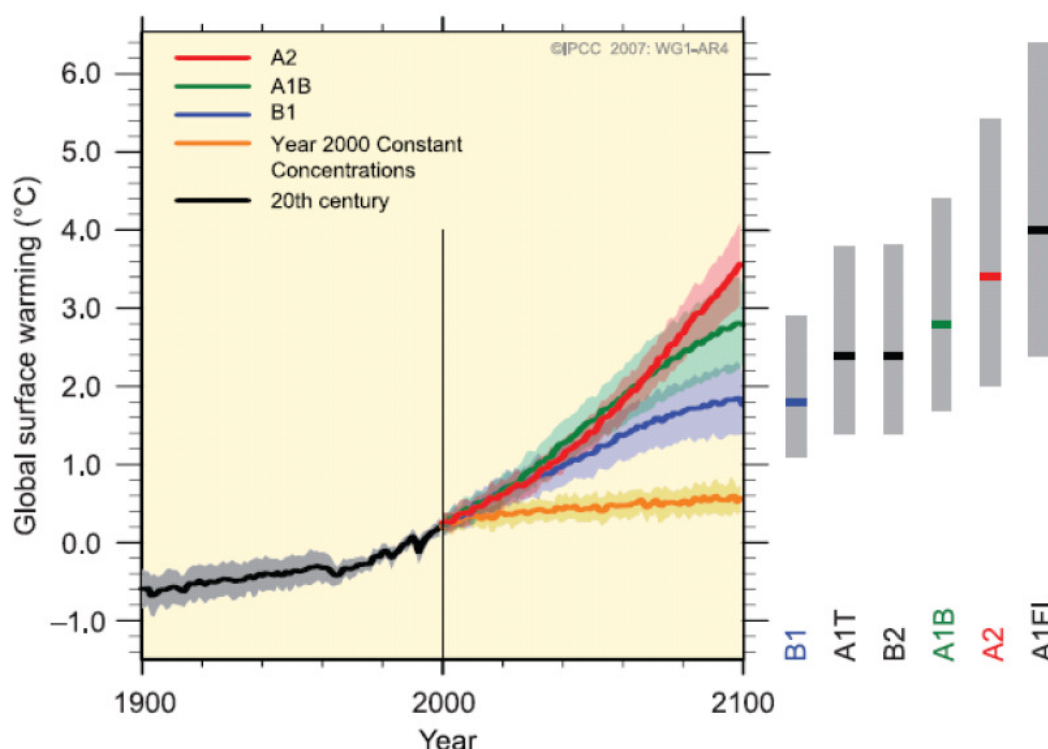


Figura 2.5: Le linee spesse sono le medie globali di più modelli del riscaldamento della superficie (rispetto al periodo 1980-1999) per gli scenari A2, A1B e B1; le aree ombreggiate indicano l'intervallo di più o meno una deviazione standard delle medie annuali di ogni singolo modello. Le barre grigie a destra indicano la miglior stima (linea solida all'interno di ciascuna barra) e l'intervallo di probabilità valutato per i sei scenari di riferimento SRES (IPCC, 2007a).

2.2 Il settore dell'energia

Per comprendere quanta energia sia attualmente disponibile e quali siano i trend di consumo, è necessario introdurre brevemente i seguenti concetti:

- l'energia primaria è energia che non è stata sottoposta ad alcun processo di conversione o trasformazione (carbone, petrolio, uranio, biomasse, vento);
- l'energia secondaria è energia primaria trasformata in una forma più conveniente (energia elettrica, calore);
- l'energia finale è quella utilizzata dall'utente finale (benzina alla stazione, energia elettrica in casa).

Le principali riserve mondiali di energia primaria, insieme alla produzione e al consumo, sono riportate in Tabella 2.3. Le riserve provate di petrolio sono le quantità di greggio che, secondo geologi e ingegneri, possono essere estratte economicamente utilizzando la tecnologia attuale. Se si dividono le riserve rimaste alla fine di ogni anno per la produzione dell'anno stesso, si ottiene la durata di vita in anni della riserva a parità di estrazione (rapporto riserva-produzione, R/P).

Dal 1973 al 2005 c'è stato un raddoppio del consumo di energia primaria a livello globale: da 6.128 a 11.435 Mtep (milioni di tonnellate di petrolio equivalente). La Tabella 2.4 mostra il contributo di ciascuna fonte all'energia primaria globale nel 1973 e nel 2005. Nel 1973 il petrolio forniva l'86,6% dell'energia primaria, mentre nel 2005 il suo contributo era sceso all'81%, rimanendo comunque la fonte di gran lunga dominante. La domanda di energia primaria dovrebbe aumentare, secondo le previsioni

dell'IEA (2007a) con un tasso annuo di incremento dell'1,6% fino al 2030; oltre il 70% dell'aumento della domanda è attribuito ai paesi in via di sviluppo, e il 30% alla sola Cina.

Tabella 2.3: primary energy world reserves, production and consumption (BP, 2007; UNDP, 2004).

	Reserve note	Rapporto R/P	Produzione	Δ 2006 2005	Consumo	Δ 2006 2005
Coal	909064,06 million tons	141	3079,7 million tons oil equivalent	6%	3090,1 million tons oil equivalent	4,5%
Crude oil	1208,24 thousand million barrels	40,5	81663,31 thousand barrels daily	0,4%	83719,06 thousand barrels daily	0,7%
Natural gas	181,46 trillion cubic metres	63,3	2865,3 billion cubic metres	3%	2850,84 billion cubic metres	2,5%
Nuclear	55 10 ⁹ tonnes of oil equivalent*	-	-	-	635,5 million tons oil equivalent	1,4%
Hydro	-	-	-	-	688,1 million tons oil equivalent	3,2%

* UNDP, 2004.

Tabella 2.4: contributo per fonte alla domanda globale di energia primaria nel 2006 (IEA, 2007a).

Fonte	1973 % globale	2005 % globale
Petrolio	46,2	35,0
Carbone	24,4	25,3
Gas naturale	16,0	20,7
Biomasse e rifiuti	10,6	10,0
Nucleare	0,9	6,3
Idroelettrico	1,8	2,2
Geotermico, solare ed eolico	0,1	0,5
Totale	100%	100%

Il consumo finale di energia è aumentato dell'1% circa l'anno negli ultimi decenni (Figura 2.6). Numerosi paesi, principalmente i paesi in via di sviluppo come Cina e India, hanno aumentato significativamente, a tassi superiori all'1% anno, i consumi. La Russia e gli altri paesi dell'ex URSS hanno subito un crollo economico in seguito alla disgregazione dell'Unione Sovietica, diminuendo i propri consumi fino al 35%. L'economia della Russia si sta però riprendendo e quindi è ragionevole assumere che i suoi consumi torneranno ai livelli passati o aumenteranno. Inoltre, le economie di Cina e India continuano a crescere a ritmi elevati e necessitano di grandi quantità di energia per sostenere la propria crescita. A livello globale, il consumo finale di energia è aumentato da 4.700 Mtep nel 1973 a 7.912 Mtep nel 2005; le percentuali di consumo per regione sono riportate in Tabella 2.5.

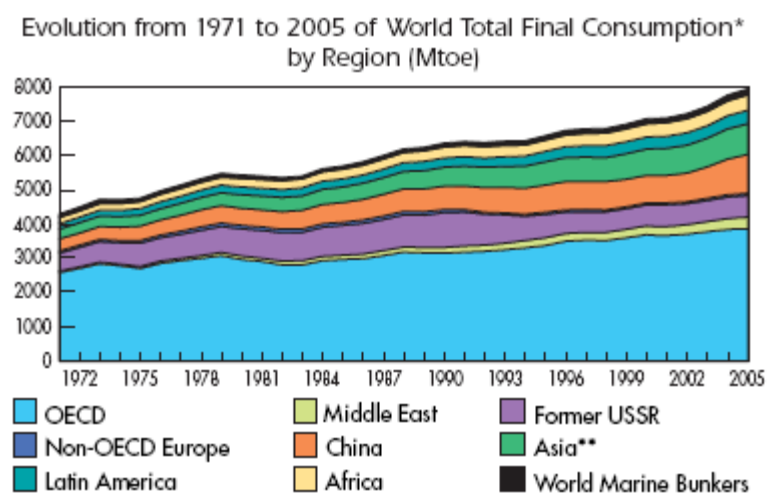


Figura 2.6: Andamento dal 1971 al 2005 dei consumi finali di energia per regione, in Mtep (figura riprodotta con l'autorizzazione della IEA, Key world energy statistics © 2007, pag. 28).

Tabella 2.5: Popolazione mondiale e consumi finali di energia nel 2005 per regione (IEA, 2007a).

Regione	Popolazione		Consumi finale	
	2005 (million)	2005 (%)	1973 (%)	2005 (%)
OECD	1.172	18,2	60,5	48,7
Middle East	187	2,9	0,9	4,2
Former USSR	285	4,4	12,5	7,9
Non-OECD Europe	54	0,8	1,5	0,9
China	1.311	20,4	7,9	14,2
Asia	2.080	32,3	6,4	11,3
Latin America	449	7,0	3,7	5,0
Africa	894	13,9	4,1	5,6
World marine bunkers ¹	-	-	2,5	2,2
Total	6.432	100 %	100 %	100 %

Globalmente sussistono forti disparità nel consumo finale di energia tra i diversi paesi: i paesi industrializzati consumano il 60% dell'energia complessiva (un numero che negli anni '70 era molto superiore), nonostante ospitino solo il 18% della popolazione globale (Tabella 2.5). Il consumo di energia pro capite è un utile indicatore che illustra il livello di sviluppo industriale, la struttura dell'economia e i pattern di consumo e permette di confrontare diversi paesi. Il consumo pro capite negli Stati Uniti è pari a 7,91 tep, quello dell'Italia a 3,9 tep; la media dei paesi africani, invece, si attesta attorno ai 0,68 tep (Figura 2.7).

Nelle regioni al di sotto di una soglia minima di approvvigionamento energetico si registrano drammatici valori degli indicatori di benessere sociale, come la mortalità infantile o l'aspettativa di vita media. Secondo l'UNDP (United Nation Development Program, 2004) l'indice di benessere sociale (HDI, Human Development Index) è un indicatore utile per descrivere il grado generale della qualità della vita di una popolazione sulla base di fattori come la sanità, l'istruzione ed il benessere economico.

¹ International marine bunkers covers those quantities delivered to ships of all flags that are engaged in international navigation. The international navigation may take place at sea, on inland lakes and waterways, and in coastal waters. Consumption by ships engaged in domestic navigation is excluded. The domestic/international split is determined on the basis of port of departure and port of arrival, and not by the flag or nationality of the ship. Consumption by fishing vessels and by military forces is also excluded.

Il grafico di Figura 2.8 rappresenta la relazione tra consumo di energia e HDI e mostra chiaramente il legame tra consumi energetici e qualità della vita. Dal grafico di Figura 2.8 si può inoltre osservare che un aumento di 10 volte il consumo pro capite di energia non aumenta l'indice HDI significativamente.

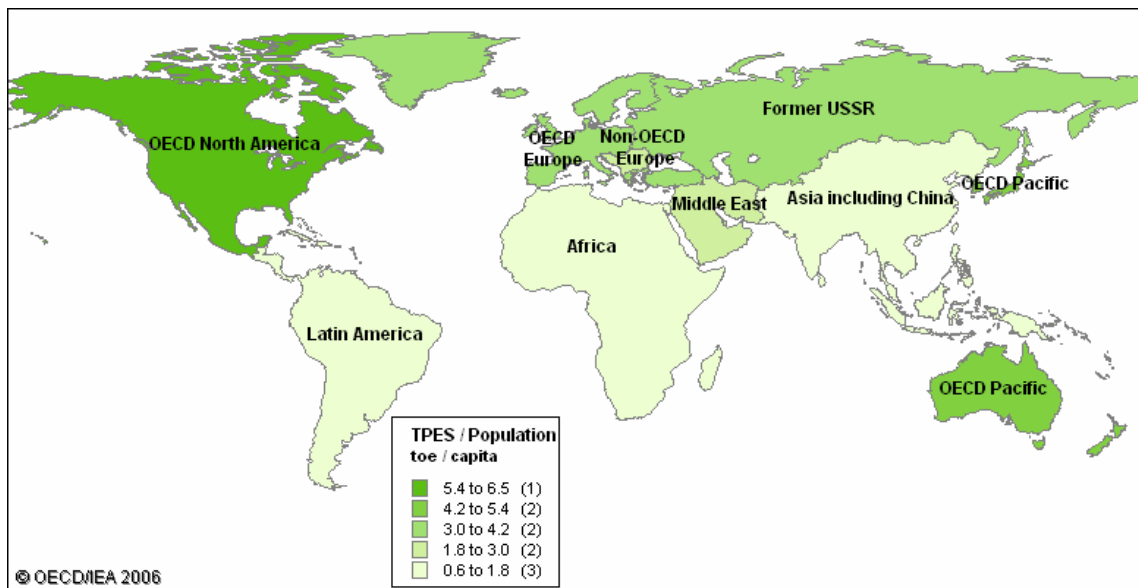


Figura 2.7: Energia primaria pro capite (figura riprodotta con l'autorizzazione della IEA, IEA Energy Statistics © 2007, <http://www.iea.org/Textbase/country/maps/world/tpes.html>).

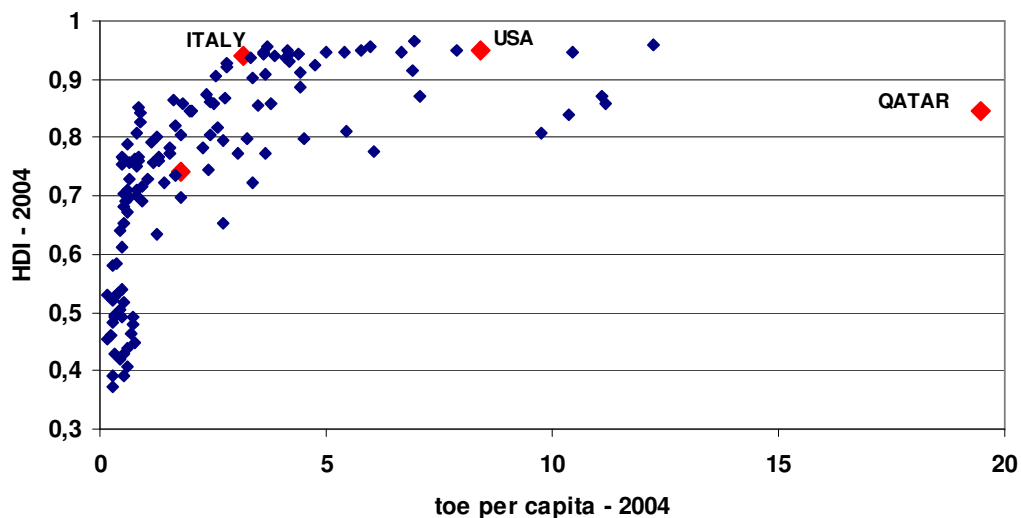


Figura 2.8: Relazione tra l'indice di sviluppo umano e i consumi di energia primaria pro capite (IEA, 2007a; UNDP, 2006).

2.2.1 Scenari futuri per l'energia

L'aumento della richiesta di energia da parte dei paesi in via di sviluppo è una delle ragioni che supportano le valutazioni dell'International Energy Agency (IEA, 2004), secondo cui il consumo di energia aumenterà del 50% nei prossimi 20 anni. Per Cina e India, il cui consumo pro capite è attualmente circa un decimo di quello degli Stati Uniti, si prevedono enormi consumi potenziali. Nei paesi in via di sviluppo maggiormente popolati la domanda di energia sta aumentando con tassi ancora più

elevati di quelli che caratterizzarono il boom socio-economico di molti paesi industrializzati, compreso il nostro, nel periodo di maggior crescita (1950-1973).

Se nei prossimi 25 anni la domanda complessiva dei paesi in via di sviluppo dovesse triplicare, scenario che appare tutt'altro che irrealistico (raggiungendo così un terzo dei consumi medi pro capite dei paesi sviluppati), il fabbisogno energetico globale risulterebbe pari a circa 17 miliardi di tep, di cui più del 50% destinato agli odierni paesi in via di sviluppo (a fronte dell'attuale quota del 20%). Le stime dell'ONU presentate in occasione del vertice di Johannesburg (2002), sono abbastanza in accordo con quelle della IEA (2004): se l'uso di energia primaria nel mondo dovesse continuare ad aumentare seguendo il ritmo attuale, i consumi energetici raggiungerebbero nel 2035 i 17 Gtep (il doppio rispetto a 8,8 Gtep del 1998) e i 26 Gtep nel 2055.

Ulteriori fattori che determinano l'incremento costante della domanda di energia sono l'aumento demografico, in particolare nei paesi in via di sviluppo e maggiormente popolosi (recenti stime delle Nazioni Unite prevedono una popolazione mondiale di 7,5 miliardi nel 2020), e il fenomeno dell'urbanizzazione, che presenta un netto trend di crescita nello sviluppo della popolazione residente nei centri urbani (l'UN prevede che attorno al 2015 la popolazione urbana sarà superiore a quella rurale). Il grafico di Figura 2.9 mostra chiaramente queste tendenze (UN Department of Economic and Social Affairs, 2006).

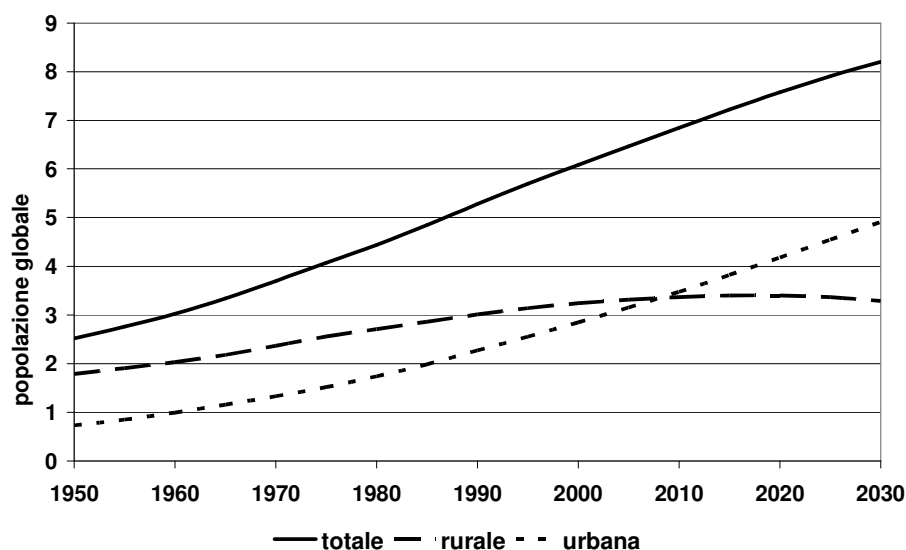


Figura 2.9 : Trend di popolazione urbana e rurale a livello globale (UN, 2006).

Secondo gli scenari sviluppati dall'IEA (2006) i combustibili fossili rimarranno la fonte di energia dominante almeno fino al 2030, tanto che nello scenario di riferimento contribuiranno con l'83% all'aumento di energia primaria (Figura 2.10); si prevede che:

- il contributo di petrolio diminuisca, pur continuando a prevalere sul mix di energia primaria;
- il contributo del carbone aumenti prevalentemente in Cina e India (4/5 della domanda globale di carbone);
- il contributo del gas naturale aumenti, anche con tassi inferiori a quanto atteso, soprattutto a causa dei prezzi elevati;
- il contributo dell'idroelettrico diminuisca leggermente;
- il contributo del nucleare diminuisca;

- il contributo delle biomasse diminuisca leggermente a causa dei paesi in via di sviluppo che si sposteranno a tecnologie di trasformazione più moderne;
- il contributo delle altre rinnovabili, eolico, solare e geotermico, avrà la crescita maggiore, ma partendo da un contributo molto modesto al mix globale continueranno a contribuire poco.

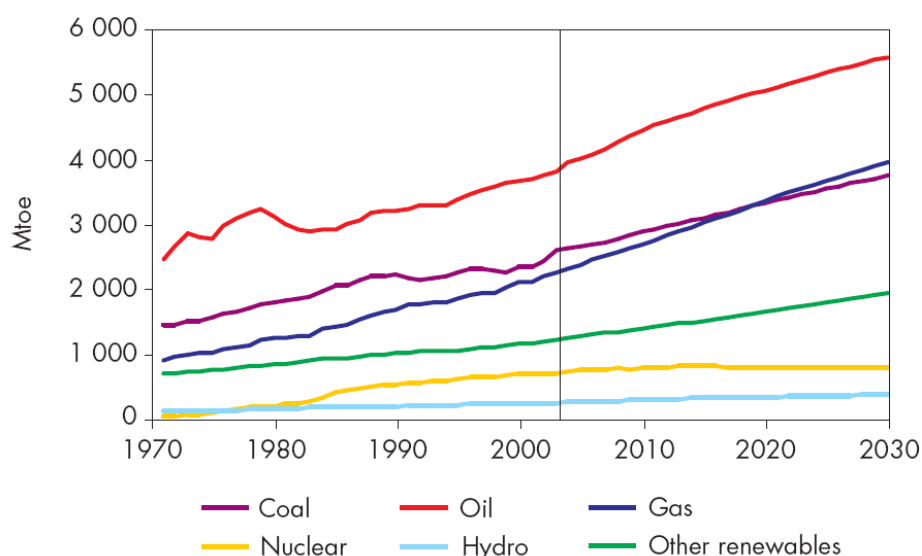


Figura 2.10: Andamento della domanda globale di energia primaria per fonte nello scenario di riferimento (figura riprodotta con l'autorizzazione della IEA, World Energy Outlook © 2005, Figura 2.1, pag. 83).

L'utilizzo del carbone è destinato a crescere nei prossimi anni poiché fornisce energia abbondante (diffusa sul globo terrestre a differenza di petrolio e gas naturale che sono concentrati in poche, spesso instabili, regioni) ed economica (da 1/3 a 1/6 del prezzo di petrolio e gas naturale; Figura 2.11). Stati Uniti, Cina e India hanno immense riserve di carbone; metà dell'energia elettrica generata negli Stati Uniti proviene dal carbone e la Cina costruisce l'equivalente di due centrali da 500 MW a carbone ogni settimana (ogni anno una capacità equivalente a quella totale della Gran Bretagna). Per questi paesi, ma anche per l'Europa e per gli altri paesi asiatici, la sicurezza dell'approvvigionamento e l'economicità della risorsa sono due incentivi sufficienti per continuare a investire nel carbone (MIT, 2007).

L'utilizzo del carbone ha impatti ambientali negativi dovuti principalmente alle emissioni in atmosfera (ossidi di zolfo, ossidi di azoto, particolato, mentre le emissioni di mercurio sono ridotte grazie alle tecnologie di abbattimento). Soprattutto, il carbone è il combustibile fossile che emette le maggiori quantità di anidride carbonica ed è quindi tra le principali cause dei cambiamenti climatici globali. Si può quindi affermare che, per risolvere il problema del clima, è necessario risolvere il problema dell'utilizzo del carbone.

Il predominio dei combustibili fossili quali fonti di energia primaria pone serie questioni soprattutto riguardo agli impatti ambientali, come appena descritto per il carbone. Secondo gli scenari dell'IEA (2006), le emissioni di GHG nel settore dell'energia aumenteranno dell'1,7% all'anno fino al 2030, per un aumento complessivo del 55% nel periodo 2004-30; i paesi in via di sviluppo saranno responsabili di circa tre quarti di questo aumento. L'aumento delle emissioni nei PVS è più rapido dell'aumento della domanda di energia poiché l'incremento di energia è più "carbon-intensive" (in generale usano più carbone e meno gas naturale) di quanto non lo sia nei paesi sviluppati o di

transizione. Lo stesso scenario dell'IEA prevede che le emissioni della sola Cina raddoppieranno dal 2004 al 2030.

Ci sono altre importanti questioni, oltre agli impatti sull'ambiente, che riguardano i combustibili fossili e che sinteticamente si possono riassumere nelle seguenti osservazioni:

- Nonostante le diverse opinioni della comunità scientifica e tecnica sul picco del petrolio, bisogna comunque accettare che le riserve di combustibili fossili (ma anche di uranio) sono finite; la produzione di petrolio e di gas naturale in paesi non OPEC dovrebbe raggiungere il picco nel prossimo decennio (IEA, 2006; Kerr, 2005).
- Il prezzo del petrolio ha subito costanti aumenti nell'ultimo anno fino ad arrivare a circa 100 dollari a barile nel novembre 2007 (The Economist, 2007b).
- I prezzi dell'energia hanno ripreso ad aumentare, dopo i prezzi bassi raggiunti negli anni novanta, principalmente a causa dell'aumento del prezzo di petrolio e gas naturale; anche il prezzo del carbone, nonostante sia abbastanza indipendente dal mercato del petrolio, ha subito dei rincari.

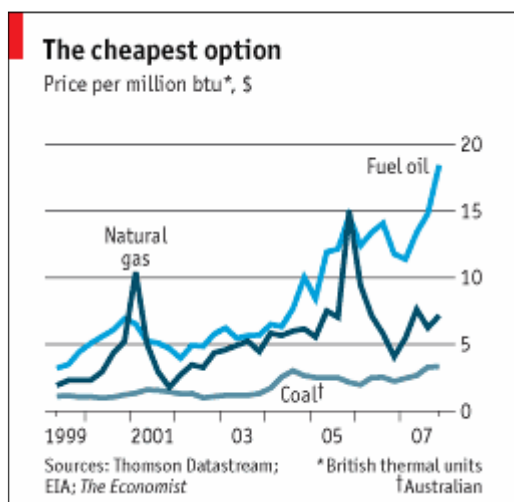


Figura 2.11: Andamento del prezzo di petrolio, carbone e gas naturale (The Economist, 2007a) (c) The Economist Newspaper Limited, London. All rights reserved. This material may not be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise without the prior permission of The Economist Newspaper Limited.

2.2.2 Il contesto europeo

La regione dell'UE-25 è la maggiore consumatrice di energia dopo gli Stati Uniti: la domanda di energia primaria è aumentata di circa lo 0,8% all'anno tra il 1990 e il 2004 (Figura 2.12) ed è stata soddisfatta tramite l'uso di petrolio (37%), gas naturale (24%), nucleare (15%) e carbone (18%). Le fonti rinnovabili sono cresciute dell'8,4% tra il 2002 e il 2003, arrivando a soddisfare il 6% della domanda. La dipendenza energetica dei paesi dell'EU-25 nel 2004 era di circa 50%. L'Italia è tra i paesi con maggiore dipendenza dalle importazioni, stimata all'80%.

I consumi finali di energia sono aumentati del 12% dal 1990 al 2005, principalmente per l'aumento (circa 30%) della domanda di energia per i trasporti (Figura 2.13). I consumi del settore industriale, invece, sono diminuiti del 6%, sia per un aumento dell'efficienza energetica (anche l'intensità energetica è diminuita, soprattutto nei paesi UE10) sia per lo spostamento verso un'economia più orientata ai servizi.

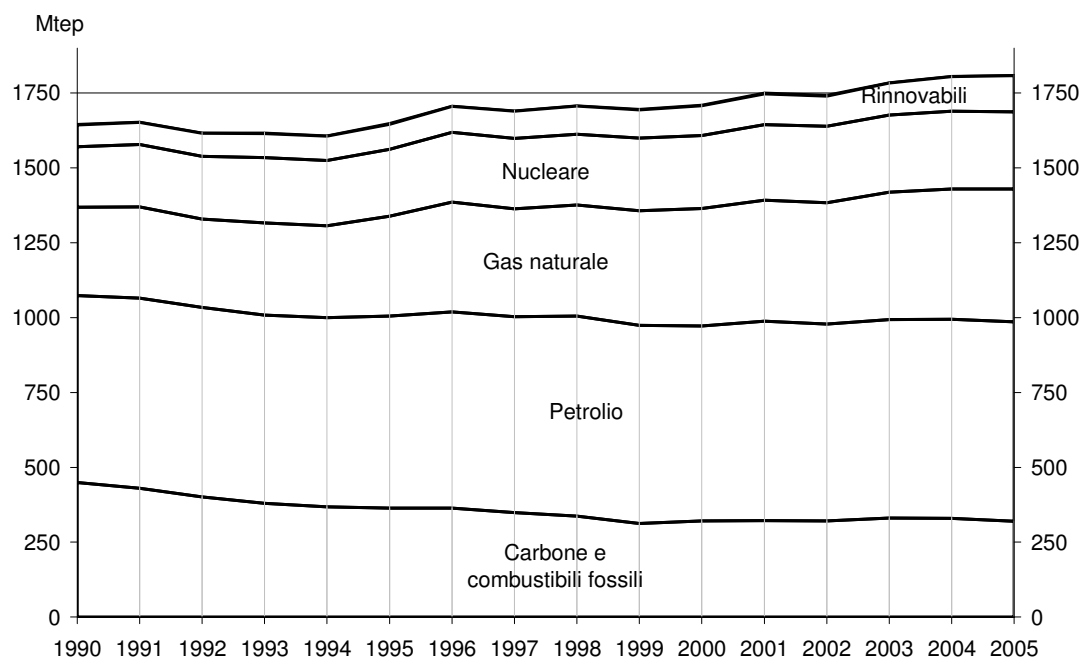


Figura 2.12: Consumo lordo per fonte nei paesi EU-25 (EU, 2006).

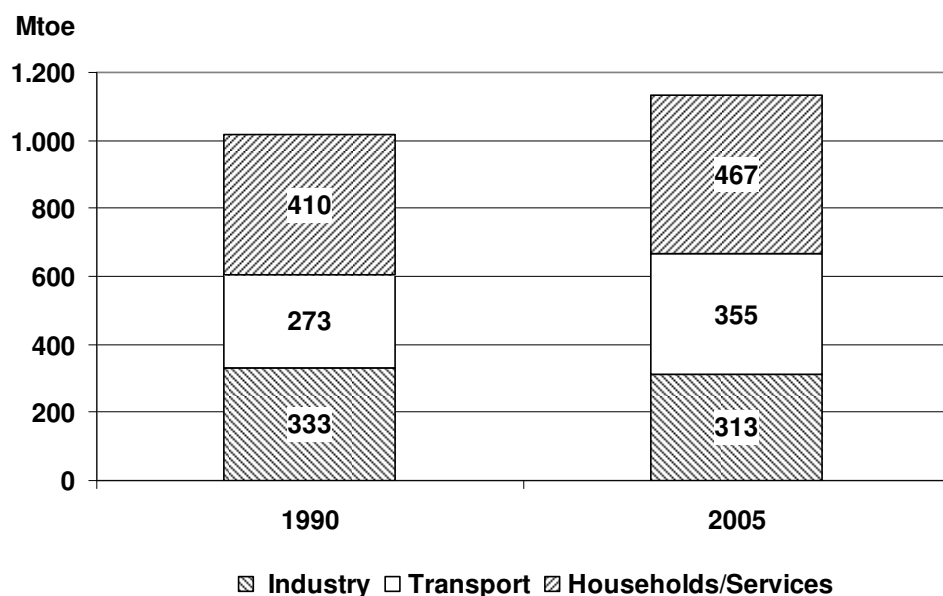


Figura 2.13: Consumi finali di energia per settore nei paesi EU-25 (Eurostat, 2007).

Nel 2003, l'energia ha contribuito al 39% delle emissioni totali di anidride carbonica. Il mercato europeo delle emissioni dovrebbe condurre ad una riduzione delle emissioni nel settore della produzione di energia. Il trasporto ha contribuito ad un quarto circa delle emissioni totali di anidride carbonica; le emissioni in questo settore sono in costante crescita dal 1990 (1,8% anno). I volumi di traffico crescenti e l'aumento della motorizzazione sono state le cause principali di questa crescita, mentre i miglioramenti nell'efficienza sono stati modesti.

Secondo le previsioni della Commissione Europea (2005a), con le politiche intraprese fino al 2004, il consumo di energia totale nell'UE-25 continuerà ad aumentare fino al 2030 (15% rispetto al 2000). L'aumento dei consumi diminuirà nel tempo, fino a

stabilizzarsi attorno al 2020, riflettendo la modesta crescita economica e la stabilizzazione della popolazione (Figura 2.14). L'aumento di 240 Mtep dal 2000 al 2030 dei consumi di energia sarà soddisfatto principalmente da gas naturale (dovrebbe aumentare di 140 Mtep) e dalle rinnovabili. Il consumo di petrolio, pur rimanendo il maggiore, non dovrebbe superare il livello attuale. Le rinnovabili aumentano in termini relativi più di tutti gli altri combustibili

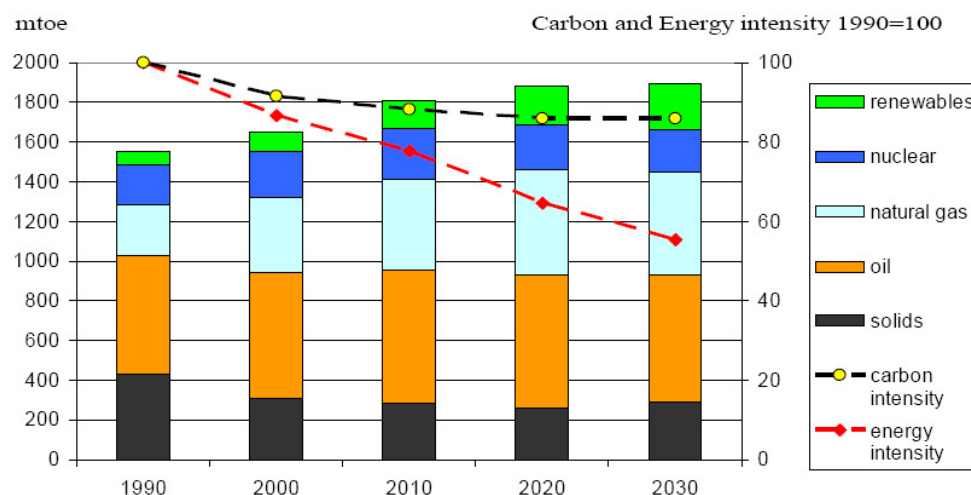


Figura 2.14: Andamento dei consumi di energia per fonte, dell'intensità energetica e del carbonio in Europa (Commissione Europea, 2005a).

Le emissioni di CO₂ dal settore dell'energia (trasporto aereo internazionale compreso) sono diminuite tra il 1990 e il 2000; nel 2005 sono tornate al livello del 1990. Si prevede che, nel corso degli anni futuri, le emissioni di CO₂ continuino ad aumentare significativamente, fino a superare nel 2010 il livello del 1990 del 3% (e del 5% nel 2030). Il consistente aumento nel breve termine è dovuto agli aumenti di prezzo del petrolio e specialmente del gas naturale, che incentivano l'uso del carbone nelle centrali elettriche. Nel lungo termine, l'aumento moderato del CO₂ è dovuto sia al minore incremento dei consumi di energia sia al ruolo delle rinnovabili.

Per soddisfare gli obiettivi europei nel settore dell'energia, sono necessarie innovazioni significative nei sistemi produttivi, nell'espansione del settore dell'energia rinnovabile, nella conversione del settore dei trasporti, nello sviluppo di sistemi naturali in grado di sequestrare carbonio, nella gestione dei meccanismi flessibili di protocollo di Kyoto.

2.2.3 Il contesto italiano

La domanda di energia in Italia negli scorsi venti anni è aumentata soprattutto nel settore del trasporto e in quello domestico, mentre è rimasta sostanzialmente costante nel settore industriale (Figura 2.15). Il valore dell'intensità energetica italiana nel 2003 era pari a 150 Mtep M€00⁻¹ (milioni di euro corrispondenti alla valuta del 2000, Commissione Europea, 2005b). Deve tuttavia essere ricordato che l'intensità energetica è un indicatore relativo solo agli usi finali di energia e non considera quindi l'effettivo uso di risorse energetiche. Inoltre non sono considerati altri fattori, come quelli climatici: le favorevoli condizioni climatiche dell'Italia incidono non solo sul fabbisogno energetico del settore residenziale ma anche su quello dei servizi e dell'industria.

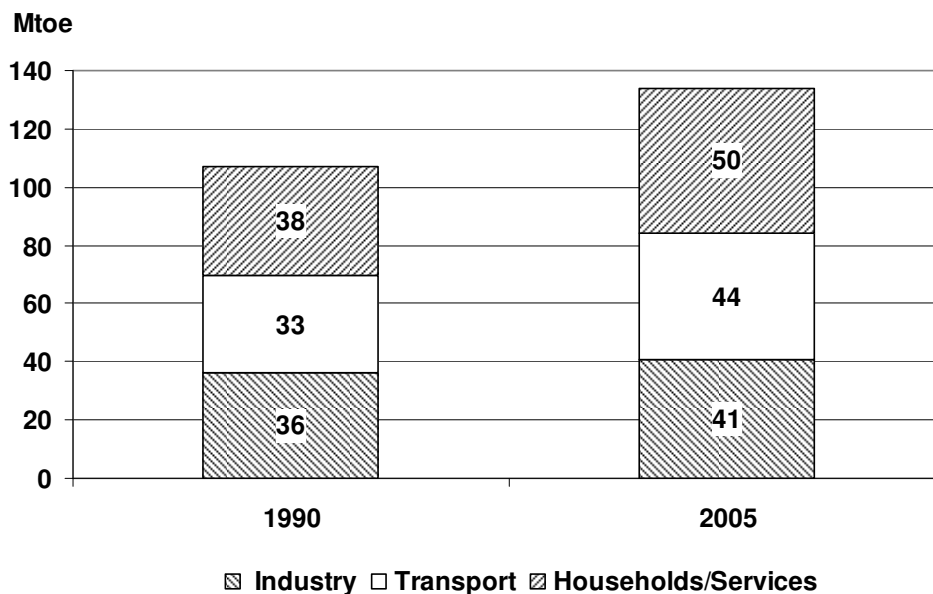


Figura 2.15: Consumi finali di energia per settore in Italia (Eurostat, 2007).

Gli usi termici, che rappresentano la grande maggioranza (92%) di tutti gli usi domestici e il 54,2% della richiesta complessiva, sono soddisfatti attingendo a fonti non rinnovabili, in particolare gasolio e metano. È però ancora abbastanza diffuso l'impiego, di certo non tra i più efficienti, di dispositivi elettrici per uso finale di calore a bassa e media temperatura.

Maggiori efficienze potrebbero essere raggiunte nell'attuale sistema di produzione di energia elettrica, basato per la quasi totalità sull'impiego di combustibili fossili: i rendimenti di trasformazione sono circa il 35% per le centrali tradizionali e il 55% per le centrali a ciclo combinato. Oltre il 70% dell'energia elettrica è generata attraverso un ciclo termoelettrico. I dati forniti dal GRTN (Gestore Nazionale della Rete Elettrica, 2003) mostrano che la produzione di energia elettrica nel 2003 deriva prima di tutto dal gas naturale (112 miliardi di kWh), quindi dal petrolio e dagli oli combustibili (61,5 miliardi di kWh) e, infine, dal carbone (35,5 miliardi).

Uno dei dati più rappresentativi è quello delle importazioni, pari all'84,7% circa dei consumi (Rapporto ENEA Energia e Ambiente, 2004): in particolare i prodotti petroliferi (provenienti per lo più dai paesi del Medio Oriente e del nord Africa) rappresentano il 54% delle importazioni complessive, seguiti da gas naturale (30%, di origine soprattutto russa e algerina), combustibili solidi (8%) ed energia elettrica (7%). L'analisi della dipendenza energetica evidenzia come i settori maggiormente esposti a questa situazione siano la generazione di elettricità e i trasporti, che non possono prescindere dalla risorsa petrolio. Di conseguenza, l'Italia è inevitabilmente esposta alle fluttuazioni del prezzo dei combustibili fossili. Anche a livello nazionale appare quindi giustificato, nel contesto sinteticamente riassunto in questo paragrafo, il crescente interesse verso le prospettive di sviluppo offerte dalle fonti rinnovabili, in grado di fornire soluzioni concrete ad alcune problematiche dell'attuale panorama energetico.

Lo scenario italiano presenta altri fattori atti a favorire lo sviluppo di una cultura del rinnovabile: basti pensare che la superficie agricola coltivata si è ridotta da 18 milioni di ettari del 1966 a 12 del 1995, a testimoniare il diradamento della popolazione agricola con i conseguenti squilibri sul territorio, sia di natura socio-economica che prettamente fisico-idrogeologica. Per invertire tale tendenza si possono rivelare di importanza strategica le potenzialità delle fonti rinnovabili da biomasse, settore fino ad ora

scarsamente sfruttato (l'ultimo Piano Energetico Nazionale, approvato nel 1988, si limitava a valutare il loro contributo al bilancio energetico in 2,5 Mtep per il 2000).

2.3 Politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici globali

Ad oggi, esistono opportunità considerevoli per la mitigazione dei cambiamenti climatici e la stabilizzazione delle emissioni a circa 6 Gt CO₂-eq con benefici netti positivi (Barker *et al.*, 2007). Non esiste però un unico settore, né tanto meno una sola tecnologia, che possa risolvere il problema della stabilizzazione delle emissioni climalteranti. Piuttosto, è necessaria un'ampia gamma di tecnologie e di settori su cui investire in politiche di riduzione delle emissioni.

Un esempio di questa strategia è dato dal noto “cuneo di stabilizzazione”, efficacemente ideato da Pacala e Socolow (2004), che mostra come sia già oggi a disposizione un ampio ventaglio di tecnologie per la riduzione delle emissioni e la stabilizzazione della concentrazione atmosferica di CO₂. La curva superiore di Figura 2.16A rappresenta l'andamento delle emissioni di carbonio dall'utilizzo dei combustibili fossili e dall'industria del cemento secondo uno scenario BAU (*business as usual*): a partire da 7,0 GtC/anno nel 2004 si prevede una crescita dell'1,5% l'anno. La curva inferiore Figura 2.16A rappresenta l'andamento delle emissioni di carbonio coerente con una concentrazione atmosferica di CO₂ pari a 500 ppmv al 2125 (pari al raddoppio della concentrazione atmosferica di CO₂ pre-industriale, 280 ppmv; questa concentrazione è considerata essere la massima tollerabile per evitare conseguenze drammatiche dei cambiamenti climatici). Chiaramente, l'area compresa tra le due curve rappresenta la quantità di emissioni di carbonio che devono essere evitate per la stabilizzazione della concentrazione atmosferica di CO₂. Semplificando (Figura 2.16B), si può dire che la stabilizzazione è rappresentata da una traiettoria delle emissioni pari a 7 GtC/anno e che lo scenario BAU è rappresentato da una linea che arriva all'emissione di 14 GtC/anno nel 2054. Il triangolo di stabilizzazione, individuato fra la traiettoria ed il BAU, rimuove esattamente un terzo delle emissioni. Questa quantità può essere equamente suddivisa in sette “cunei” (*wedges*) di pari peso e, in particolare, ciascuna pari a 25 GtC nell'arco di 50 anni, partendo da 0 GtC/anno nel 2004 e arrivando a 1 GtC/anno nel 2054 (Pacala e Socolow, 2004).

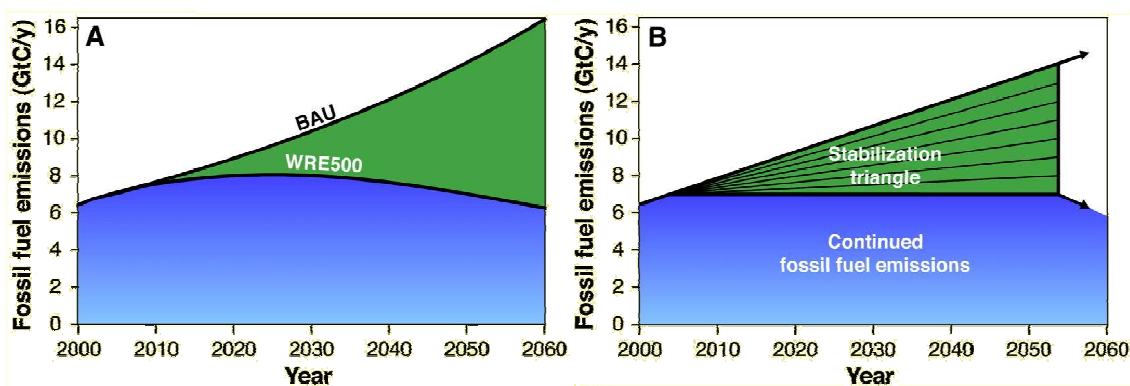


Figura 2.16: I 7 “cunei” per la stabilizzazione, in inglese *stabilization wedges*, delle emissioni di carbonio (Pacala e Socolow, 2004; riprodotto con l'autorizzazione della AAAS).

Le emissioni di ciascun cuneo di stabilizzazione possono essere abbattute in diversi modi, tra cui: miglioramento dell'efficienza energetica, decarbonizzazione della fornitura di energia e combustibili per la trazione (utilizzo di combustibili con meno

carbonio, cattura e sequestro del carbonio, energia nucleare, fonti rinnovabili), stoccaggio del carbonio in foreste e in terreni agricoli. Pacala e Socolow (2004) hanno identificato 15 esempi differenti di opzioni che già sono disponibili commercialmente disponibili e che potrebbero essere utilizzate per evitare le emissioni che vanno a comporre ciascun cuneo. In Tabella 2.6 sono riportati alcuni esempi delle tecnologie e delle pratiche di mitigazione per settore (IPCC, 2007b).

Tabella 2.6: Principali tecnologie e pratiche di mitigazione per settore. I settori e le tecnologie sono elencate senza un ordine particolare. Le pratiche non tecnologiche, come il cambiamento dello stile di vita, che sono trasversali, non sono incluse in questa tabella (IPCC, 2007b)

Settore	Principali tecnologie e pratiche di mitigazione attualmente disponibili sul mercato	Principali tecnologie e pratiche di mitigazione che si prevede siano commercializzate prima del 2030
Fornitura di energia	Miglioramento dell'efficienza delle forniture e della distribuzione; passaggio da carbone a gas come carburante; energia nucleare; calore ed energia rinnovabile (energia idroelettrica, solare, eolica, geotermica e bioenergia); energia e calore combinati; prime applicazioni di CCS (Capture and Storage), per esempio, stoccaggio della CO ₂ rimossa dal gas naturale	Cattura e confinamento dell'Anidride Carbonica (Carbon Capture and Storage - CCS) per impianti di produzione dell'energia elettrica da gas, biomassa e carbone; energia nucleare avanzata; energie rinnovabili avanzate, incluse: l'energia da moto ondoso e mareale, solare concentrato, e solare fotovoltaico.
Trasporti	Veicoli alimentati a carburante più efficiente; veicoli ibridi; veicoli diesel più puliti; biocarburanti; spostamento modale dal trasporto su ruote al trasporto su rotaie e sistemi di trasporto pubblico; trasporti non motorizzati (bicycle, a piedi); pianificazione dell'uso del territorio e dei trasporti	Seconda generazione di biocarburanti; maggiore efficienza degli aeroplani; veicoli elettrici e ibridi avanzati con batterie più potenti e affidabili
Costruzioni	Efficiente illuminazione e uso dell'orario legale; apparecchi elettrici e dispositivi di riscaldamento e raffreddamento più efficienti; cucine più efficienti, migliori isolamenti; progettazione per il riscaldamento e il raffreddamento solare attivo e passivo; fluidi di refrigerazione alternativi, recupero e riciclo di gas fluorogenati	Progettazione integrata di edifici commerciali, includendo tecnologie come contatori intelligenti, che forniscono feedback e controllo; solare fotovoltaico integrato nelle costruzioni
Industria	Uso più efficiente delle apparecchiature elettriche; recupero di energia e calore; riciclo e sostituzione dei materiali; controllo delle emissioni di gas non-CO ₂ ; e un'ampia gamma di tecnologie specifiche per un dato processo	Efficienza energetica avanzata; CCS per la manifattura di cemento, ammoniaca e ferro; elettrodi inerti per la manifattura dell'alluminio
Agricoltura	Gestione delle coltivazioni e dei pascoli migliorata per aumentare la riserva di carbonio nel suolo; ripristino di suoli di torbiera coltivati e di terre degradate; miglioramento delle tecniche di produzione del riso e di allevamento del bestiame e della gestione del concime per ridurre le emissioni di CH ₄ ; miglioramento delle tecniche di applicazione di fertilizzanti a base di nitrati per ridurre le emissioni di N ₂ O; coltivazioni dedicate per sostituire i	Miglioramento dei raccolti agricoli

Settore	Principali tecnologie e pratiche di mitigazione attualmente disponibili sul mercato	Principali tecnologie e pratiche di mitigazione che si prevede siano commercializzate prima del 2030
Silvicoltura/ Foreste	combustibili fossili; efficienza energetica migliorata Forestazione; riforestazione; gestione delle foreste; riduzione delle deforestazione; gestione dei prodotti derivanti dalla raccolta del legname; uso dei prodotti della silvicoltura per la produzione di bioenergia allo scopo di sostituire l'uso di combustibili fossili Miglioramento delle specie di alberi per aumentare la produttività di biomassa e l'assorbimento di carbonio.	Tecnologie satellitari migliorate per l'analisi del potenziale di assorbimento da parte di vegetazione/suolo e mappatura del cambio di utilizzo del suolo
Rifiuti	Siti per il recupero del metano; incenerimento dei rifiuti con recupero di energia; compostaggio dei rifiuti organici; trattamento controllato delle acque di scarico; riciclo e minimizzazione dei rifiuti	Biocoperture e biofiltri per ottimizzare l'ossidazione del CH ₄

2.3.1 Le fonti rinnovabili di energia

L'energia rinnovabile proviene da sorgenti non esauribili: con il termine "fonti rinnovabili" si considerano le fonti energetiche con tempi di ripristino sufficientemente contenuti da prevedere una reintegrazione compatibile con la domanda. Il quadro di riferimento per le politiche di potenziamento di queste fonti di energia è definito a livello nazionale dal Decreto Legislativo 387 del 29 dicembre 2003 (decreto di recepimento della Direttiva Europea 2001/77/CE, relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità). Tale decreto definisce come fonti energetiche rinnovabili: il sole, il vento, l'energia idraulica, le biomasse, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso, il biogas, i gas di discarica e i gas residuati dai processi di depurazione.

Per quanto concerne il settore delle biomasse, la direttiva 2001/77/CE definisce come biomasse solamente la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti o residui proveniente dall'agricoltura (contenente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, e la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani. Il Decreto Legislativo 387 include, a beneficiare del regime riservato alle fonti energetiche rinnovabili, la frazione non biodegradabile dei rifiuti e i combustibili derivanti da quest'ultimi.

Obiettivi di diffusione delle rinnovabili

Il percorso verso uno sfruttamento pianificato e completo delle energie da fonti rinnovabili è stato avviato nel 1996 con la pubblicazione del Libro Verde per la Valorizzazione Energetica delle Fonti Rinnovabili, contenente le valutazioni sulle potenzialità di tali risorse (Commissione Europea, 1997). Al Libro Verde ha fatto seguito il Libro Bianco per la Valorizzazione Energetica delle Fonti Rinnovabili (Commissione Europea, 1999). In questo documento sono approfonditi i punti di forza e le problematiche aperte delle risorse rinnovabili attraverso un confronto tra soggetti, istituzioni pubbliche e operatori privati dei settori interessati.

Più recentemente è stato pubblicato il Libro Verde "Verso una strategia europea per la sicurezza dell'approvvigionamento energetico" (Commissione Europea, 2000), nel

quale si rileva la forte dipendenza dell'UE dalle importazioni di energia. Le biomasse, essendo una risorsa locale, possono concorrere a incrementare la sicurezza energetica europea, sostituendo in parte il gas naturale nella produzione di calore ed energia elettrica. Nel Libro Verde, inoltre, è definito l'obiettivo del raggiungimento del 12% del consumo lordo di energia nel 2010 mediante fonti rinnovabili, anche per il rispetto degli obiettivi stabiliti dal Protocollo di Kyoto di riduzione dell'emissione dei gas serra.

Il Libro Bianco italiano (Cipe, 1999) definisce, per ogni fonte rinnovabile, gli obiettivi di riferimento per conseguire le riduzioni delle emissioni di gas serra previste dalla delibera Cipe e stabilisce gli strumenti per il conseguimento di tale obiettivo. Per il nostro Paese il Libro Bianco prevede il raggiungimento delle 20,3 Mtep di energia prodotta dalle fonti rinnovabili per il periodo 2008-2012; nel 1997 il quantitativo di energia prodotta era pari a 11,7 Mtep. Un quadro riassuntivo della situazione attuale e delle strategie di sviluppo delle diverse fonti energetiche è fornito in Tabella 2.7.

Tabella 2.7: Quadro riassuntivo della situazione attuale e degli obiettivi del Libro Bianco sulle fonti rinnovabili (Berlen, 2004)

	2002-2003	2008-2012
Idroelettrico < 10 MW	14.517 MW	15.000 MW
Idroelettrico > 10 MW	2.223 MW	3.000 MW
Geotermia	860 MW	800 MW
Eolico	904 MW	2.500 MW
Fotovoltaico	25 MW	300 MW
Biomasse e biogas (impianti di produzione di elettricità e cogenerazione che usano legno e residui legnosi)	225 MW	2.300 MW
Solare termico	470.000 m	3.000.000 m
Biomasse (legna da ardere dei circuiti commerciali, legno e residui per teleriscaldamento)	0,9-1,2 MTep anno	1,75 Mtep anno
Biodiesel	220.000 t anno	500.000 t anno
Geotermia (usi diretti)	0,213 MTep anno	0,4 MTep anno

Dall'analisi della situazione delle rinnovabili in Italia si nota che in alcuni settori, come l'eolico, il trend di crescita è abbastanza avviato. Altre tecnologie accusano invece un certo ritardo nel livello di sviluppo: tra queste il solare fotovoltaico e termico e le biomasse. Ciò nonostante, le biomasse in particolare possono rappresentare una delle più vantaggiose strade percorribili nella valorizzazione del rinnovabile nel nostro Paese. I comparti tecnologici in linea con le proiezioni del Libro Bianco Europeo sono l'energia eolica, idroelettrica, geotermica e fotovoltaica; i settori che appaiono in ritardo sono quelli del solare termico e dell'energia da biomasse. Il Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili (Cipe, 1999) indica i target a livello nazionale per ogni fonte (relativi al periodo 2008-2012); in Italia il livello di sviluppo del rinnovabile accusa un certo ritardo rispetto allo standard europeo. Tuttavia le potenzialità delle fonti rinnovabili in Italia (in particolare i settori solare, eolico e delle biomasse) possono permettere di recuperare ampiamente questo ritardo, se supportate da una politica fiscale e industriale mirata alla riduzione dei consumi e all'utilizzo razionale di energia. La quota delle fonti rinnovabili è cresciuta marginalmente, essendo passata dall'8% del 1995 al 9% del 2002. Nel grafico di Figura 2.17, invece, sono confrontati i tassi di crescita reali e quelli necessari al conseguimento degli obiettivi per il 2010 definiti dal Libro Bianco.

Potenzialità delle rinnovabili in Italia

Secondo numerose associazioni ambientaliste italiane, tra cui la sezione nazionale del WWF e Legambiente (che ha pubblicato nel 2004 il dossier "Idee e proposte per

rilanciare le fonti rinnovabili in Italia”), il principale ostacolo nella promozione delle energie rinnovabili è rappresentato dall’assenza di una scelta strategica di sviluppo in termini di politiche energetiche e industriali. Tali linee guida sono invece la chiave del buon livello di diffusione del rinnovabile in altri stati europei come la Germania, la Spagna o la Danimarca.

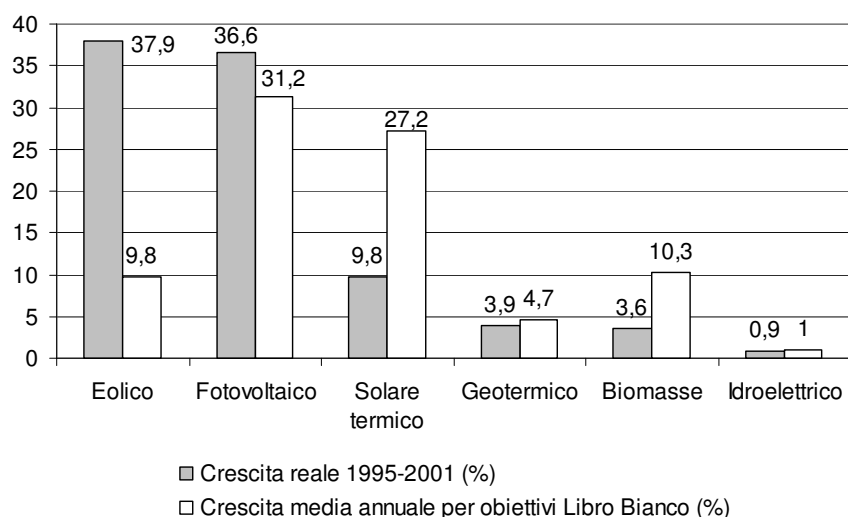


Figura 2.17: Energia primaria in Italia nel 2001 per fonte (Berlen, 2004).

Nel nostro Paese le fonti rinnovabili sono relegate, nonostante i passi avanti che ci sono stati, a un ruolo secondario: manca ancora la percezione delle potenzialità di queste risorse nella prospettiva della riduzione dei consumi e dell’inquinamento atmosferico; molti progetti, in particolare quelli legati all’installazione di impianti eolici e solari, sono resi difficoltosi dalla lunghezza e dalla complessità delle procedure di approvazione; altri intralci sono rappresentati dagli alti costi d’allacciamento nella generazione distribuita.

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili presuppone un’inversione di rotta rispetto alle classiche logiche dell’attuale modello energetico, in cui le centrali elettriche di grandi dimensioni (per sfruttare i vantaggi dell’economia di scala) detengono un ruolo fondamentale. L’espansione del rinnovabile implica un sistema sempre più distribuito, in grado di far fronte a una domanda sempre più suddivisa nel territorio: questi cambiamenti sono resi possibili dalla natura stessa delle fonti rinnovabili, che presuppongono la riduzione delle catene di produzione dell’energia. Il nuovo sistema di generazione, gestione e distribuzione dell’energia richiede la riconversione di molte strutture, la nascita di nuove aziende (lontane dagli schemi classici dei grandi gruppi industriali) e una forte sinergia tra industria e ricerca. Le Regioni possono agevolare questi processi attraverso l’elaborazione di piani energetici regionali che annoverino tra gli obiettivi l’introduzione del rinnovabile nello specifico contesto territoriale, i programmi di incentivazione per aziende e cittadini e la semplificazione delle procedure autorizzative.

I provvedimenti pratici in grado di dare una svolta alla diffusione del rinnovabile si traducono in una serie di misure: prima fra queste l’approvazione dei provvedimenti del D.L. n. 387, al fine di definire le regole e le tariffe per l’elettricità prodotta da impianti solari fotovoltaici. I contenuti di tale decreto comprendono anche le linee guida per l’approvazione dei progetti di impianti da fonti rinnovabili e le regole per gli impianti rinnovabili di potenza inferiore ai 20 kW (per la generazione diffusa).

Altri obiettivi per un piano di rilancio del rinnovabile in Italia sono la realizzazione di almeno il 2% della produzione energetica complessivamente prodotta da fonti rinnovabili attraverso il meccanismo dei Certificati Verdi. Un'altra proposta prevede l'introduzione del meccanismo dell'incentivo del conto energia per la produzione di energia da tutte le fonti rinnovabili. È auspicabile l'introduzione di obiettivi di programmazione degli impianti eolici e solari (anche tramite la definizione delle aree adatte all'installazione di queste tecnologie) e l'obbligo di dotazione dei pannelli solari termici -secondo l'esempio della Spagna – negli edifici di nuova costruzione e nelle ristrutturazioni più importanti (quest'ultimo accorgimento è di competenza dei regolamenti edilizi). I regolamenti edilizi dovrebbero essere strumenti che garantiscano l'inclusione di criteri per il risparmio e la certificazione energetica e, in generale, regole e incentivi per la promozione delle energie rinnovabili a livello locale.

2.3.2 La cattura del carbonio

Il processo della cattura e sequestro del carbonio (CCS, da carbon capture and sequestration) consiste nella separazione della CO₂ dalle fonti industriali ed energetiche, nel trasporto ad un sito di stoccaggio e nell'isolamento a lungo termine dall'atmosfera, come mostrato in Figura 2.18. Il CCS, insieme al risparmio energetico e all'utilizzo delle fonti rinnovabili, dovrà contribuire significativamente al raggiungimento dell'obiettivo di riduzione di gas serra (Herzog e Golomb, 2004). L'interesse per questa tecnologia è in aumento poiché è compatibile con la grande industria di produzione di energia.

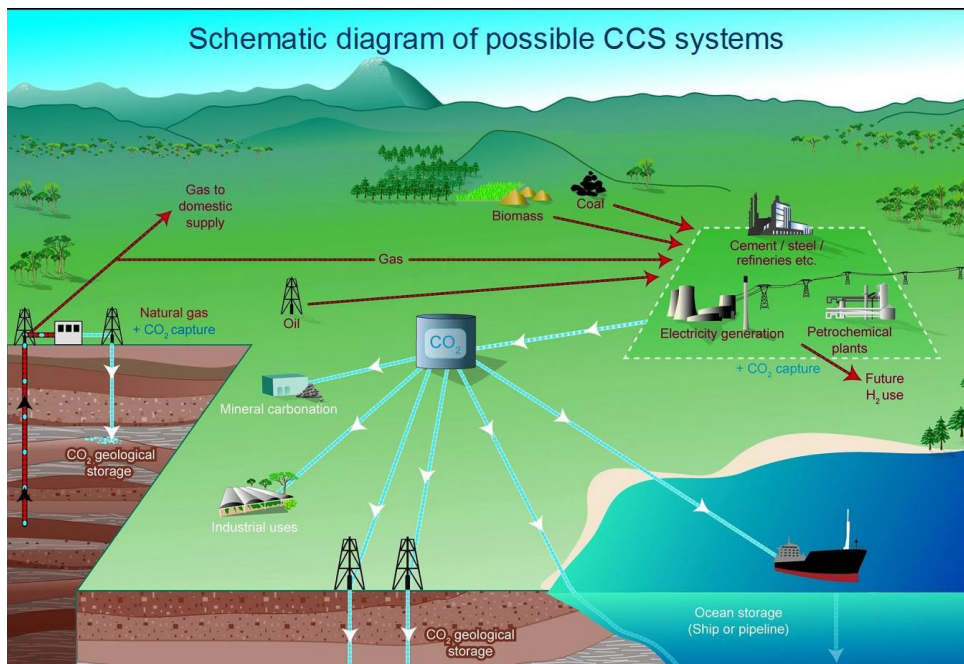


Figura 2.18: Sistema di CCS; sono mostrate le possibili fonti di carbonio e le opzioni di trasporto e stoccaggio (IPCC, 2005).

La cattura della CO₂ può avvenire alla sorgente dell'emissione, quale centrali elettriche a carbone o biomassa, industrie che emettono grandi quantità di CO₂, impianti di produzione di idrogeno da combustibili fossili. La CO₂ viene quindi compressa e trasportata per lo stoccaggio nelle formazioni geologiche (giacimenti di gas e di petrolio, bacini carboniferi e le formazioni saline profonde), nell'oceano (rilascio diretto

nella colonna d'acqua o sul pavimento profondo oceanico), in carbonati minerali, o per uso nei processi industriali.

La riduzione netta delle emissioni in atmosfera dipende dalla frazione di CO₂ catturata, dall'aumento della CO₂ emessa a causa della riduzione di efficienza generale nelle centrali elettriche o nei processi industriali (per l'energia supplementare necessaria per la cattura), dal trasporto e dallo stoccaggio. Le tecnologie ad oggi disponibili sono in grado di catturare circa l'85-95% della CO₂. Una centrale elettrica dotata di un sistema di CCS (con accesso ad un sito di stoccaggio nell'oceano o nel sottosuolo) avrebbe bisogno di approssimativamente il 10-40% di energia in più (per lo stoccaggio e la compressione della CO₂) rispetto ad una centrale equivalente senza CCS. Nel caso di stoccaggio nel lungo termine sicuro, una centrale elettrica con CCS potrebbe ridurre le emissioni del CO₂ in atmosfera di circa l'80-90%, rispetto ad una centrale senza CCS. I sistemi di CCS con stoccaggio in carbonati minerali avrebbero bisogno di circa il 60-180% di energia in più rispetto ad un impianto equivalente senza CCS.

La Tabella 2.8 indica la capacità di stoccaggio globale di CO₂ nei vari mezzi. I siti nell'oceano e nel sottosuolo hanno grandi potenzialità di stoccaggio. Per avere un termine di confronto, si consideri che le emissioni antropogeniche attuali ammontano a circa 7 GtC all'anno (1 GtC = 1 miliardo di metri cubi di carbonio equivalente = 3.7 Gt CO₂) (Herzog e Golomb, 2004).

Tabella 2.8: Capacità globale di stoccaggio di CO₂ (Herzog e Golomb, 2004).

Sequestration option	Worldwide capacity GtC
Ocean	1.000-10.000
Deep saline formation	100-10.000
Depleted oil and gas reservoirs	100-1.000
Coal seams	10-1.000
Terrestrial	10-100
Utilization	Currently<0,1 GtC/year

2.3.3 Kyoto e oltre: gli obiettivi dell'UE

Il Protocollo di Kyoto rappresenta lo strumento attuativo della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici e si propone come primo grande passo verso una strategia internazionale per la progressiva riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera, per contrastare i cambiamenti climatici in corso. Tale documento, sulla base del principio della responsabilità comune, ma differenziata, impegna i paesi industrializzati e quelli dell'Est europeo. Gli stati soggetti a queste direttive sono 39, tra cui i principali sono i paesi europei, il Giappone, la Russia, gli Stati Uniti, il Canada, l'Australia e la Nuova Zelanda (allegato B del protocollo). La riduzione complessiva del 5,2% non è uguale per tutti i paesi: per gli stati membri della UE la riduzione è pari all'8%, per gli Stati Uniti al 7%, per il Giappone al 6%; l'allegato B del protocollo contiene gli impegni quantificati sottoscritti dalle parti.

Per il periodo successivo al 2012 dovranno essere negoziati nuovi obiettivi che potrebbero includere un maggiore numero di paesi. Per il raggiungimento degli obiettivi, il protocollo propone una serie di provvedimenti, come per esempio: il miglioramento dell'efficienza energetica, la promozione di forme di agricoltura sostenibili e lo sviluppo di fonti di energia rinnovabili. È auspicata anche la cooperazione con le altre parti contraenti, con lo scambio di informazioni ed esperienze e il coordinamento delle politiche nazionali con l'impiego dei meccanismi flessibili, illustrati di seguito.

Le direttive di Kyoto in materia di uso del suolo

Il ruolo strategico degli ecosistemi vegetali, tra cui le foreste, nelle politiche di mitigazione delle emissioni di gas serra è riconosciuto dalla capacità di assorbimento e fissaggio degli stessi; per questa ragione le foreste sono considerate alla stregua di serbatoi (sinks) di carbonio, e pertanto la Convenzione Quadro sui cambiamenti climatici stabilisce la necessità di quantificare concretamente i possibili abbattimenti di gas serra. In occasione della Conferenza di Milano (Cop9, 2003) è stato presentato il rapporto Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry (GPG-LULUCF), a cura dell'IPCC. Il rapporto indica le tecniche per la stima dei depositi (stock) di carbonio e delle variazioni di tali depositi nelle varie categorie di uso del suolo, sull'intero territorio nazionale (in base alle prescrizioni della convenzione) e su tutti i terreni destinati alle attività previste nel Protocollo di Kyoto. L'UNFCCC obbliga i suoi membri a riportare i dati sulle variazioni delle quantità di carbonio dovute alle attività di cambiamento dell'uso del suolo e alle attività di gestione del patrimonio forestale.

Per quanto concerne l'Italia, il Ministero dell'Ambiente ha predisposto un piano, collegato alla delibera CIPE 23 del 19 dicembre 2002, in cui sono definite le attività atte alla realizzazione del potenziale massimo di assorbimento del carbonio. Secondo tale delibera il potenziale di assorbimento medio annuo nel periodo 2008-2012 ammonta a 10,2 Mt CO₂, pari all'11% dell'impegno di riduzione complessivo. Di queste, il 40,2% corrisponde alle misure di gestione delle foreste già esistenti sul territorio nazionale, il 58,9% alle attività di afforestazione e riforestazione e il rimanente 0,9% alla gestione di prati, pascoli, suoli agricoli e alla rivegetazione (la diffusione di copertura vegetale su terreni erosi, cave ecc.).

I meccanismi flessibili

I meccanismi flessibili sono strumenti economici introdotti al fine di diminuire il costo complessivo legato alla riduzione dei gas serra. Il meccanismo dell'International Emission Trading (IET) permette a uno stato o a un'azienda di acquistare o vendere permessi di emissione (indicati con la sigla AAUS, Assigned Amount Units) al fine di ridurre le proprie emissioni alla quota prevista dalle direttive del protocollo: è chiaro che, a chi possiede questi permessi, risulterà opportuno venderli solo nel caso in cui le proprie emissioni siano al di sotto della soglia fissata. Lo IET è stato istituito dalla direttiva 2003/87/EC, che regola il mercato delle emissioni secondo criteri di efficacia dei costi ed efficienza economica.

Il sistema della Joint Implementation permette alle imprese dei paesi con vincoli di emissione di sviluppare progetti mirati alla riduzione delle emissioni in altri paesi anch'essi soggetti alle prescrizioni di riduzione delle emissioni; si tratta di operazioni a somma zero, dal momento che le emissioni totali permesse nei due paesi coinvolti rimangono le stesse. Lo scopo è la riduzione dei costi d'adempimento delle disposizioni di Kyoto: la realizzazione dei progetti di Joint Implementation genera crediti di emissione (ERUS, Emissions Reduction Units), utilizzabili nell'ottemperanza delle prescrizioni del protocollo. Dato che la Joint Implementation riguarda paesi con limiti di emissione, i crediti ERUS sono sottratti all'ammontare di permessi di emissione inizialmente assegnati al paese ospite.

Il procedimento di Clean Development Mechanism (CDM) è uno strumento che permette alle imprese dei paesi industrializzati (con vincoli di emissione) di realizzare progetti che mirino alla riduzione delle emissioni di gas serra nei paesi in via di sviluppo senza vincoli di emissione.

Obiettivo principale di questo meccanismo è la possibilità di accesso alle tecnologie pulite per i paesi emergenti, avviandoli a strategie orientate allo sviluppo sostenibile; per i paesi sviluppati permette l'abbattimento delle emissioni dove è più conveniente a livello economico, con la conseguente riduzione dei costi per l'adempimento delle prescrizioni del protocollo.

Aspetti economici del Protocollo

In attesa dell'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, numerosi studi sono stati svolti per stimare il costo della riduzione dell'emissione dei gas serra da parte dei paesi industrializzati. In effetti, il presunto elevato costo dell'abbattimento delle emissioni ha costituito un importante ostacolo alla ratifica del protocollo, in particolare da parte degli Stati Uniti. Tuttavia, secondo i risultati di queste analisi, il raggiungimento degli obiettivi presuppone costi bassi, anche senza il ricorso ai meccanismi flessibili: i costi di riduzione sono valutati tra i 3 e i 20 \$ per t CO₂⁻¹ rimossa, cifra che rappresenta non più del 3-5% dei costi energetici totali per la maggiore parte dei settori (Murota e Takase, 2001). Secondo il terzo Rapporto dell'IPCC (2001), l'impatto di Kyoto sul PIL dei principali paesi industrializzati sarà inferiore all'1%, senza considerare il mercato delle emissioni; la percentuale scende allo 0,1 considerando gli effetti dell'Emission Trading. L'impatto del Protocollo di Kyoto appare, quindi, limitato, passando in secondo piano rispetto agli altri fattori economici: si prevede che l'Unione Europea raggiunga l'85-95% degli obiettivi del protocollo senza che questo influisca sulla competitività (Harmelink *et al.*, 2001). Vi sono poi altri benefici addizionali, tra cui l'accesso al nuovo mercato internazionale del carbonio, con un valore che si stima superiore ai 30 miliardi di dollari, e la partecipazione ai progetti CDM (il cui valore è stimato dalle proiezioni tra i 5 e 17 miliardi di dollari all'anno entro il 2012). Altri vantaggi sono legati ai nuovi mercati delle risorse e delle tecnologie di energia sostenibile e dei servizi energetici; secondo le previsioni del World Energy Assessment dell'UNEP e dell'UNDP il solo mercato globale dell'energia rinnovabile raggiungerà un valore tra i 5 e i 18 miliardi di dollari all'anno entro il 2012. I paesi che non adotteranno strategie di sviluppo orientate al rispetto delle prescrizioni del protocollo faranno in ritardo il proprio ingresso nei nuovi mercati, quando i profitti saranno già in fase di diminuzione. Vi sono poi i benefici legati alla riduzione della domanda di energia e alla diversificazione dei combustibili, al miglioramento dell'efficienza energetica, alla riduzione dell'inquinamento atmosferico anche a scala locale e ai danni provocati dai cambiamenti climatici.

Le direttive in Europa

Nel dicembre 2003, in occasione della Cop9 di Milano, è stata presentata una relazione sullo stato dell'avanzamento delle politiche verso Kyoto. Il quadro della situazione non risulta positivo: mantenendo i trend attuali, l'obiettivo di abbattimento dell'8% non sarà raggiunto entro il 2010.

Tra gli Stati europei solo Svezia e Gran Bretagna hanno rispettato le prescrizioni di riferimento, mentre il peggior risultato spetta alla Spagna (+30% sul valore di soglia). I 5 nuovi stati dell'Unione hanno ridotto le rispettive emissioni e si stima che, entro il 2010, i paesi baltici possano ridurre fino al 5% le proprie emissioni. Nel 2000 l'Unione Europea ha specificato le misure previste per avviare l'inversione di tendenza, attraverso una strategia decennale, nota come Strategia di Lisbona, contenente le priorità comunitarie in tema di politiche energetiche. La commissione appositamente istituita ha individuato sei linee-guida di riferimento:

- il miglioramento dell'efficienza energetica;

- un mercato interno nei settori del gas e dell'elettricità;
- il rafforzamento della sicurezza e della protezione nucleare;
- la sicurezza dell'approvvigionamento energetico;
- il miglioramento del legame tra le politiche in materia di energia, ambiente e ricerca;
- la promozione delle fonti energetiche rinnovabili.

Per quanto concerne quest'ultimo punto il traguardo europeo è la produzione di almeno il 12% del fabbisogno complessivo con l'impiego di fonti rinnovabili, entro il 2010. Sono stati fissati altri due obiettivi, la promozione dei biocombustibili e la produzione di almeno il 22% dell'elettricità attraverso energia rinnovabile (elettricità verde).

2.3.4 L'attuazione del Protocollo di Kyoto in Italia

L'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto con la legge n. 120 del primo giugno 2002, nella quale viene presentato il Piano Nazionale per l'abbattimento delle emissioni di gas serra. L'obiettivo di riduzione è fissato per l'Italia al 6,5% delle emissioni del 1990 (da 508 si deve quindi scendere a 475 Mt CO_{2eq}). Purtroppo secondo lo scenario tendenziale, che prevede il mantenimento dei trend attuali di emissione, le emissioni italiane del 2010 saranno in eccedenza di circa 93 Mt CO_{2eq} rispetto a quelle del 1990 (APAT, 2005). È stato inoltre individuato uno scenario di emissione "di riferimento" che considera gli effetti di provvedimenti e programmi nei settori individuati dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. In Tabella 2.9 sono riportate le emissioni di gas serra per settore nel 1990, nel 2000 e nei due scenari tendenziale e di riferimento.

Le misure previste nello scenario di riferimento consentono una riduzione delle emissioni per un valore di circa 53 Mt CO₂ anno⁻¹ per il 2010: per il raggiungimento dell'obiettivo stabilito dal protocollo si richiede un ulteriore abbattimento di 40 Mt CO₂ circa. Le misure previste in questo scenario comprendono sia l'attuazione di leggi nazionali già in vigore e direttive europee (in materia di produzione di energia, di miglioramento dell'efficienza dei trasporti, di riduzione dei consumi energetici) sia i progetti di Joint Implementation e Clean Development Mechanism in Cina, nei paesi balcanici e nel nord Africa. Le politiche di riduzione nel settore agricolo e forestale dovrebbero, secondo le previsioni di entrambi gli scenari, ridurre le emissioni annuali di circa 50 Mt CO₂ eq. Queste politiche consistono nello sviluppo di programmi e iniziative per l'aumento e la migliore gestione delle aree forestali e boschive, il recupero delle aree abbandonate e la protezione del territorio dai rischi di dissesto e desertificazione per mezzo di progetti di afforestazione e riforestazione; tali progetti devono prevedere l'impiego di specie autoctone ed essere realizzati secondo criteri di ecosostenibilità. Per colmare il restante divario verso l'obiettivo di abbattimento si è provveduto alla definizione di un insieme di ulteriori programmi e iniziative, tra cui altri progetti di CDM, da implementare nel periodo 2004-2010. Le proiezioni indicano che tali misure saranno in grado di operare una riduzione delle emissioni tra le 58 e le 95,8 Mt CO₂ anno⁻¹. Tra queste disposizioni si sottolinea il ruolo strategico delle energie rinnovabili, che, con una riduzione annua compresa tra le 1,8 e le 3,4 Mt CO₂, rappresentano uno dei settori principali nelle politiche relative all'utilizzo di fonti di energia.

Tabella 2.9: Emissioni di CO₂ equivalente nel 1990, 2000 e in 2 scenari per il 2010 (www.minambiente.it, 2005).

Anno	1990	2000	2010 tend.	2010 rif.
	[Mt CO _{2eq}]			
Da usi di fonti energetiche	424,9	452,3	484,1	444,5
Industrie energetiche	147,4	160,8	170,4	144,4
Industria manifatturiera e costruzioni	85,5	77,9	80,2	80,2
Trasporti	103,5	124,7	142,2	134,7
Civile (incluso terziario e pubblica amministrazione)	70,2	72,1	74,1	68
Agricoltura	9	9	9,6	9,6
Altro (fucine, militari, aziende di distribuzione)	9,3	7,8	7,6	7,6
Da altre fonti	96,1	94,5	95,6	95,6
Processi industriali (ind. Mineraria, chimica)	35,9	33,9	30,4	30,4
Agricoltura	43,4	42,6	41	41
Rifiuti	13,7	14,2	7,5	7,5
Altro (solventi, fluorurati)	3,1	3,8	16,7	16,7
Totale	521	546,8	579,7	540,1

2.4 Bibliografia

Apat, 2006. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2004, National Inventory Report, Rapporto 47, Roma. [online] URL: http://www.apat.gov.it/site/contentfiles/00143300/143306_rapporto_2006_70.pdf.

Barker, T., I. Bashmakov, A. Alharthi, M. Amann, L. Cifuentes, J. Drexhage, M. Duan, O. Edenhofer, B. Flannery, M. Grubb, M. Hoogwijk, F. I. Ibitoye, C. J. Jepma, W.A. Pizer, K. Yamaji, 2007: Mitigation from a cross-sectoral perspective. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Berlen L. (a cura di), 2004. L'osservatorio delle fonti rinnovabili in Italia 2004, ISES Italia, Roma.

BP, 2007. BP Statistical Review of World Energy June 2007. [online] URL: www.bp.com.

Cipe – Comitato Italiano per la Programmazione Economica, 1999. Libro Bianco per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili (Deliberazione CIPE n. 126 del 6 agosto 1999), G.U. n. 253 del 27 ottobre 1999.

Commissione Europea, 1997. Renewable energy: White Paper laying down a Community strategy and action plan, Bruxelles.

Commissione Europea, 2000. Towards a European strategy for the security of energy supply, Bruxelles.

Comunità Europea, 2005. Piano d'Azione della Biomassa, COM(2005)628, Bruxelles.

Commissione Europea, 2005b. European energy and transport. Trends to 2030 – update 2005, Bruxelles. [online] URL: http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/trends_2030_update_2005/energy_transport_trends_2030_update_2005_en.pdf

EU, 2006. Energy & Transport : Figures and Main Facts, Directorates-General Energy and Transport, Bruxelles. [online] URL: http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/figures/pocketbook/2006_en.htm

EurObserv'ER, 2005. 6th report – State of renewable energies in Europe, Parigi. [online] URL: http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/barobilan/barobilan6.pdf

Eurostat, 2006. The Eurostat yearbook, Europe in figures – Eurostat yearbook 2006-07, Luxemburg.

Eurostat, 2007. Environment and energy, <http://ec.europa.eu/eurostat>.

Harmelink M, D Philipsen, D de Jager, K Blok, *Kyoto Without the us: Costs and Benefits of eu Ratification of the Kyoto Protocol*, ECOFYS, Utrecht, The Netherlands, 2001. [online] URL: <http://assets.panda.org/downloads/finalcomp.doc>

Herzog H., D. Golomb, 2004. Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use, in Encyclopedia of Energy, Elsevier. [online] URL: http://sequestration.mit.edu/pdf/encyclopedia_of_energy_article.pdf.

IEA, 2004. World Energy Outlook 2004, Paris. [online] URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/2004.asp>

IEA, 2005. World Energy Outlook 2005, Paris.

IEA, 2007a. Key world energy statistics 2007, Paris. [online] URL: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/key_stats_2007.pdf

IEA, 2007b. Map Energy Indicators - World - TPES / Population. [online] URL: http://www.iea.org/Textbase/country/maps/world/tpes_pop.htm

IPCC, 2000. Emissions Scenarios. 2000, [Nakicenovic N., Swart R. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

IPCC, 2001. Climate Change, 2001: mitigation, Cambridge University Press, Cambridge (UK). Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), [Bert Metz, Ogunlade Davidson, Rob Swart and Jiahua Pan (Eds.)] Cambridge University Press, UK. pp 700

IPCC, 2005. IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, e L. A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

IPCC, 2007a. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor e H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2007b. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Keeling C.D., T.P. Whorf, Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A., 2005. [online] URL: <http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/sio-mlo.htm>

Kerr R.A., 2005. Energy supplies: bumpy road ahead for world's oil, Science 310(5751): 1106 – 1108.

MIT, 2007. The future of coal, Boston. [online] URL: <http://web.mit.edu/coal/>.

Mosier A., J.K. Syers, J.R. Freney (eds.), 2004. Agriculture And The Nitrogen Cycle: Assessing The Impacts Of Fertilizer Use, Island Press.

Murota Y., K. Takase, 2001. Will Ratification of the Kyoto protocol Result in Economic Loss? serf – Shonan Environmental Research Force, Commissioned by WWF Climate Change Campaign.

Nature, 2007. Graphic detail: Gas exchange: CO₂ emissions 1990–2006, Nature 447: 1038.

NEAA - Netherlands Environmental Assessment Agency, 2007. China now no. 1 in CO₂ emissions; USA in second position, Netherlands Environment Assessment Agency. [online] URL: <http://www.mnp.nl/en/index.html>

OECD/IEA, 2006. [online] URL: <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>, visited October 2007.

Pacala S., R. Socolow, 2004. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, Science 305(5686): 968-972.

Paustian K., J.M. Antle, J. Sheehan, E.A. Paul, 2006. Agriculture's Role in Greenhouse Gas Mitigation, Pew Center on Global Climate Change, [online] URL: <http://www.pewclimate.org/docUploads/Agriculture%27s%20Role%20in%20GHG%20Mitigation.pdf>.

- Rifkin J., 2002. Economia all'idrogeno: la creazione del Worldwide Energy Web e la redistribuzione del potere sulla Terra, Mondadori.
- Smith, P., D. Martino, Z. Cai, D. Gwary, H. Janzen, P. Kumar *et al.*, 2007: Agriculture. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff *et al.*, 2007. Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tans P., 2007. NOAA/ESRL. [online] URL: www.esrl.noaa.gov/gmd/cgg/trends
- The Economist, 2007a. Coal power: still going strong, 17 novembre.
- The Economist.com, 2007b. Oil - Barrelling upwards, Sep 19th 2007.
- UN Department of Economic and Social Affairs, 2006. World Urbanization Prospects: The 2005 Revision Population Database. [online] URL: <http://esa.un.org/unup/>.
- UN, 2005. World urbanization prospects: the 2005 revision. [online] URL: <http://www.un.org/esa/population/publications/WUP2005/2005wup.htm>
- UNDP UN Development Programme, 2004. World Energy Assessment Overview 2004 update, New York. [online] URL: <http://www.undp.org/energy/weaover2004.htm>.
- UNDP UN Development Programme, 2006. Human development report 2006, Beyond scarcity: power, poverty and the global water crisis, New York. [online] URL: <http://hdr.undp.org/hdr2006/report.cfm>.

3 Le biomasse come fonte rinnovabile di energia

Le criticità legate alla decrescente disponibilità delle fonti energetiche di origine fossile, nonché alla loro distribuzione geografica in aree politicamente instabili, unitamente alle ingenti problematiche ambientali a scala globale, hanno indotto una crescente attenzione verso la ricerca di fonti energetiche alternative. In questo capitolo si focalizza l'attenzione sull'energia ottenuta dalle biomasse: questa energia è ricavata tramite la trasformazione di prodotti caratterizzati dalla loro natura organica di neoformazione.

Con il termine “biomassa” ci si riferisce ad una gran quantità di materiali di natura estremamente eterogenea. Con alcune eccezioni, si può dire che è biomassa tutto ciò che ha matrice organica. Sono da escludere le plastiche e i materiali fossili, che, pur rientrando nella *chimica del carbonio*, non hanno nulla a che vedere con la caratterizzazione, che qui interessa, dei materiali organici.

La biomassa rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Questa, infatti, consente alle piante di convertire la CO_2 atmosferica in materia organica, attraverso il processo di fotosintesi, durante la crescita. In questo modo, vengono fissate complessivamente circa $2 \cdot 10^{11}$ tonnellate di carbonio all'anno, con un contenuto energetico dell'ordine di $70 \cdot 10^3$ Mtep. La biomassa, attraverso il processo della fotosintesi, cattura la radiazione solare e la trasforma in energia chimica; essa costituisce quindi una risorsa rinnovabile ed inesauribile, se opportunamente utilizzata, per la produzione di altre forme di energia.

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili, ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Delle biomasse fanno quindi parte:

- i sottoprodotti delle produzioni erbacee, arboree e delle prime lavorazioni agro-industriali;
- i sottoprodotti delle operazioni forestali, per il governo dei boschi e per la produzione di legname da opera, e delle prime lavorazioni del legno o altro (residui dei tagli dell'erba, delle foglie, etc.);
- le colture (arboree ed erbacee) destinate specificatamente alla produzione di biocarburanti e biocombustibili;
- i reflui zootecnici destinati alla produzione di biogas;
- la parte organica dei rifiuti urbani;
- i residui inutilizzabili di produzioni destinate all'alimentazione umana o animale (pule dei cereali, canna da zucchero ecc).

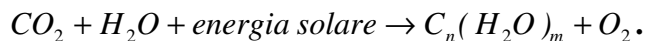
A causa della grande varietà delle biomasse (cui corrisponde la varietà delle caratteristiche chimico-fisiche), non esiste un'unica tecnologia per trasformare l'energia contenuta in energia utilizzabile. Nel seguito di questo capitolo, si cerca quindi di descrivere le biomasse, le loro caratteristiche e i metodi di utilizzo in un quadro generale.

È necessario, però, sottolineare che le biomasse non sono rinnovabili *tout court*, ma che sono invece *potenzialmente* rinnovabili: se l'approvvigionamento di una centrale a biomasse è assicurato dal disboscamento di una foresta, non si tratta ovviamente di una risorsa rinnovabile. Se, invece, si attrezza una certa area a piantagione colturale in modo che questa fornisca ogni anno la quantità di biomassa necessaria alla centrale, allora si

ha a che fare con una risorsa rinnovabile. Se si utilizzano scarti della lavorazione del legno, oppure sottoprodotti colturali, ramaglie raccolte dalla pulizia e dalla manutenzione dei boschi o reflui zootecnici, non solo si ha a che fare con una risorsa rinnovabile, ma si contribuisce anche al riutilizzo di sottoprodotti e scarti che, nella maggior parte dei casi, sarebbero conferiti in discarica o anche bruciati senza alcun controllo delle emissioni. La valutazione della sostenibilità ambientale, invece, deve tener conto non solo della provenienza della materia prima, ma anche delle implicazioni del suo utilizzo a fini energetici. Ad esempio, la rimozione di residui agricoli dovrebbe essere soppressa valutando, oltre ai benefici della bioenergia, anche le pratiche agricole (ad esempio, la combustione a bordo campo) e la rimozione di nutrienti dal suolo (che poi devono essere reintegrati con l'applicazione di fertilizzanti).

3.1 Biomasse, bioenergia e biocombustibili

Il contenuto in carbonio originario delle biomasse deriva da processi di fotosintesi vegetale, ovvero quella reazione biologica tramite la quale le piante trasformano la luce solare, l'acqua e l'anidride carbonica in carboidrati e ossigeno, secondo la formula:



Questa prima definizione di biomassa contiene implicitamente il concetto di fonte rinnovabile, in quanto esclude tutte le biomasse fossilizzate e derivati, i cui tempi di formazione, dell'ordine dei milioni di anni, non sono comparabili con i tempi di sfruttamento della risorsa, ben più rapidi considerando l'attuale tasso di consumo.

Il termine biomasse, inteso come insieme delle sostanze organiche di origine vegetale o animale, racchiude un'ampia gamma di prodotti di origine dedicata o derivanti da scarti e residui di varie produzioni, che spaziano da quelle agricole-forestali e agroindustriali ai rifiuti domestici (McKendry, 2002a; Klass, 1998). In Figura 3.1 è riportata una schematizzazione dei vari tipi di biomasse e della loro provenienza.

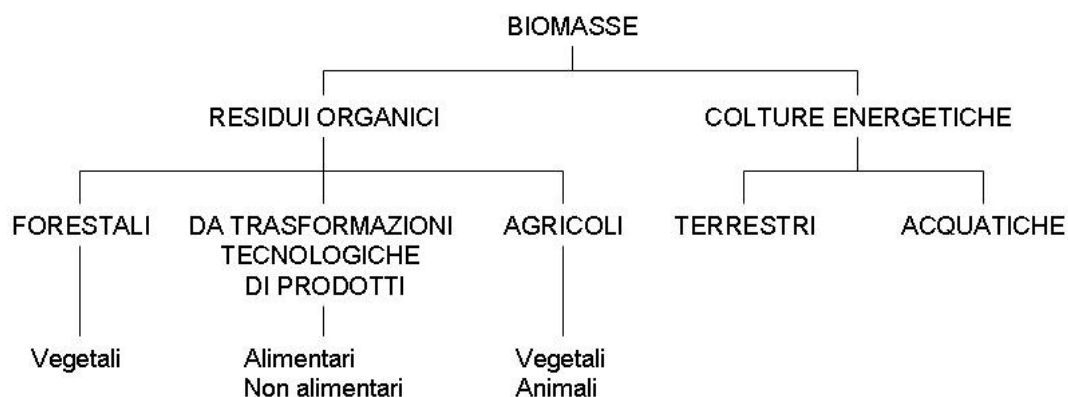


Figura 3.1: Schema delle varie tipologie di biomasse e loro provenienza.

Con il termine biocombustibili si indicano, invece, tutti quei combustibili solidi, liquidi o gassosi derivati direttamente dalle biomasse (per esempio la legna da ardere), oppure ottenuti in seguito ad un processo di trasformazione del materiale organico in esse contenuto in combustibile di diversa forma e proprietà (per esempio il biodiesel è ricavato da piante oleaginose, il bioetanolo da piante zuccherine). Infine, con il termine bioenergia si va a indicare qualsivoglia forma di energia utile (termica o elettrica)

ottenuta tramite l'uso di biocombustibili. Si sottolinea che quando si parla di energia da biomasse, l'aspetto della conversione è solo una parte di un processo esteso, definito come filiera energetica, che comprende, a livello generale, l'approvvigionamento, la raccolta e trasporto e l'utilizzo finale dell'energia, come illustrato in Figura 3.2.



Figura 3.2: Fasi del processo di generazione di energia da biomassa.

Si possono distinguere quattro tipi principali di biomasse:

- piante legnose,
- piante erbacee,
- piante acquatiche,
- concime, letame.

Un'ulteriore suddivisione porta a distinguere tra piante erbacee ad alto o a basso contenuto di umidità. A parte particolari applicazioni, le tecnologie disponibili riguardano quelle a basso contenuto d'acqua. Una volta stabilito il contenuto di umidità, a seconda del tipo di biomassa, si individua il processo di conversione più adatto.

Allo stato naturale, o di tal quale (tq), la biomassa è costituita da una frazione umida e da una frazione secca (sostanza secca, ss), composta essenzialmente di fibra grezza. La scelta del processo di conversione energetica è legata quindi alle proprietà chimico-fisiche della biomassa, in particolare al rapporto C/N , tra il contenuto di carbonio (C) e di azoto (N), e della sua umidità. Schematicamente, per le conversioni di tipo termochimico (combustione e gassificazione), risultano adatte le biomasse che hanno le seguenti caratteristiche:

- un elevato rapporto tra il contenuto di carbonio e quello di azoto ($C/N > 30$);
- un ridotto contenuto di umidità ($u < 30\div 50\%$ sul tq);
- un sufficiente potere calorifico inferiore ($pci > 2400$ kcal/kg ss).

Per le conversioni di tipo termochimico risultano quindi idonee la legna e i suoi derivati (segatura, trucioli, ecc.), i più comuni sottoprodotti colturali di tipo ligneo-cellulosico (paglia di cereali, residui di potature, ecc.) e alcuni scarti di lavorazione (lolla, gusci, noccioli, ecc.).

Per le conversioni di tipo biochimico, sono adatte le biomasse che presentano le seguenti caratteristiche:

- un ridotto rapporto carbonio/azoto ($C/N < 30$);
- un elevato contenuto di umidità ($u > 30\div 50\%$ sul tq).

Queste biomasse, con una frazione umida preponderante rispetto a quella secca, sono utilizzabili in processi come la digestione anaerobica per la produzione di biogas. Sono quindi adatte le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti colturali (foglie e steli di barbabietola, patata, ortaggi, ecc.), i reflui zootecnici e alcuni scarti di lavorazione (acque di lavorazione dei frantoi, ecc.), oltre alla biomassa organica eterogenea immagazzinata nelle discariche controllate.

In percentuale sul peso, il legno contiene in media 40-60% di cellulosa, 20-40% di emicellulosa, 10-25% di lignina oltre ad altre sostanze minerali, grassi, cere e resine, proteine e altri prodotti di origine biologica (McKendry, 2002a). La frazione di cellulosa è quella più biodegradabile e, quindi, favorisce processi biochimici come la fermentazione.

Anche se i valori del potere calorifico inferiore (pci) dei diversi tipi di biomassa sono simili, le caratteristiche variano molto, soprattutto per quanto riguarda umidità, contenuto di ceneri, dimensioni e peso specifico. Alcune di queste caratteristiche sono riportate in Tabella 3.1.

Tabella 3.1: Proprietà di alcuni tipi di biomassa (Quaak *et al.*, 1999).

Tipo di biomassa	pci (kJ/kg)	Umidità (%)	Ceneri (%)
Mais	13.000÷15.000	10÷20	2÷7
Paglia	12.000	10	4,4
Legno	8.400÷17.000	10÷60	0,25÷1,7
Torba	9.000÷15.000	13÷15	1÷20
Lolla di riso	14.000	9	19
Carbone	25.000÷32.000	1÷10	0,5÷6

Dalla composizione elementare della biomassa, in Tabella 3.2, si osserva che i componenti principali sono carbonio, ossigeno e idrogeno, oltre a bassi valori di azoto. Nel processo di conversione della biomassa in energia, si ottiene come prodotto anche un residuo. Nei processi termochimici, questo residuo è costituito dalle ceneri, mentre nei processi biochimici è costituito dalla frazione non biodegradabile di carbone contenuta nella biomassa.

I residui, oltre a diminuire l'energia disponibile, possono creare anche dei problemi di funzionamento alle macchine, soprattutto in processi termochimici. A causa delle elevate temperature possono fondersi e formare sostanze liquide molto dense, che possono danneggiare la macchina. È quindi importante conoscere la composizione della biomassa per sapere quali elementi potenzialmente pericolosi contiene. In particolare, si pone attenzione sulla quantità di metalli alcalini e alcalino-terrosi: sodio, potassio, magnesio e calcio. Ad alte temperature, questi metalli possono reagire con il silicio e formare un liquido denso e appiccicoso che può bloccare le tubazioni delle macchine. Anche se il contenuto di silicio nella biomassa è basso, questo problema può presentarsi perché il terreno attaccato alla biomassa quasi sempre ne contiene.

Tabella 3.2: Composizione elementare media della biomassa (Quaak *et al.*, 1999).

Elemento	Percentuale in peso (sostanza secca e senza ceneri)
Carbonio	44÷51
Idrogeno	5,5÷6,7
Ossigeno	41÷50
Azoto	0,12÷0,60
Zolfo	0,0÷0,2

3.1.1 Le colture energetiche

Nella progettazione e pianificazione di una centrale a biomasse, è indispensabile garantire l'approvvigionamento della materia prima necessaria al suo funzionamento. Un modo per assicurarsi qualità e adeguata quantità è crescerla in colture dedicate, simili alle consuete piantagioni di pioppi.

Le piantagioni energetiche si caratterizzano per i seguenti aspetti: la produzione è massimizzata su archi temporali brevi, sono favorite densità elevate e preferite piantagioni ad elevata meccanizzazione. Turni brevi di taglio e alte densità, portano ad avere – nell'arco di pochi anni – fusti che possono essere tagliati con macchine adattate da quelle utilizzate nelle normali pratiche agricole. La Tabella 3.3 riporta alcuni

parametri tecnici ed economici relativi alle produzioni di biomasse con differenti metodi produttivi.

Tabella 3.3: Indici caratterizzanti la produzione di biomassa in colture arboree.

	Boschi cedui	Arboricoltura lineare	Short Rotation Forestry
Produttività	2-4 t/ha/a	8-11 t/ogni 100 ml	6-15 ton/ha/a
Prezzi (€/ton)	20-40	25-35	n.d.
Turni (anni)	12-25	4	3-5
Vincoli	Diseconomie di scala; impatti ambientali; accessibilità	Costi di sottrazione	Costi opportunità terreni e risorse idriche
Elementi di forza	Grandi superfici disponibili; ridotti costi impliciti di manodopera	Impatti ambientali; ridotti costi impliciti di manodopera	Diversificazione uso terreni agricoli; incentivi pubblici

In particolare, le caratteristiche di una Short Rotation Forestry (SRF) possono essere così riassunte: densità: 5.000-20.000 piante per ettaro; turno breve, di 2-5 anni; impianto: talee su terreni agricoli, gestiti con meccanizzazione integrale. In Tabella 3.4 sono riportate le rese, sia in termini di sostanza secca sia in termini energetici, per differenti tipologie di colture che possono essere utilizzate a scopo energetico.

La scelta della coltura energetica dipende in particolare dal tipo di suolo che si ha a disposizione; una prima scelta può essere quella di impiantare su terreni fertili specie con un'alta resa e su terreni marginali specie che comunque hanno una resa abbastanza buona, ad esempio:

- piante legnose con un'alta resa: pioppo, salice, eucalipto;
- piante erbacee con un'alta resa: miscanto, canna da zucchero, panico (*Panicum virgatum*, in inglese noto come switchgrass), sorgo;
- piante con una resa moderata: ontano, robinia, betulla, castagno, platano, pianta del tabacco.

Tabella 3.4: Resa energetica di alcuni tipi di biomassa (McKendry, 2002a).

Biomassa	Resa (tss/ha/anno)	pci (MJ/kg ss)	Resa energetica (GJ/ha)
Frumento	7 grano, 7 paglia 14 tot	12.3 paglia	123
Pioppo	10-15	17.3	173-259
Salice SRF	10-15	18.7	187-280
Panico	8	17.4	139
Miscanto	12-30	18.5	222-555

Svezia e Danimarca sono gli stati dell'UE in cui la SRF è più diffusa, con 15÷17.000 ha e 600 ha rispettivamente. Gli impianti producono circa 7.5-12 ton ss/ha/anno, utilizzate per alimentare sistemi municipali di teleriscaldamento. In Italia, considerando vaste superfici, la specie e il clone più produttivi nell'ambiente considerato (salice, pioppo, robinia ed eucalipto), ci si può attendere una produzione media di sostanza secca tra le 8 e le 15 ton/ha/anno. Restano comunque poche le sperimentazioni condotte e, per di più, il clima, il tipo di terreno e la vegetazione più adatta sono molto diversi da quelli dei paesi in cui le ricerche e le applicazioni sono più diffusi. In Facciotto *et al.* (2006) sono mostrati i risultati di importanti sperimentazioni italiane con cloni del pioppo e con il salice.

È interessante notare che, affinché una piantagione a ciclo breve sia sostenibile, essa deve rispettare almeno due requisiti: una sostenibilità di lungo periodo, che riguarda la sostituzione della biomassa utilizzata con nuova biomassa; una di breve periodo, ovvero il rispetto dell'ecosistema e delle condizioni naturali presenti. Se si vogliono realizzare delle piantagioni, è quindi meglio attenersi ad alcuni principi (Trinkaus, 1998; OECD, 1988) che possono essere così riassunti:

- Le piantagioni a ciclo breve dovrebbero essere incentivate solo dove il precedente uso del suolo era intensivo; non devono infatti essere considerate un sostituto di un ecosistema di alto valore ecologico. Le SRF sono ambienti semi-naturali e non devono essere viste come sostituti di ecosistemi come prati o pascoli. In aree di sfruttamento intensivo del suolo, invece, le piantagioni possono migliorare la situazione complessiva. Bisogna quindi sempre tenere presente il contesto in cui si va a operare.
- Il tipo di pianta coltivata deve essere adatto al clima e al suolo del luogo; dovrebbero essere preferite le piante indigene. Le piante non indigene hanno, infatti, la tendenza a diffondersi facilmente e aumentano il rischio di introdurre nuove malattie.
- Alle monocolture dovrebbero essere preferite le piantagioni con diverse specie di alberi, poiché in questo caso presentano maggiore stabilità e resistenza a malattie e parassiti. Le monocolture e, soprattutto, le colture di un solo clone mostrano una bassa resistenza a parassiti e insetti. Funghi, batteri, insetti e virus – che possono diminuire la resa – possono essere favoriti dalla eccessiva vicinanza delle piante, dalla piccola varietà del sottobosco, dal taglio degli alberi (i funghi, ad esempio, riescono ad entrare meglio).
- La creazione di piantagioni dovrebbe adattarsi al territorio, cercando di svolgere più funzioni, quali la protezione del suolo dall'erosione. Da questo punto di vista, una SRF ha effetti decisamente migliori di un campo arato. Ci sono due momenti in cui il suolo è però più sensibile: nell'anno successivo all'impianto e nei due anni successivi alla ceduzione. Questo è un motivo per cui vanno favoriti cicli lunghi di taglio.
- Dovrebbero essere preferiti periodi lunghi per la ceduzione: per il salice ad esempio 5 anni; piantagioni di piccole dimensioni, 0.5 ha, non dovrebbero essere tagliate annualmente. Se si favoriscono cicli brevi, è probabile un maggiore utilizzo di nutrienti. Periodi brevi e grosse quantità di fertilizzanti riducono la produzione di biomassa. La proporzione tra energia entrante e uscente in una SRF è circa 1:7, considerando un pioppo con una resa pari a 15 t/ha/anno; può però arrivare fino a 1:36 se l'ambiente in cui l'albero cresce è simile ad un bosco.
- In terreni pendenti il taglio, invece che essere completo, dovrebbe avvenire secondo alcune file ogni anno. Proprio per la maggiore fragilità del suolo, conseguente al taglio degli alberi, in caso di terreno pendente è necessario programmare un "piano di taglio" graduale.
- Si dovrebbe ridurre al minimo l'input di nutrienti. Questo è possibile se il ciclo di ceduzione non è troppo breve. Anche l'utilizzo di specie diverse può contribuire all'aumento della biomassa senza necessariamente usare fertilizzanti: ad esempio con l'uso di piante vascolari, come la robinia.

3.2 Energia da biomasse in cifre

Pur non disponendo di una precisa stima della disponibilità di biomasse a scala globale, si può affermare che il loro utilizzo per la produzione di energia è largamente inferiore

alle reali potenzialità offerte dal sistema ambiente-territorio. Le biomasse rappresentano, attualmente, la principale fonte energetica rinnovabile (FER): a livello mondiale forniscono quasi l'11% dell'energia primaria consumata, seguite dall'idroelettrico (2,2%) e da altre fonti quali la geotermia, il solare e l'eolico (0,5%; IEA, 2005). In Figura 3.3 è illustrata la ripartizione tra le varie fonti energetiche sul totale dell'energia consumata a livello mondiale. Esiste però una forte disomogeneità nell'utilizzo di questa risorsa per la produzione di energia. Attualmente, i paesi in via di sviluppo coprono il 38% del loro fabbisogno energetico tramite l'utilizzo delle biomasse, con alcuni casi estremi come il Nepal (98%) e l'Etiopia (95%). Molto differente è la situazione nei paesi industrializzati, i quali soddisfano mediamente il 3,3% del loro fabbisogno energetico tramite questa fonte (IEA, 2005). In proposito si osservi la Tabella 3.5 che riporta i dati relativi al contributo delle fonti energetiche rinnovabili all'offerta energetica in varie aree del pianeta.

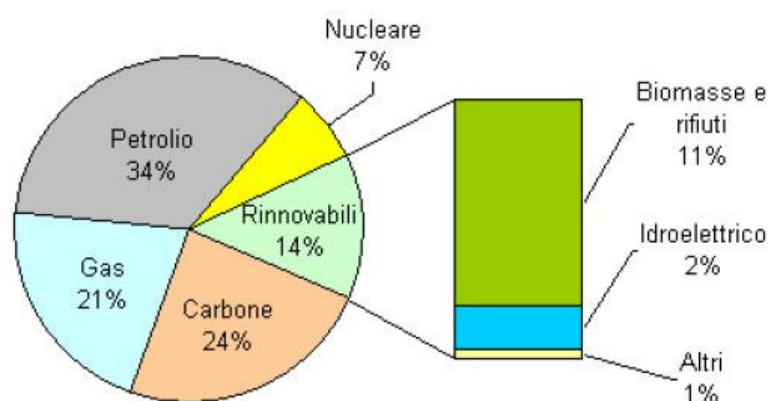


Figura 3.3: Energia primaria per fonte a livello mondiale (IEA, 2005).

Tabella 3.5: Incidenza delle biomasse sulla produzione energetica totale (IEA, 2005).

	Mondo	OCSE		UE-15		Italia	
Anno	2002	2002	2003	2002	2003	2002	2003
Offerta di energia totale (Mtep)	10.231	5.346	5.391	1.490	1.513	173	181
Energia da biomasse (Mtep)	1.118	178	181	57	60	3	3
Energia da FER (Mtep)	1.392	317	320	88	93	10	11
% biomasse/FER	80	56	57	64	64	26	27
% biomasse/totale	11	3	3	4	4	1	2

Nel 2004 l'energia primaria da biomasse nell'UE25 era pari a 55,4 Mtep (il 3,2% dell'energia primaria), con una crescita del 5,4% rispetto all'anno precedente. In Italia, invece, l'energia primaria da biomassa era pari a circa a 1,08 Mtep secondo le stime EurObserv'ER (2005), mentre secondo le stime dell'Enea (2006) l'energia da legna e assimilabili nel 2004 era pari a 3,3 Mtep. Rispetto all'energia primaria dell'anno (196,8 Mtep secondo Enea, 2006), dunque, la percentuale da biomasse solide varia tra 0,55 e 1,68% (visto la difficoltà nel determinare la produzione di energia da rinnovabili e, in particolare, dalle biomasse, si è scelto di riportare i diversi valori).

Per quanto riguarda l'elettricità da biomasse, nel 2004, sono stati prodotti 35 TWh nell'UE25 e 0,40 TWh in Italia (EurObserv'ER, 2005). Secondo l'ENEA (2006), invece, la produzione di energia elettrica da rinnovabili in Italia ammonta nel 2004 a oltre 55 TWh, pari al 16% del consumo interno lordo di energia elettrica. Rispetto al

2003, si assiste ad un aumento medio della produzione di elettricità da rinnovabili del 16% e del 25% per quanto riguarda le biomasse. Oltre il 75% della produzione da rinnovabili proviene dall'idroelettrico; le biomasse (inclusi i rifiuti) contribuiscono per circa il 10% (5,6 TWh), così come il geotermico, l'eolico per il 3% e il fotovoltaico solo per lo 0,05% (Enea, 2006).

Secondo le stime attuali il potenziale energetico delle biomasse prodotte in Europa è pari a 400 Mtep, di questi solo il 15% circa viene utilizzato per produrre energia. Secondo gli obiettivi del Libro Bianco (Commissione Europea, 1997), il contributo delle biomasse alla produzione energetica europea dovrebbe triplicare entro il 2012, attestandosi oltre i 130 Mtep, cifra che comprende tutte le forme di energia estraibili dalle biomasse; le biomasse secche dovrebbero contribuire per circa 100 Mtep sul totale dell'obiettivo. Si stima però che, seguendo i trend attuali nel 2010 si produrranno solo 78 Mtep da biomasse (EurObserv'ER, 2005). Il raggiungimento completo dell'obiettivo del Libro Bianco dovrebbe permettere un risparmio di combustibili fossili pari a 45 Mtep all'anno, provenienti per i due terzi dal recupero di residui forestali, di scarti agricoli e dell'industria del legno, e per un terzo dallo sfruttamento di colture dedicate. Si tenga presente che, in generale, i dati sulla disponibilità di biomasse sono potenzialmente affetti da errori dovuti all'oggettiva difficoltà di stima delle quantità in gioco, principalmente perché trattasi allo stato attuale di risorse non commercializzate.

3.3 Trend e potenzialità

Una domanda fondamentale che è necessario porsi è in quali quantità le biomasse possono contribuire al soddisfacimento della domanda di energia, a livello sia globale sia regionale. In Figura 3.4 sono mostrati i possibili futuri contributi delle biomasse, riassunti in un interessante lavoro di *review* di Berndes *et al.* (2003). Il contributo assoluto e relativo (rispetto ai consumi globali attuali di energia primaria) varia notevolmente, anche se si può riconoscere un trend positivo del contributo delle biomasse. La stima più pessimistica al 2050, pari a 47 EJ/anno è circa pari ad un decimo di quella più ottimistica, 450 EJ/anno). I paesi in via di sviluppo contribuiranno alla disponibilità di biomasse per l'energia in misura superiore ai paesi sviluppati e in quantità crescenti con gli anni, come mostrato in Figura 3.5; anche se la figura mostra come i valori assoluti siano molto divergenti da studio a studio.

Secondo Hoogwijk *et al.* (2003) l'energia primaria potenziale da biomasse al 2050 sarà compresa tra 33 e 1135 EJ/anno, con il contributo rilevante delle coltivazioni energetiche (0–988 EJ/anno). Fischer e Schrattenholzer (2001) stimano, sempre al 2050, una potenzialità compresa tra 370 e 450 EJ/anno (che dipende dall'incertezza legata alle rese delle colture energetiche e al prelievo delle biomasse forestali).

Un altro studio stima che nel 2100 saranno disponibili 100 EJ/anno dalle biomasse da colture energetiche coltivati sui terreni agricoli in surplus nei paesi sviluppati, mentre le biomasse residuali ammonteranno a soli 49 EJ/anno. Nei paesi in via di sviluppo, al contrario, è maggiore il contributo dei residui, pari a 223 EJ/anno, mentre il contributo delle coltivazioni apposite è stimato in 54 EJ/anno (Yamamoto *et al.*, 1999). In totale a livello globale sarebbero quindi disponibili 426 EJ/anno al 2100.

In Europa (EU15), Ericsson e Nilsson (2006) hanno stimato che le biomasse (provenienti dai residui forestali, sottoprodotti dell'industria, residui agricoli di mais e paglia, colture energetiche) possono contribuire al fabbisogno di energia primaria fino a 11,7 EJ/anno (Figura 3.6).

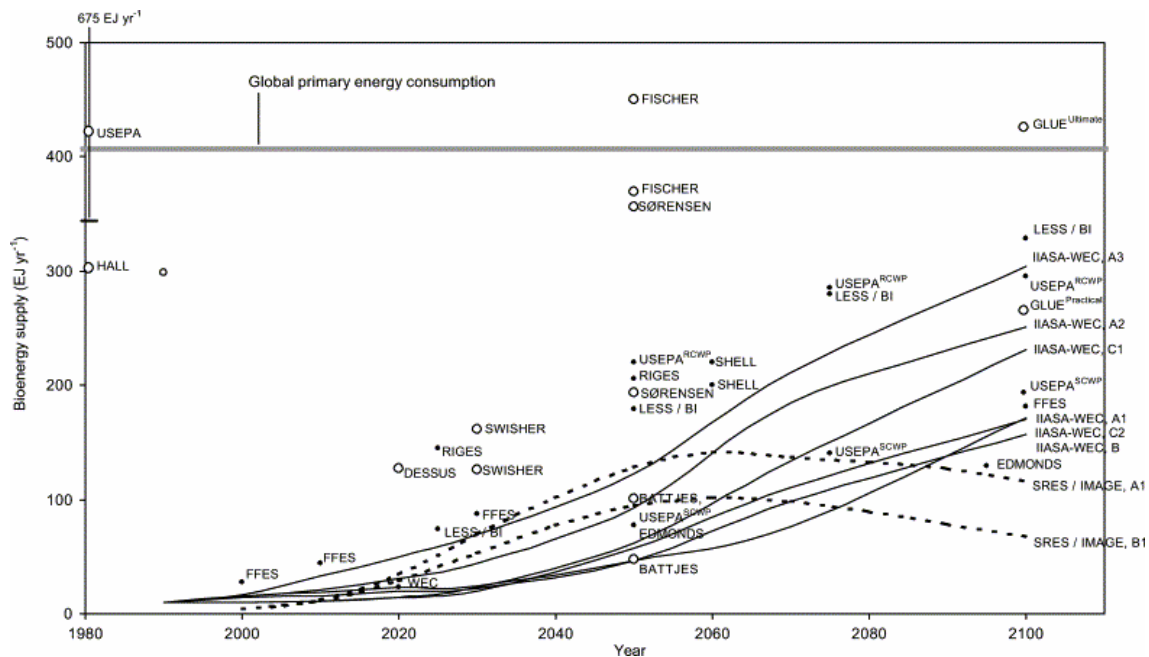


Figura 3.4: Offerta potenziale di biomasse (in EJ l'anno) per l'energia al 2100 come previsto da diversi studi (). È indicato l'attuale consumo globale di energia primaria, pari a 365 EJ/anno nel 1999-2000 (ristampato da Biomass & Bioenergy 25, Berndes *et al.*, The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, © 2003, con il permesso di Elsevier).

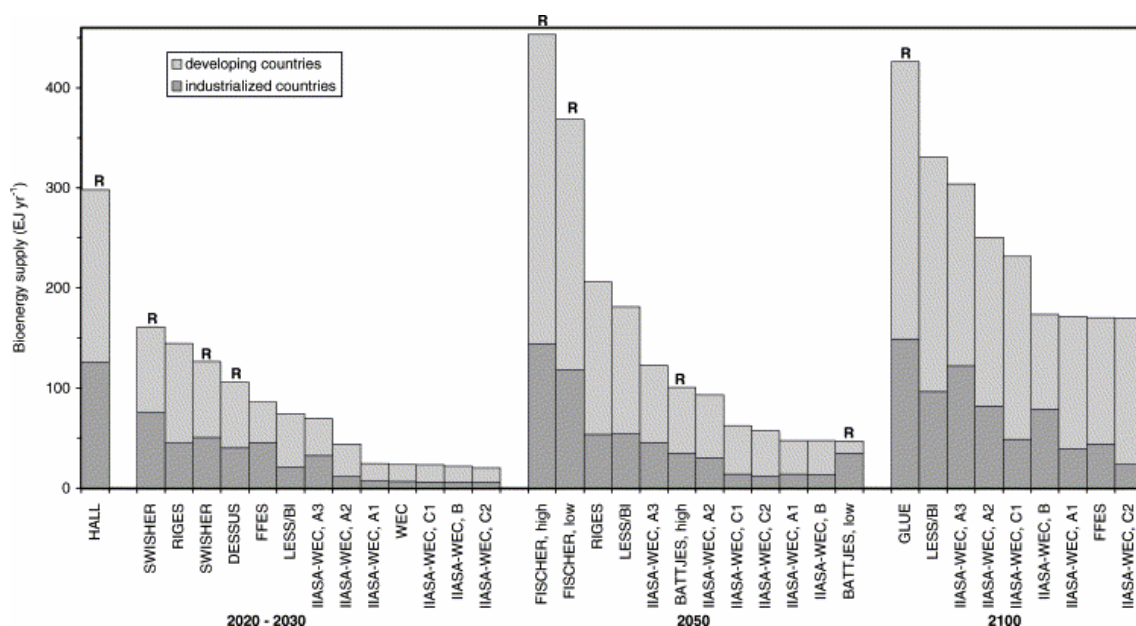


Figura 3.5: contributo dei paesi industrializzati e in via di sviluppo all'offerta globale di biomasse secondo diversi studi (ristampato da Biomass & Bioenergy 25, Berndes *et al.*, The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, © 2003, con il permesso di Elsevier).

Per quanto riguarda l'origine delle biomasse per l'energia, la maggior parte degli studi prevede un contributo prevalente delle colture energetiche (Figura 3.7). Il ruolo dominante delle colture energetiche negli scenari futuri implica la necessità di ipotesi sulla disponibilità di suolo e sulle rese attese di queste colture. Le rese variano molto e, tipicamente, aumentano con il passare degli anni secondo l'ipotesi che ricerca e sviluppo permetteranno di identificare le cultivar ottimali. Il suolo da dedicare alle coltivazioni energetiche è identificato tramite due principali approcci: si assume che

una frazione del suolo oggi dedicato a agricoltura tradizionale, a prateria o a foreste sia convertito, oppure si assume di destinare alle coltivazioni energetiche suolo agricolo oggi abbandonato o suoli in degrado. Dalla Figura 3.7 emerge anche l'importante ruolo delle biomasse forestali (indicate con i numeri 3 e 10).

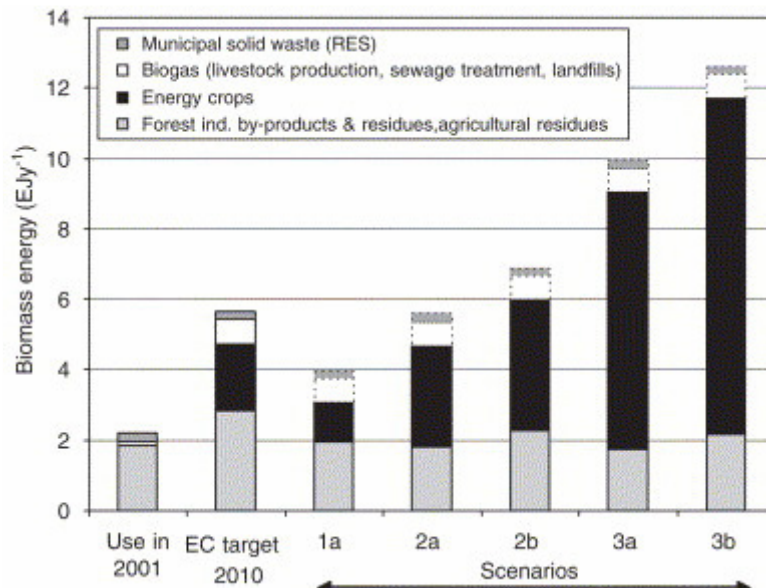


Figura 3.6: Potenzialità delle biomasse nei paesi dell'EU15 secondo diversi scenari (1, breve periodo 10-20 anni; 2, medio periodo 20-40 anni; 3, lungo periodo, oltre 40 anni; a e b invece distinguono rispettivamente un alto e un basso prelievo della biomassa forestale e dei residui agricoli); la prima barra mostra l'uso di biomasse nell'EU15 nel 2001; la seconda barra mostra l'obiettivo di energia da biomasse al 2010 della Commissione Europea (ristampato da Biomass & Bioenergy 30, Ericsson e Nilsson, Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach, © 2006, con il permesso di Elsevier).

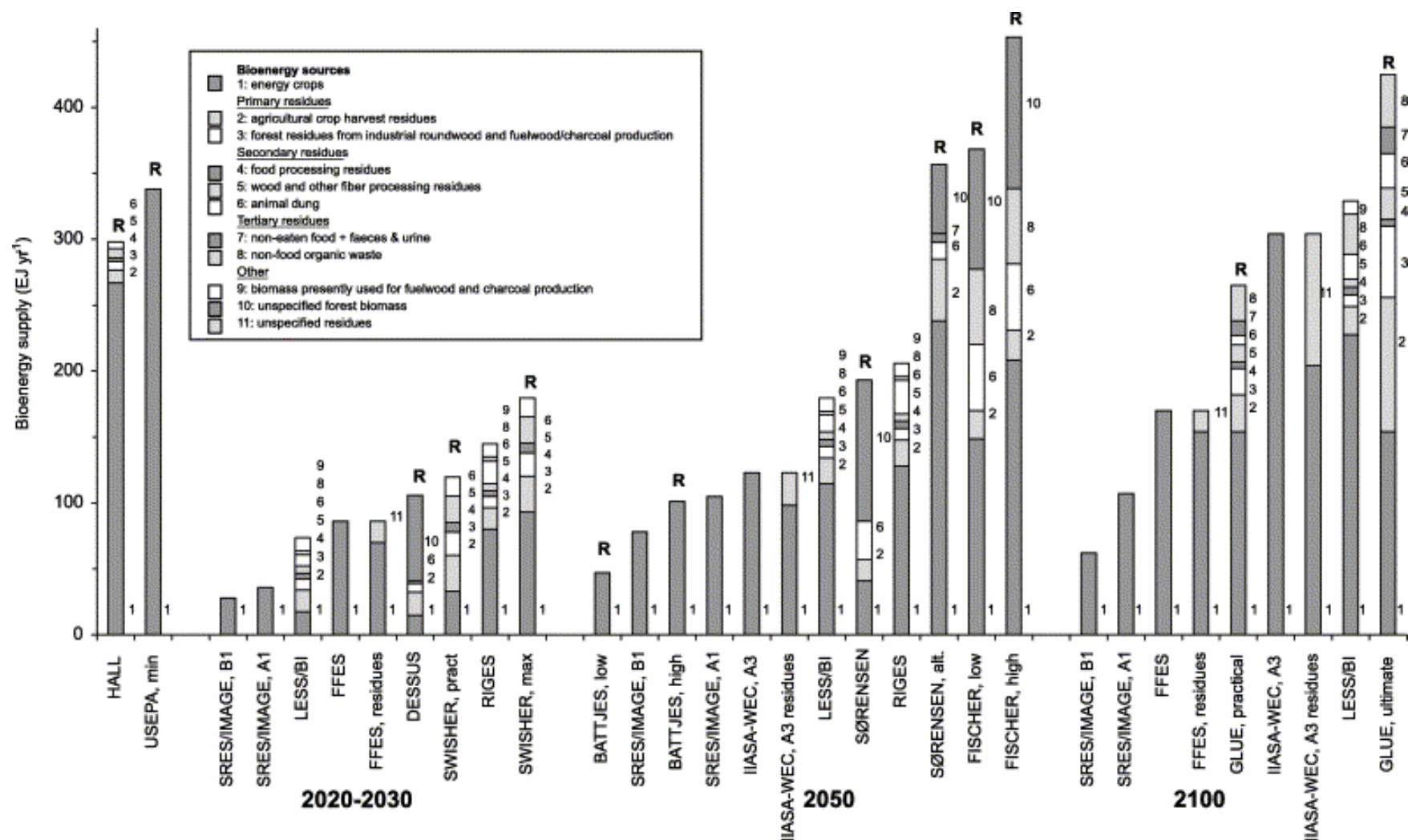


Figura 3.7: contributo di specifici settori all'offerta globale di biomassa secondo diversi studi (ristampato da Biomass & Bioenergy 25, Berndes *et al.*, The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, © 2003, con il permesso di Elsevier).

3.4 Tipologia di risorse e disponibilità sul territorio italiano

Le possibili fonti di biomassa sono strettamente correlate al contesto economico-produttivo di un paese, nonché alla realtà territoriale e alle caratteristiche geografiche dell'area considerata. Nel contesto italiano le fonti di biomassa disponibili sono principalmente le seguenti:

- i residui derivanti dalle coltivazioni agricole (paglie di cereali, lolla di riso, stocchi di mais ecc.);
- i residui derivanti dalle operazioni di manutenzione forestale (frascami, ramaglie, sfalci e residui di potature);
- gli scarti dell'industria del legno (ritagli di pannelli, segature e truciolame di varia pezzatura);
- i residui agroindustriali e delle lavorazioni alimentari (vinacce, sanse ecc.);
- la frazione organica dei rifiuti urbani;
- i reflui zootecnici;
- le colture energetiche dedicate (erbacee o arboree).

La maggior parte delle biomasse sono costituite dagli scarti delle diverse attività produttive agricole e industriali. Questi materiali, che vengono prodotti dalle aziende o prelevati al di fuori dei consueti circuiti commerciali dei combustibili, mal si prestano a precise rilevazioni quantitative. Per questo motivo, per valutarne la consistenza bisogna accontentarsi di stime indirette o parziali.

Un'importante fonte di biomassa deriva dal potenziale utilizzo di quelle migliaia di ettari tolti alle produzioni agricole in quanto considerati eccedentari dalla norme economiche comunitarie. Tali terreni, denominati *set-aside*, potrebbero infatti essere adibiti a colture dedicate alla produzione di biomassa per scopi energetici.

Le varietà ritenute maggiormente interessanti per la produzione di biocombustibili sono quelle oleaginose o alcoligene, mentre per la produzione di elettricità e calore si considerano tutte le colture da fibra, di natura ligno-cellulosica. Una possibile classificazione delle colture energetiche è riportata in Tabella 3.6.

Tabella 3.6: Classificazione delle colture energetiche e dei relativi prodotti

Classificazione	Varietà	Prodotti
colture alcoligene, amidacee e zuccherine	cereali, sorgo zuccherino, barbabietola, ecc.	combustibili o additivi per combustibili
colture oleaginose	girasole, colza, ecc.	Biodiesel
colture erbacee ad alta efficienza fotosintetica	sorgo da fibra, miscanto, arundo donax, canne, ecc.	biomassa per combustione

Non esistono stime recenti sulla potenzialità del settore della bioenergia in Italia. Un'indagine effettuata dall'A.I.G.R., Associazione Italiana Genio Rurale (ora A.I.I.A., Associazione Italiana Ingegneria Agraria) nel 1994 stimava una disponibilità annua di 17 milioni di tonnellate di sostanza secca, di cui circa 8 milioni di tonnellate da residui agricoli, 7,7 da legna (anche se non è chiaro cosa si intenda con questo termine) e 1,6 da scarti agro-industriali. La stima del 1994 dei residui agricoli disponibili della A.I.I.A. è stata sostanzialmente confermata dal rapporto di Itabia (2003). Un altro studio stimava in circa 11 milioni di tonnellate l'anno la disponibilità di biomasse da residui agricoli delle coltivazioni estensive, cui si possono sommare circa 3 milioni di tonnellate di residui legnosi provenienti sostanzialmente dalla potatura delle coltivazioni di alberi da frutto (Di Blasi *et al.*, 1997).

La valutazione delle potenzialità delle biomasse dal settore forestali è ancora più difficile da definire rispetto a quello dell'agricoltura; infatti, per l'agricoltura esistono almeno dati aggiornati e completi (ettari destinati ad ogni coltura negli anni), mentre le cartografie forestali sono estremamente differenziate da regione a regione e anche le informazioni sulle utilizzazioni forestali sono difficili da reperire. La crisi economica del settore legno degli ultimi decenni ha prodotto una lenta ma costante regressione delle utilizzazioni boschive e del loro valore economico commerciale. Ogni anno diminuiscono i prelievi di massa legnosa, ma anche le superfici sottoposte ad interventi; ciò è dovuto spesso alla carenza di piani di assestamento o di piani di taglio, nelle proprietà pubbliche e private. Nei boschi tradizionali non è auspicabile un'ulteriore diminuzione delle utilizzazioni boschive, ma piuttosto una loro ripresa, purché finalizzate, oltre che ai prelievi della massa legnosa, alla corretta gestione selvicolturale, nel rispetto quindi delle naturali tendenze evolutive dei popolamenti (ad esempio diradamenti, conversioni, tagli di rinnovazione). Escludendo i boschi dove non è possibile o consentito intervenire (boschi ricadenti in zone protette o su pendenze elevate e quindi con funzione prevalentemente idrogeologica), e considerato il grado di accessibilità dei boschi italiani, si può ipotizzare di triplicare la superficie da sottoporre al taglio nel caso dei cedui (soprattutto in previsione degli interventi programmati di riconversione da ceduo a fustaia), e di raddoppiarla nel caso delle fustaie. Questi maggiori interventi presuppongono naturalmente una maggiore rete di infrastrutture (viabilità forestale), la cui carenza è attualmente una delle cause di un mancato sviluppo delle utilizzazioni boschive stesse. Secondo questa ipotesi, la quantità di legname utilizzabile annualmente potrebbe essere quantificata in 25 milioni di m³. Di questo potenziale, una parte (circa 10 Mm³) è destinata, per le sue caratteristiche tecnologiche, a legname da lavoro; dalla lavorazione di tale legname è possibile però ottenere almeno il 30% di materiale residuo (sottoprodotti come ramaglie e cimali), destinabile ad uso energetico. In totale, quindi, il materiale di origine forestale che potenzialmente può essere destinato esclusivamente ad uso energetico è di circa 18 Mm³/anno. L'equivalente energetico, assumendo che 1 mc = 0,6 t, è di circa 4 Mtep/anno.

3.5 Processi di conversione

Le biomasse sono una fonte energetica il cui contenuto calorico può essere sfruttato attraverso molteplici processi basati su diverse tecnologie. Il modo più semplice (e il più antico) per convertire le biomasse in energia termica ed eventualmente elettrica è la combustione diretta. Esistono tuttavia altri processi di natura biochimica o termochimica atti a trasformare le biomasse in vettori energetici differenti, che possono essere liquidi, solidi o gassosi (Figura 3.8). Il vantaggio di questi combustibili derivati è che hanno una più elevata densità energetica che ne abbatta i costi di trasporto, inoltre possono adattarsi all'impiego in svariate applicazioni, come per esempio in motori endotermici. Il tipo di processo a cui sottoporre la biomassa dipende in primo luogo da alcune caratteristiche fisiche (umidità) e chimiche (rapporto C/N). In particolare i trattamenti si dividono in due tipologie di processi: biochimici e termochimici (McKendry, 2002a; Klass, 1998).

I processi termochimici si applicano principalmente a prodotti caratterizzati da umidità alla raccolta inferiore al 30% e con rapporto C/N superiore a 30. In questi processi l'energia viene ricavata dalla materia tramite l'azione del calore. Le biomasse che meglio si adattano a questo tipo di trattamento sono la legna e i suoi derivati (scarti di lavorazione dell'industria del legno) e gli scarti agro-industriali di natura ligno-

cellulosica, come la paglia dei cereali e i residui di potatura e scarti di lavorazione (lolla di riso, pula, gusci, noccioli, ecc.).

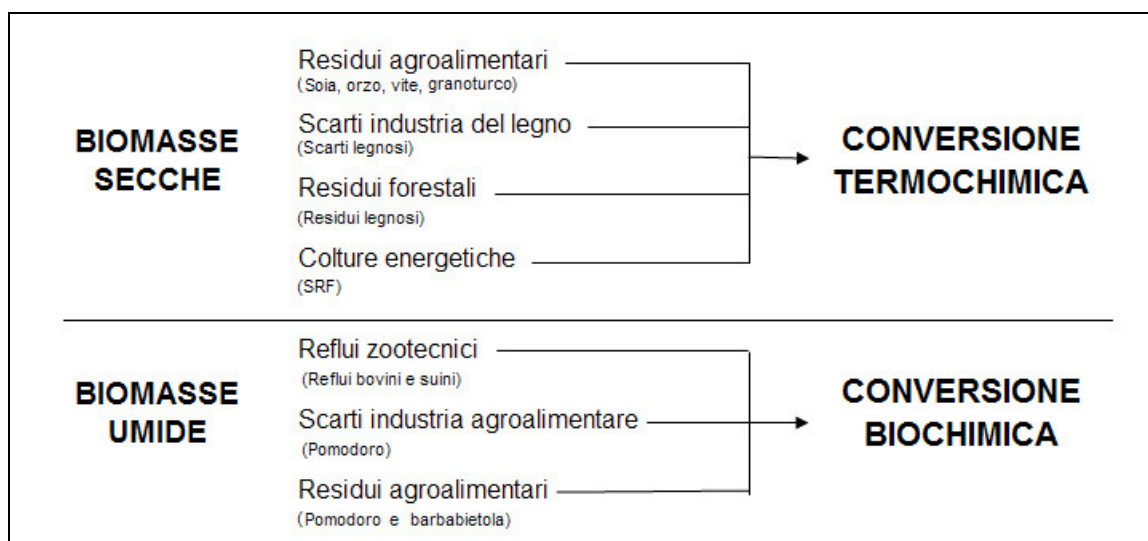


Figura 3.8: : processi di conversione energetica relativi alle diverse tipologie di biomasse.

I processi biochimici (McKendry, 2002a; Klass, 1998) sono più adatti a prodotti caratterizzati da umidità alla raccolta superiore al 30% e con rapporto C/N inferiore a 30. Questi processi, basati su reazioni chimiche prodotte da enzimi, funghi e micro-organismi che si formano nella biomassa in particolari condizioni, permettono di ricavare energia termica per l'utilizzo diretto e potenziale nel caso in cui si producano combustibili. Risultano particolarmente adatti a questi trattamenti alcuni scarti di produzioni agricole quali foglie e steli di barbabietola, ortive, patate. È possibile utilizzare anche i reflui derivanti da allevamenti zootecnici e alcuni scarti di lavorazioni agro-industriali come le borlande o le acque di vegetazione. A questi processi può essere sottoposta anche la frazione organica dei rifiuti urbani immagazzinati nelle discariche controllate.

Tutti i processi di conversione delle biomasse in energia si basano quindi sull'estrazione del contenuto calorico della sostanza usata o nell'immagazzinamento di questo in un vettore energetico differente, usato in un secondo momento. Per avere una quantificazione dell'energia immagazzinata è necessario considerare il potere calorifico della sostanza. Per quanto riguarda le biomasse ottenute da scarti e materiali di risulta vegetali, il potere calorifico è pari a circa $16.700 \text{ kJ kg ss}^{-1}$ (a titolo di confronto, il potere calorifico del gas naturale è pari a $34.500 \text{ kJ kg ss}^{-1}$).

Attualmente sono disponibili diversi processi di conversione, basati su tecnologie affidabili e sperimentate. L'opportunità del singolo processo è da valutare in funzione del tipo di prodotto di partenza e dell'utilizzo energetico finale, sia esso volto alla produzione diretta di energia termica e/o elettrica oppure alla produzione di un combustibile in forma diversa da utilizzare in appositi impianti di combustione. Le tecnologie a oggi sviluppate, suddivise per tipologia di reazione, sono elencate in Tabella 3.7 e sono brevemente descritte nell'Appendice I, con l'indicazione del principio di funzionamento e dei prodotti finali ottenibili.

Tabella 3.7: Principali processi di conversione della biomassa

Processi di tipo biochimico	Processi di tipo termochimico
Digestione anaerobica	Combustione diretta
Digestione aerobica	Carbonizzazione
Fermentazione alcolica	Gassificazione
Produzione di metanolo	Pirolisi
Estrazione di oli e produzione di biodiesel	Steam explosion

3.6 Applicazioni e relative filiere

Le applicazioni per lo sfruttamento del potenziale energetico contenuto nelle biomasse sono svariate e in continua evoluzione. Attualmente i settori di utenza maggiormente sviluppati in Italia sono il riscaldamento domestico o industriale, tramite impianti singoli o a rete (teleriscaldamento), la produzione di vapore di processo, la produzione di energia elettrica in impianti centralizzati o distribuiti, l'uso di combustibili liquidi (biodiesel e bioetanolo) sia per autotrazione che per il riscaldamento.

Riscaldamento domestico

Quello del riscaldamento domestico da biomasse è un settore già radicato nel mercato dell'energia e in continua evoluzione. Gli schemi di impianto possibili sono il riscaldamento autonomo (tramite caldaie a legna, stufe o caminetti) oppure quello centralizzato con distribuzione dell'energia termica tramite particolari fluidi termoconvettori, anche su distanze dell'ordine delle decine di chilometri (in questo caso si parla di teleriscaldamento). In particolare, il teleriscaldamento rappresenta un settore di mercato in cui le biomasse possono rappresentare un'interessante soluzione tecnologica ed economica.

Secondo i dati dell'Enea (2004) la produzione italiana di energia, da legna e biomasse assimilabili, utilizzata per uso domestico o in piccole imprese è stimato dai 3 ai 6 Mtep. In Tabella 3.8 è possibile osservare l'andamento nel tempo dell'energia termica da biomassa in Italia, suddivisa per tipologia di utilizzo.

Tabella 3.8: Energia termica da biomassa in Italia, valori in TJ (Enea, 2004)

Anni	2001	2002	2003
Legna da ardere (residenziale)	51.657	44.656	46.055
Teleriscaldamento a biomasse	785	1.062	1.197
Legna utilizzata nelle industrie	39.600	39.600	39.600
Biocombustibili per uso riscaldamento	1.088	1.175	2.228
Cogenerazione	9.632	9.399	12.752

Teleriscaldamento

Attualmente la soluzione prevalente per il teleriscaldamento dei centri urbani prevede impianti a cogenerazione alimentati con fonti fossili. Gli impianti di estensione urbana attualmente in esercizio sono 27; si tratta di sistemi a cogenerazione con una potenza installata complessiva di circa 600 MWe e 1.400 MWt, dei quali 55 MWt sono ottenuti tramite biomasse (impianti localizzati presso comuni alpini) (Itabia, 2005). Sono in fase di progetto svariati altri impianti simili. Tale incremento di domanda è stimato intorno all'8-9% annuo, di cui una parte sarà coperta dalle biomasse.

Gli impianti di teleriscaldamento attivi in Italia si trovano soprattutto nelle regioni settentrionali. In Alto Adige, per esempio, ci sono 33 impianti di teleriscaldamento

(Figura 3.9); circa il 20% del fabbisogno energetico della provincia di Bolzano è soddisfatto dalle biomasse. Nella stagione invernale 2004-2005, le centrali di teleriscaldamento a biomassa dell'Alto Adige hanno combusto un totale di 515.500 m³ (metro stereo alla rinfusa) di biomassa equivalente a circa 30 milioni di litri di gasolio e a una riduzione delle emissioni di CO₂ pari a 87.000 tonnellate (Provincia Autonoma di Bolzano, 2005). In Lombardia ci sono alcune centrali di teleriscaldamento, in particolare in Valtellina ci sono le centrali di Sondalo e di Tirano (<http://www.teleriscaldamento.valtline.it/>); quest'ultima è un impianto di cogenerazione e, quindi, produce energia elettrica e termica. Complessivamente, gli impianti di teleriscaldamento sono distribuiti in Italia come riportato in Tabella 3.9.



Figura 3.9: Localizzazione dei principali impianti di teleriscaldamento in Alto Adige

Energia termica per usi industriali

L'energia termica liberata dalla combustione delle biomasse può essere usata per alimentare processi di produzione industriali, invece che per il riscaldamento di ambienti. Questa applicazione è abbastanza diffusa soprattutto presso le aziende agro-alimentari che hanno già a disposizione al loro interno delle biomasse residuali da smaltire. Le stime del 2005 indicano l'esistenza di 1.300 impianti di questo tipo con una capacità termica installata di circa 2.400 MWt (Itabia, 2005).

Tabella 3.9: Impianti di teleriscaldamento da biomassa in Italia (ITABIA, 2005; Provincia Autonoma di Bolzano, 2006)

Provincia	Impianti (n°)	Potenza termica (MWt)
Aosta	2	10
Bolzano	33	107
Brescia	1	13
Cuneo	2	10
Sondrio	2	22
Torino	2	14
Trento	2	17
Totale	41	193

Energia elettrica

Le biomasse si stanno progressivamente introducendo nel settore dell'energia elettrica, nonostante gli alti costi e le difficoltà legate all'approvvigionamento della materia

prima. Nel 1998 erano presenti in Italia 23 impianti per la produzione di energia elettrica da biomasse, con una potenza elettrica installata di circa 150 MWe, a cui si aggiunge una potenza termica di circa 150 MWt per gli impianti di cogenerazione. Nel 2003 (Tabella 3.10) gli impianti sono passati a 31 per una potenza lorda totale pari a 312 MWe, mentre la potenza media di un impianto è di circa 10 MWe; il consumo annuo di biomasse è di circa 3.500.000 tonnellate, supponendo un funzionamento medio annuo di circa 7.500 ore di ciascun impianto e una produzione elettrica di circa 1,7 TWh (Itabia, 2005). L'installazione di nuovi impianti previsti per la produzione di energia elettrica da biomasse (e da rifiuti solidi urbani), per una potenza complessiva di oltre 1.600 MWe è in parte realizzata e in parte in fase di avviamento.

Tabella 3.10: Impianti di produzione di energia elettrica da biomasse in Italia (Itabia, 2005).

Regioni	Impianti (n°)	Potenza lorda (MWe)
Piemonte	4	31,2
Lombardia	6	35,4
Veneto	2	24
Friuli Venezia Giulia	1	0,5
Emilia-Romagna	4	48,7
Toscana	1	18
Umbria	2	9,8
Molise	2	28,6
Calabria	5	100
Puglia	4	15,5
Totale	31	311,7

Biocombustibili liquidi

Particolare interesse è stato recentemente rivolto alla filiera dei biocombustibili liquidi, a causa della nota emergenza ambientale provocata dall'inquinamento da traffico. Si valuta che da questa fonte provenga il 93% delle emissioni di CO, il 60% di NO_x e HC e il 12% di CO₂. Sostituendo il combustibile di origine fossile con un biocombustibile compatibile, si può ottenere una serie di vantaggi, tra cui:

- riduzione delle emissioni di CO₂; anche se in quantità contestate nella letteratura (ad es., Righelato e Spracklen, 2007);
- nessuna emissione di piombo e zolfo;
- migliore combustione grazie all'alto tenore di O₂, con conseguente riduzione delle emissioni di CO e suoi composti;
- nessuna emissione evaporativa diretta del combustibile;
- riduzione dei problemi di trasporto e stoccaggio rispetto alle benzine poiché i biocombustibili sono completamente biodegradabili e difficilmente autoinfiammabili;
- buone caratteristiche chimico-fisiche in termini di potere calorifico, potere antidetonante e punto di volatilizzazione.

In Italia, dopo un iniziale momento di sviluppo, la produzione di biocombustibili liquidi ha registrato un forte calo di interesse, tale da causare un arresto della produzione nel 1997. Le cause sono diverse, ma principalmente si può ricondurre il fenomeno alla confusa e contraddittoria politica agricola nazionale e comunitaria di quegli anni, che non ha potuto fornire le debite certezze sulla fornitura della materia prima (olio di semi di colza e di girasole o colture alcoligene). Unitamente a questo, i produttori agricoli e

le industrie di trasformazione, a causa dell'assoluta mancanza di adeguati sostegni finanziari, non sono stati messi in grado di superare gli elevati costi di investimento ed esercizio. Successivamente, nonostante questo inizio poco incoraggiante, l'industria italiana è ritornata in questo settore del mercato, grazie anche a un progressivo aumento delle quote di produzione di biodiesel esenti da accise, in particolare a partire dalla Legge Finanziaria del 2001.

Biodiesel

Il biodiesel è un combustibile dalle caratteristiche simili al gasolio ottenuto dall'esterificazione di oli vegetali. Può essere impiegato in tradizionali motori diesel per autotrazione, senza l'adozione di particolari modifiche tecniche, oppure in caldaie a gasolio per riscaldamento.

In Italia la produzione a livello industriale del biodiesel si è avviata nel 1992 (Itabia, 2005). Nel 2000 esistevano 9 società autorizzate alla commercializzazione del biodiesel esente da accise; i relativi impianti di produzione erano 7 con capacità produttiva lorda stimata intorno alle 500.000 t anno⁻¹. Fino al 2000, però, la produzione effettiva è stata di sole 100.000 t anno⁻¹, inferiore al limite imposto dalla legislazione vigente di 125.000 t anno⁻¹ (contingente di produzione esente da accise).

Bioetanolo ed ETBE

Il bioetanolo deriva da materiali fermentabili (zuccherini o amidacei) tramite processi di distillazione e fermentazione. La materia prima deriva dalle distillazioni obbligatorie di vino e altri prodotti ortofrutticoli eccedenti. È possibile un suo impiego tal quale o sotto forma di ETBE, che viene miscelato alle benzine in virtù del suo potere antidetonante e ossigenante. Questo biocombustibile, impiegato in Italia fino al 1995 soprattutto per usi sperimentali e dimostrativi, non ha trovato diffusione nel mercato energetico nazionale.

Biogas

In Italia la produzione di biogas (il cui contenuto di metano è variabile tra il 40 e il 70%) è una pratica relativamente diffusa. È possibile ricavare questo combustibile da diverse fonti organiche, tra le quali:

- RSU stoccati in discariche controllate;
- fanghi di depurazione;
- deiezioni animali;
- residui industriali.

Il combustibile, ottenuto tramite processi di digestione anaerobica, è utilizzabile nella produzione di energia elettrica, termica e cogenerazione. La quantità di energia primaria prodotta in Italia mediante biogas, di varia origine, ha subito un notevole incremento, la maggior parte prodotto da RSU in discariche debitamente attrezzate per la captazione del gas, il suo stoccaggio e l'impiego per la produzione di energia. Esistono tuttavia svariati sistemi di produzione e utilizzo del biogas in piccoli impianti a scala consortile o di singola azienda, soprattutto nel settore agricolo e delle industrie agro-alimentari. La produzione lorda di energia elettrica negli impianti di estrazione e utilizzo di biogas nel 2004 ammontava a circa 1.170 GWh da reflui zootecnici, 2.190 GWh da residui delle industrie agroalimentari e a 2.277 GWh da rifiuti solidi urbani (GRTN, 2004).

Combustibili legnosi

I combustibili legnosi, impiegati in processi di combustione di vario tipo, possono essere legname di diversa dimensione oppure prodotti derivati da scarti di lavorazione del legno (truciolame, segatura). I formati più diffusi sul mercato sono i seguenti:

- ciocchi (tronchi squartati spezzettati): lunghezza 25-30 cm;
- fascine (arbusti e cespugli): lunghezza 70-100 cm;
- legna sminuzzata (rami): lunghezza 3-12 cm;
- trucioli e segatura (scarti di lavorazione);
- cippato (chips): minuzzoli di legna di dai 2 ai 10 cm;
- trucioli pressati a forma di cilindretto (bricchette e pellets).

Tra questi formati, quelli che sono attualmente più utilizzati, oltre alla classica legna da ardere, sono i chips e i pellets, in virtù dei loro vantaggi in termini di facilità di trasporto (anche in autobotti), di stoccaggio (silos con meccanismi di carico e scarico a coclea) e di alimentazione automatica delle caldaie.

Legna da ardere

La legna da ardere si suddivide in base alle dimensioni dei pezzi, i più grandi, detti squartoni o tondelli sono lunghi circa 1 metro, mentre i pezzi più piccoli, detti ciocchi, sono lunghi dai 25 ai 50 cm. Nella Tabella 3.11 si riportano le caratteristiche fisiche medie tipiche della legna da ardere.

Tabella 3.11: Caratteristiche dei combustibili legnosi.

		Legna da ardere	Cippato	Bricchette
massa volumica	[kg m ⁻¹]	600 – 850	220 – 350 [kg msr ⁻¹]	> 900
Umidità	[%]	20	30	< 15
P.C.I.	[kWh kg ⁻¹]	4 - 4,5	3 - 3,4	4,6 - 5,2
Densità energetica	[kWh msr ⁻¹]	1275 – 1806	935 - 1487	0,5 – 1
ceneri (in peso)	[%]	0,2 - 0,5	0,2 - 0,5	15 – 20
Prezzo	[€ quintale ⁻¹]	10 – 12	3 - 6	

Cippato

Il cippato (dall'inglese *to chip*: ridurre in scaglie) è ottenuto tramite un processo meccanico di frantumazione del legname o degli scarti di lavorazione dell'industria del legno. Il legname utilizzato è tipicamente di bassa qualità, come la legna di esbosco, le fascine, le potature dei frutteti, il legno riciclato e i sottoprodotti di segheria. È possibile automatizzarne la produzione, il trasporto e l'approvvigionamento alla combustione. I macchinari utilizzati permettono diversi formati di taglio, a seconda dell'utilizzo finale del prodotto. Se si prevede di impiegare il materiale in impianti di combustione automatizzati sono infatti preferibili *chips* di dimensioni comprese tra i 3 e i 5 cm. In Tabella 3.11 sono riportate le principali caratteristiche fisiche del cippato in commercio.

Trucioli pressati (bricchette e pellets)

I trucioli pressati (bricchette e pellets) sono prodotti tramite pressione meccanica della segatura e di altro legname precedentemente sminuzzato. Questo procedimento permette di aumentare la densità del combustibile senza l'impiego di sostanze leganti che ne altererebbero la composizione. Esistono in commercio differenti formati di truciolo pressato: le bricchette e i pellets.

Le bricchette sono cilindri di lunghezza di 30 cm, prodotti da residui legnosi non trattati (di pezzatura inferiore a 15 cm) con umidità residua inferiore al 14%. Questo

combustibile è tipicamente utilizzato in impianti ad alimentazione manuale. Si riportano in Tabella 3.11 alcune specifiche indicative per le bricchette.

I pellets sono cilindretti di lunghezza inferiore ai 3 cm, utilizzabili in impianti ad alimentazione automatica, tipicamente mediante coclee. Il procedimento di produzione dei pellets consiste principalmente nella pressatura della segatura di legno o di scaglie polverizzate di legno (con contenuto di umidità pari a 11-14%) fino a rendere coesivo il materiale di partenza, questo grazie all'effetto legante della lignina attivato dalle alte pressioni in gioco e dal calore derivante dall'attrito. Sono in commercio svariate presse meccaniche adibite a questa funzione, la produttività di queste macchine varia da 800 a 4.000 kg ora⁻¹. In Tabella 3.12 sono riportate le caratteristiche salienti tipiche dei pellets presenti sul mercato.

Tabella 3.12: Caratteristiche dei pellets

		valori
lunghezza	[mm]	19
diametro	[mm]	39
massa volumica	[kg/m]	1150 – 1400
massa sterica	[kg/mst]	> 650
umidità	[%]	39
P.C.I.	[kWh/kg]	4,7 - 5
ceneri (in peso)	[%]	0,3 - 1

3.7 Benefici e criticità della bioenergia

3.7.1 Benefici

Un'importante caratteristica delle biomasse è lo stretto legame con il territorio; sono largamente disponibili sul territorio e, pertanto, possono essere considerate una risorsa locale. Le biomasse si trovano pressappoco ovunque, anche se in qualità e quantità diverse; sono accessibili a tutti e possono essere utilizzate con una vasta gamma di tecnologie, dalle più antiche alle più moderne ed efficienti. In effetti, le biomasse, anche se allora non erano chiamate in questo modo, sono state la prima fonte di energia utilizzata dall'uomo e sono tuttora quella più utilizzata. Nei paesi in via di sviluppo le biomasse alimentano il fuoco in camini e stufe, mentre nei paesi sviluppati (prima di tutto Finlandia, Svezia e Austria), parlando sempre di usi domestici, alimentano caldaie che possono avere rendimenti elevati (superiori all'80%) e che possiedono meccanismi di controllo sulle emissioni inquinanti. Tutte le civiltà hanno, in misura maggiore o minore, domestichezza nell'utilizzo delle biomasse a scopo energetico. Questo costituisce un secondo vantaggio per questa fonte rinnovabile: quando le tecnologie più efficienti saranno ampiamente usate nei paesi industrializzati, sarà più semplice esportare le tecnologie nei paesi in via di sviluppo per favorire la produzione locale e sostenibile di energia, in luoghi in cui questa è estremamente rara o costosa.

Il contesto energetico italiano è caratterizzato dalla forte dipendenza dall'estero per l'approvvigionamento energetico. Il 15% dell'elettricità consumata nel nostro paese è infatti importata, così come l'80% delle materie prime energetiche. In questa situazione l'assetto economico del paese è in condizione di permanente instabilità dovuta alle continue oscillazioni del prezzo dei combustibili fossili. Per quanto riguarda il contesto economico, il settore agricolo sta subendo da tempo una notevole contrazione, si è infatti passati dai 18 milioni di ettari coltivati nel 1966 ai 13,2 milioni del 2000 (Istat, 2001). Questo fenomeno, oltre a indebolire ulteriormente un settore già provato e comunque fragile, ha comportato l'avvio di un processo di abbandono delle aree rurali. Le conseguenze di questo spopolamento sono svariate e comportano scompensi di

natura economica e sociale, nonché problematiche relative alla gestione del territorio e del suo assetto idrogeologico. Una possibile opzione per invertire questa tendenza è quella di una riconversione delle produzioni agricole eccedentarie in colture energetiche.

Il nuovo comparto delle bioenergie potrebbe, quindi, apportare benefici non indifferenti su diversi aspetti della vita del paese e, in particolare, sull'aspetto ambientale: la bioenergia potrebbe contribuire in modo decisivo alla riduzione delle emissioni di gas serra nell'atmosfera in quanto il bilancio emissivo di CO_2 è circa nullo (Figura 3.10). L'anidride carbonica immessa in atmosfera in seguito al processo di conversione energetica è esattamente pari a quella fissata nella materia vegetale durante il processo di fotosintesi e di accrescimento della biomassa. Nella produzione di energia da biomasse, la quantità di CO_2 immessa in atmosfera è solo quella derivante dai processi di raccolta e trasporto della materia prima o di trasformazione della stessa in altra forma di biocombustibile.

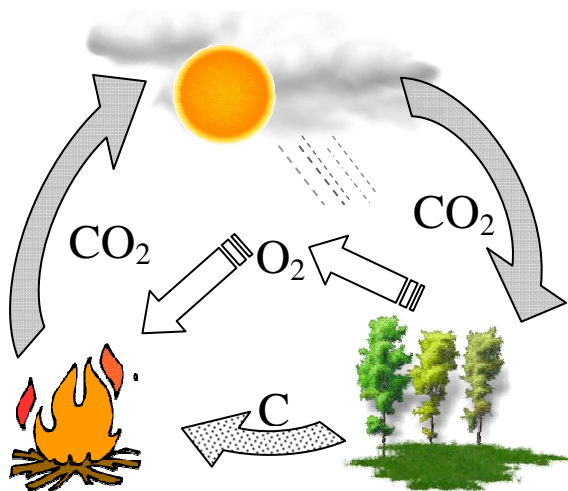


Figura 3.10: Ciclo del biossido di carbonio legato all'utilizzo di biomasse come combustibile.

Congiuntamente all'abbattimento delle emissioni di CO_2 devono essere considerate anche le emissioni evitate di tutti quegli inquinanti derivanti dall'uso di combustibili fossili, come l' SO_2 , il CO e il benzene. L'utilizzo come combustibile degli scarti ed i residui delle produzioni agricole e agro-industriali, nonché della frazione organica dei rifiuti, contribuirebbe ad alleviare il problema ambientale dello smaltimento di queste sostanze, andando anche a recuperare una parte del loro contenuto energetico.

La creazione e lo sviluppo di aree agricole destinate a colture energetiche dedicate, laddove si trovavano terreni abbandonati e incolti, contribuisce inoltre al controllo dell'erosione e alla riduzione del dissesto idrogeologico delle zone collinari e montane.

Considerando l'aspetto economico, l'utilizzo della biomassa come fonte rinnovabile può ridurre la dipendenza energetica dai produttori extraeuropei. La riconversione del settore agricolo, oltre a risollevare le sorti di un comparto depresso, potrebbe dare un nuovo stimolo alle economie rurali collegate.

Il recupero dei sottoprodotti dei residui organici per la produzione di energia può essere un'ulteriore fonte di reddito o quantomeno di risparmio in termini di costi di depurazione e smaltimento evitati. Tutto il sistema di produzione della bioenergia, partendo dalle filiere di produzione agli impianti di trattamento e conversione, andrebbe quindi a formare un settore economico in espansione, contribuendo anche alla creazione di nuovi posti di lavoro e opportunità di sviluppo.

Per quanto riguarda l'aspetto sociale, lo sviluppo del settore delle bioenergie e l'inversione dell'attuale tendenza all'abbandono delle campagne apporterebbero un beneficio in tutte quelle zone marginali afflitte da un alto tasso di disoccupazione. L'apertura del mercato dell'energia agli operatori agricoli permetterebbe di diversificare e integrare le fonti di reddito delle loro attività, conferendo una maggiore stabilità economica alle aziende agricole che contribuiscono alla fornitura energetica.

Si stima che, in Europa, l'utilizzo energetico delle biomasse possa portare all'occupazione diretta di 250-300.000 addetti, principalmente nelle aree rurali, supponendo che il 70-90% delle biomasse sia prodotto nell'UE. Sotto il profilo dell'occupazione diretta, nell'UE l'intensità di manodopera per i biocarburanti è da 50 a 100 volte superiore a quella per i combustibili fossili, che costituiscono la loro alternativa. L'intensità di manodopera per la produzione di elettricità dalla biomassa è da 10 a 20 volte superiore e quella del riscaldamento da biomassa è doppia (Commissione delle Comunità Europee, 2005). I pareri circa gli effetti indiretti sono contrastanti: alcuni sostengono che i posti nel settore bioenergetico sostituiranno altri posti e che l'effetto netto sull'occupazione sarà nullo.

Secondo le stime della Commissione Europea, al termine dell'annata 2005-06, l'Unione Europea ha registrato scorte di cereali dell'ordine di 70 milioni di tonnellate, rispetto a scorte di quasi 30 milioni di tonnellate relative all'annata 1997-98. Sempre secondo la Commissione, solo un forte tasso di messa a riposo, addirittura oltre il 20%, potrebbe consentire di ridurre il livello delle eccedenze previste.

È chiaro che un mercato in cui la quantità di eccedenze agricole si raddoppia in meno di un decennio, è un mercato protetto: infatti, una buona parte del bilancio dell'UE è destinato alla politica agricola comune (il bilancio di previsione del 2002, con uno stanziamento di circa 98.600 milioni di €, stanziava il 46% per l'agricoltura) (Graglia, 2002).

Per il controllo della produzione, l'UE ha adottato il sistema dei pagamenti compensativi, cioè un premio pagato agli agricoltori per la messa a riposo di terreni seminativi, associato ad una progressiva riduzione dei prezzi dei prodotti agricoli (in media il 30% per i prodotti cerealicoli). La situazione sarà aggravata dall'allargamento dell'UE a paesi prevalentemente arretrati sul piano agricolo: ci sarà probabilmente un forte sbilanciamento di contributi e finanziamenti a favore dei nuovi entrati.

Nel futuro si dovrà gestire la messa a riposo di numerosi ettari di superficie produttiva e il calo di redditività di alcune colture. Alcune vie per risolvere questo problema possono essere l'incremento della competitività delle aziende agricole, la diversificazione delle produzioni e la specializzazione in settori strategici (come quello dell'energia). Le superfici messe a riposo possono essere utilizzate per colture non destinate all'alimentazione umana o animale e, in particolare, a utilizzi energetici: colza o girasoli per il biodiesel, ma anche piantagioni arboree.

In quest'ottica si muovono le istituzioni, destinando contributi all'innovazione nelle aziende agricole e, anche, alla produzione di biomassa a scopi energetici. Il Piano di Sviluppo Rurale 2000-2006 della Regione Lombardia ha destinato alle misure agroambientali una quota di finanziamenti particolarmente rilevante, pari a circa il 44% degli stanziamenti e al 52,5% dei contributi UE. Nel nuovo Piano di Sviluppo Rurale si intende dare il via ad un piano specifico per lo sviluppo delle biomasse, facendo proprie le linee guida del Piano d'Azione della Commissione della Comunità Europea (2005).

Legambiente ha condotto un'analisi sulle cause degli incendi: una piccola percentuale (0,5-1,1%) dipende da cause accidentali o naturali; il 34,8% dipende da cause colpose, imprudenza e violazione delle norme; il 59,8% degli incendi sono invece dolosi, cioè appiccati deliberatamente per provocare danni. Questi incendi sono motivati

essenzialmente dal tentativo di ottenere nuovi terreni per il pascolo, per l'agricoltura, per la speculazione edilizia, per creare posti di lavoro connessi alle attività di spegnimento e per questioni legate al bracconaggio. Il direttore generale di Legambiente, Ferrante, commentando questi dati, ha affermato: "La maggior parte di questi incendi avviene nelle aree dove il bosco non ha altra funzione economica se non quella puramente assistenziale e diminuisce gradatamente nelle zone dove il bosco è inserito in ambiti di pregio: parchi e aree protette che valorizzano il contesto e favoriscono gli introiti delle comunità locali, a testimonianza che per la corretta gestione del territorio serve il coinvolgimento della popolazione (Legambiente, 2002)". È importante creare i presupposti per una maggiore cura del bosco e per una valorizzazione del suo utilizzo: cura e valorizzazione che potrebbero essere legati non al solo aspetto ricreativo, ma potrebbero avere anche un risvolto economico e propriamente sociale. Oltre agli utili legati allo sfruttamento della filiera energetica e alla prevenzione degli incendi, sarebbero evitati i danni ambientali arrecati all'ecosistema.

3.7.2 Criticità

Il settore delle bioenergie riscuote un interesse sempre crescente e i vantaggi a esso collegati sono ormai riconosciuti. Tuttavia, nello scenario economico nazionale non si riscontra uno sviluppo di questo settore tale da raggiungere una dimensione di mercato. Questo deriva dalla presenza congiunta di criticità di diversa natura che si oppongono o rallentano l'ulteriore sviluppo del settore. Per un'analisi sintetica possiamo ricondurre queste criticità a tre diversi ambiti: tecnologico, economico e politico-istituzionale. La maggior parte delle tecnologie disponibili per le bioenergie hanno raggiunto un buon livello di sviluppo, nonostante ciò alcune di queste non sono ancora inserite in un mercato vero e proprio: lo sviluppo tecnologico non è stato tale da consentire l'innescare di meccanismi di economie di scala. Inoltre, non si è ancora diffuso un grado di conoscenza delle tecnologie disponibili sufficientemente ampio.

Un altro limite alla diffusione delle bioenergie deriva da fattori di natura economica. In passato, il costo contenuto dei combustibili fossili rendeva poco competitiva ogni fonte alternativa. Tuttavia, con l'attuale trend di crescita inarrestabile dei prezzi, il divario che separa le energie fossili dalle bioenergie è destinato a colmarsi. È comunque importante sottolineare che la non competitività delle bioenergie deriva in parte dal sistema dei prezzi che non va a considerare le esternalità (costi ambientali e sociali) connesse all'utilizzo delle risorse fossili. Un altro freno alla diffusione deriva dai costi di investimento iniziali, piuttosto elevati per le tecnologie più innovative e meno diffuse. In alcuni casi, i costi elevati di produzione delle bioenergie derivano dai costi di manodopera collegati al processo di produzione, raccolta e trasporto della biomassa. Il costo di investimento elevato è quindi connesso alla creazione di posti di lavoro per il processo di produzione.

Infine, esistono criticità legate ad aspetti politici, per cui è necessario considerare la situazione del mercato dell'energia in Italia. Questo è stato a lungo dominato da due grandi enti (ENI ed ENEL), il che ha ostacolato l'iniziativa privata nonché l'interazione tra il settore energetico e quello agricolo-forestale. Di conseguenza, il settore delle bioenergie è sempre stato inficiato da una carente diffusione di informazione a livello di classe politica e di opinione pubblica. Tuttavia, negli ultimi anni, si è vista una crescente presa di coscienza dell'importanza del settore delle bioenergie, che va gradualmente a inserirsi nel quadro della politica energetica nazionale, anche attraverso strumenti legislativi appositi e misure attuative. A livello internazionale e nazionale il panorama

sta progressivamente mutando, conseguentemente all'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, alla Conferenza Nazionale Energia e Ambiente e alla redazione del PNERB (Piano Nazionale Energie Rinnovabili da Biomasse) e del Libro Bianco per le Rinnovabili. Alcune criticità sono legate anche agli impatti ambientali.

I problemi potenzialmente maggiori, derivanti dall'utilizzo delle biomasse su vasta scala, derivano dalla raccolta dei residui colturali e forestali. I residui lasciati sui campi hanno, infatti, un valore commerciale quasi nullo, ma hanno una funzione di mantenimento del suolo. Il suolo è lo strato superficiale della crosta terrestre ed è utilizzato dalla vegetazione come supporto e fonte di sostanze nutritive. Il materiale organico lasciato sui campi ha diverse funzioni: mantiene elevato il contenuto di nutrienti, protegge la superficie del suolo dall'erosione, ne stabilizza la struttura e la tessitura, ne riduce la densità, procura energia ai microrganismi che vi vivono.

Si può calcolare una tolleranza alla perdita del suolo che, ovviamente, dipende dal tipo di terreno, dalla topografia, dal clima e dall'uso che si fa del suolo stesso. Per tolleranza alla perdita di suolo si intende quella erosione massima che può ancora permettere di sostenere, economicamente e a tempo indeterminato, un'alta produttività. L'erosione è comunemente considerata legata alle forme intensive di agricoltura; esiste quindi il pericolo che la rimozione di questo materiale organico dai campi possa aumentare il degrado del suolo. Inoltre, una delle principali conseguenze del degrado è la diminuzione della capacità di trattenere l'acqua e, quindi, un ulteriore aumento dell'erosione e il bisogno di maggiori irrigazioni. I microrganismi, con la decomposizione del materiale organico lasciato sui campi, provvedono all'immagazzinamento di azoto, evitando così che i nutrienti colino in profondità nel terreno durante l'autunno e l'inverno. Analogamente all'erosione, la perdita del contenuto di sostanza organica ha conseguenze sulla capacità di ritenzione sia dell'azoto sia dell'acqua.

3.7.3 Fattori di emissione

Durante la combustione, carbonio e idrogeno presenti nei legami chimici della biomassa subiscono una reazione di ossidazione. Una combustione incompleta può comportare l'emissione di particolato o di sostanze parzialmente ossidate, alcune delle quali possono essere tossiche. Azoto e zolfo presenti nelle biomasse sono trasformati in ossidi: principalmente in diossido di zolfo (SO_2) e ossido di azoto (NO), ma anche triossido di zolfo (SO_3) e diossido di azoto (NO_2). Anche le piccole quantità di N presenti nell'aria (il principale ossidante utilizzato nella combustione) sono trasformati in ossidi alle temperature di combustione; maggiore la temperatura, maggiore sarà la concentrazione di ossidi d'azoto (Klass, 1998). La concentrazione di azoto e zolfo nelle biomasse è spesso molto limitata; data, però, la grande varietà di tipologia delle biomasse, alcune possono contenere quantità più elevate (Tabella 3.13).

Elementi come il cloro possono essere presenti in concentrazioni relativamente alte quando le biomasse derivano da rifiuti solidi urbani o da combustibile derivato da rifiuti (CDR); sono invece presenti in quantità molto limitate, se non assenti, nelle biomasse legnose. La presenza di cloro può portare alla formazione di composti altamente inquinanti, ad esempio l'acido cloridrico. Infine, la quantità di ceneri, prodotte dall'ossidazione dei metalli contenuti nella biomasse, dipende molto dalla qualità della biomassa stessa e dalla sua composizione chimica. Le ceneri sono generalmente smaltite in discarica, anche se potrebbero essere riutilizzate, ad esempio come ammendante.

I sistemi di combustione devono essere progettati in modo da avvicinarsi il più possibile alle condizioni di combustione completa con il controllo delle emissioni, in modo da

poter estrarre la maggior quantità di energia, minimizzando le emissioni indesiderate e rispettando le leggi vigenti. In Tabella 3.14 sono elencati i dati relativi alla combustione stechiometrica per diversi tipi di biomasse, supponendo che il contenuto di umidità sia pari a 15%, che azoto e zolfo si ossidino tutti in NO₂ e SO₂ e, infine, che l'azoto presente nell'aria sia inerte (Klass, 1998). I valori stimati di emissione di NO₂ e SO₂ nella combustione completa sono superiori a quanto ci si aspetterebbe dalle biomasse. La concentrazione relativamente alta di N e S in tutti i tipi di biomasse, ad eccezione del legno di pino, possono potenzialmente causare problemi di emissione e richiedere il trattamento dei fumi con l'abbattimento di NO₂ e SO₂ (Klass, 1998).

Le emissioni possono essere diminuite con i moderni sistemi di abbattimento e con l'utilizzo degli impianti più moderni. Ad esempio, i progressi della tecnologia hanno permesso di diminuire drasticamente le emissioni per le caldaie domestiche (spesso indicate come fonti consistenti di particolato) sia di particolato (da 7,1 kg/TJ a meno di 1,5 kg/TJ) sia di monossido di carbonio (da 22,7-32,7 kg/TJ a 1,3-6,7 kg/TJ) (Klass, 1998). In Tabella 3.15 sono riportate le emissioni in diverse caldaie a biomasse domestiche di potenza termica molto ridotta, dell'ordine di qualche kW (Kjällstrand e Olsson, 2004). Le caldaie sono ordinate per efficienza di combustione crescente. È interessante notare le differenti emissioni della caldaia alimentata a pellet a seconda che funzioni o meno a pieno regime (seconda e terza colonna); quando infatti lavora a piena potenza, le emissioni di questa caldaia sono comparabili a quelle, modeste, della caldaia a legna con marchio *Eco Label* (ultima colonna).

Negli impianti di produzione di energia i filtri sono in grado di rimuovere fino al 99% del particolato in emissione. In assenza di filtri, le emissioni dovute alla combustione delle biomasse sono 5-10 volte inferiori a quelle dovute alla combustione di carbone (Sorensen, 2004). Nella fase di accensione delle caldaie a biomasse si ha emissione di fumi ben visibili, composti da vapor d'acqua ed elevati livelli di particolato ed emissioni gassose. Dopo che la temperatura di regime è stata raggiunta, le emissioni si riducono drasticamente. Quando la temperatura al camino è inferiore ai 60°C, tipicamente durante l'accensione o per le scorrette condizioni di combustione, si verificano gravi emissioni di fuliggine. Secondo Sorensen (2004), gli ossidi di azoto sono in genere 2 o 3 volte inferiori per la combustione di biomasse piuttosto che per la combustione di carbone per chilogrammo di combustibile; invece, per unità di energia la quantità emessa è circa la stessa.

Il DPCM 8/3/2002 disciplina in Italia le caratteristiche merceologiche dei combustibili in funzione anche dell'inquinamento atmosferico, oltre che delle caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione. Il Decreto specifica precisi limiti sulle emissioni, riportati in Tabella 3.16.

Le emissioni risultano inferiori quando la biomassa è bruciata in condizioni ottimali, piuttosto che essere sottoposta a frequenti regolazioni del carico in risposta alla richiesta di energia. Di conseguenza, ad esempio, sistemi di riscaldamento a biomasse muniti di unità di immagazzinamento del calore riducono notevolmente le emissioni (Sorensen, 2004).

Tabella 3.13: Composizione tipica e potere calorifico di biomassa vergine, proveniente da residui (reflui zootecnici e rifiuti solidi urbani), torba e carbone (Klass, 1998).

	Pure Cellulose	Pine wood	Kentucky bluegrass	Giant brown kelp ^a	Water hyacinth ^b	Feedlot manure ^c	RDF ^d	Primary biosolids ^e	Reed sedge peat ^f	Bituminous coal ^g
Ultimate analysis (wt %^h)										
C	44,44	51,8	45,8	27,65	41,1	35,1	41,2	43,75	52,8	69,0
H	6,22	6,3	5,9	3,73	5,29	5,3	5,5	6,24	5,45	5,4
O	49,34	41,3	29,6	28,16	28,84	33,2	38,7	19,35	31,24	14,3
N	-	0,1	4,8	1,22	1,96	2,5	0,5	3,16	2,54	1,6
S	-	0	0,4	0,34	0,41	0,4	0,2	0,97	0,23	1,0
Ash	-	0,5	13,5	38,9	22,4	23,5	13,9	26,53	7,74	8,7
C (maf)	44,44	52,1	52,9	45,3	52,9	45,9	47,9	59,5	57,2	75,6
Proximate analysis (wt %)										
Moisture	-	5-50	10-70	85-95	85-95	20-70	18,4	90-98	84,0	7,3
Organic matter	-	99,5	86,5	61,1	77,7	76,5	86,1	73,47	92,26	91,3
Ash	-	0,5	13,5	38,9	22,4	23,5	13,9	26,53	7,74	8,7
Higher heating value										
MJ/dry kg	17,51	21,24	18,73	10,01	16,00	13,37	12,67	19,86	20,79	28,28
MJ/kg (maf)	17,51	21,35	21,65	16,38	20,59	17,48		27,03	22,53	30,97
MJ/kg carbon	39,40	41,00	40,90	36,20	38,93	38,93		45,39	39,38	40,99

^a*Macrocystis pyrifera*

^b*Eichornia crassipes*

^cAllevamento zootecnico

^dCombustibile derivato da rifiuti

^eRicevuti dal Chicago Metropolitan Sanitary District Facility

^fTorba proveniente dal Minnesota

^gCarbone proveniente dall'Illinois

^hContenuto di umidità in percentuale

Tabella 3.14: stima della combustione stechiometrica per alcuni combustibili solidi (Klass, 1998).

Parameter	Pine wood	Kentucky bluegrass	Feedlot manure	RDF	Bituminous coal	Anthracite coal	Coke
Moisture (wt%)	15,0	15,0	15,0	15,0	3,1	5,2	0,8
Higher heating value (MJ/kg)	18,05	15,92	11,36	12,51	32,61	29,47	29,50
C/H wt ratio	8,2	7,8	6,6	7,5	16,0	33,6	106
Air/fuel wt ratio	5,37	5,51	3,97	4,25	10,81	9,92	10,09
Product CO ₂ (wt/wt fuel)	1,90	1,68	1,29	1,51	2,94	2,96	3,12
Product H ₂ O (wt/wt fuel)	0,56	0,53	0,47	0,49	0,49	0,22	0,07
N ₂ from air (wt/wt fuel)	4,85	4,97	3,58	3,83	8,26	7,58	7,73
CO ₂ in dry flue gas (mol%)	19,9	17,4	18,4	20,0	18,5	19,9	20,4
NO ₂ in dry flue gas (mol%)	0,032	1,55	1,13	0,21	0,0	0,0	0,266
SO ₂ in dry flue gas (mol%)	0,0	0,054	0,075	0,035	0,086	0,101	0,089

Tabella 3.15: Concentrazione di alcuni inquinanti in mg/m³ al camino di piccoli impianti domestici alimentati a biomasse. L'efficienza della combustione è espressa come = [CO₂]/([CO₂]+[CO]) (fonte: Kjällstrand e Olsson, 2004).

Fuel device effect	Wood stove ^a 20 kW	Pellet stove ^b 7 kW	Pellet burner ^c low	Pellet burner ^c 20 kW	Wood boiler ^d 30 kW
CO ₂	120 000	46 000	50 000	130 000	120 000
CO	4100	610	470	13	190
CH ₄	120	5	3	0,3	3
Benzene	13	0,6	0,5	0,01	0,4
Methoxyphenols	44	2	0	0	0
Pyrene	0,4	0	0	0	0,14
Combustion efficiency	0,97	0,99	0,99	1,00	1,00

^a Residential fire place like boiler from 1981 coupled to a water tank.

^b Top fed.

^c Top fed, installed in an old boiler (for wood, oil and electricity) coupled to a water tank

^d Environmentally labelled modern wood boiler from 2001, coupled to a water tank.

Il processo di combustione in grandi impianti per la produzione di energia elettrica dovrebbe essere sempre controllato in modo da massimizzare l'efficienza della caldaia e diminuire le emissioni al camino. Nonostante questi obiettivi possano sembrare conflittuali (per ottenere elevate efficienze in genere si aumenta la temperatura della fiamma e, quindi, si causa una maggiore emissione di NO_x) è possibile perseguirli entrambi (Klass, 1998). Questo avviene con successo, ad esempio, nell'impianto di Burlington, Vermont (USA). Le biomasse (*wood chip*), al 40% di contenuto di umidità, alimentano un impianto della potenza nominale di 50 MW (a piena potenza il carico è di 90,7 t/h); le emissioni di NO_x sono 0,062 kg/GJ e l'efficienza della caldaia è 68-73%. Questo risultato è ottenuto senza trattamenti di postcombustione e senza ricircolo dei fumi; piuttosto, sono attentamente controllati la distribuzione del combustibile sulle griglie, il rapporto aria/combustibile, la *overfire* e *underfire air* per diluire i prodotti della combustione abbassando la temperatura e fornire l'O₂ necessario per completare la combustione (Klass, 1998). Quando l'impianto non funziona a pieno carico, si utilizzano modalità simili per il contenimento delle emissioni, anche se gli NO_x risultano lievemente superiori.

Complessivamente, risulta abbastanza complicato fornire un quadro esaustivo e coerente delle emissioni dovute alla combustione di biomasse. Nella letteratura scientifica e grigia, infatti, i valori sono spesso presentati diversamente (basta guardare agli esempi qui riportati: mg/MW, g/GJ, mg/Nm³) o in modo non completo. Ad esempio, la banca dati dell'Apat (2006), per quanto rappresenti un ottimo ed organico database dei fattori emissivi per tutti i macrosettori delle attività produttive, non riesce ad essere completa. Per quanto riguarda la produzione di energia, mancano i fattori di emissione di impianti residenziali quali caldaie domestiche, stufe e caminetti; mancano

anche i fattori relativi alla emissione di particolato, di particolare interesse quando si intende valutare l'impatto sull'inquinamento atmosferico dovuto all'utilizzo di biomasse. Inoltre, come si può osservare dalla tabella 5 spesso gli intervalli dei fattori di emissione sono talmente ampi da essere poco significativi. Non resta, quindi, che studiare, caso per caso, le emissioni specifiche per impianto di trasformazione e per combustibile; nel caso delle biomasse, quindi, è necessari una approfondita conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale che alimenterà l'impianto di trasformazione.

Tabella 3.16: limiti di emissione in funzione della potenza termica nominale complessiva installata (MW)^a (DPCM 8/3/2002) (in corsivo i valori medi giornalieri).

Emissioni	0,15-3 MW	3-6 MW	6-20 MW	>20 MW
Polveri totali (mg/Nm ³) ^b	100	30	30	30
Carbonio organico totale (COT) (mg/Nm ³) ^b	---	---	30	20
Monossido di carbonio (CO) (mg/Nm ³) ^b	350	300	250	200
Ossidi di azoto (NO ₂) (mg/Nm ³) ^b	500	500	400	400
Ossidi di zolfo (SO ₂) (mg/Nm ³) ^b	200	200	200	200

^a Agli impianti di potenza termica nominale complessiva pari o superiore a 0,035 MW e non superiore a 0,15 MW si applica un valore limite di emissione per le polveri totali di 200 mg/Nm³

^b I valori limite sono riferiti al volume effluente gassoso secco riportato alle condizioni normali (0°C a 0,1013 MPa)

3.8 Bibliografia

- AIGR, 1994. Potenzialità energetica da biomasse nelle regioni italiane. Rapporto redatto su contratto Enea (non pubblicato).
- Apat, 2006. Database dei fattori di emissione, consultato novembre 2006. [online] URL: <http://www.inventaria.sinanet.apat.it/index.php>
- Berndes G., M. Hoogwijk, R. van den Broek, 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, *Biomass & Bioenergy* 25(1): 1-28.
- Comunità Europea, 2005. Piano d'Azione della Biomassa, COM(2005) 628, Bruxelles.
- Di Blasi C., V. Tanzi and M. Lanzetta, A study on the production of agricultural residues in Italy, *Biomass and Bioenergy* 12(5): 321-331, 1997.
- Enea, 2000. Piano Energetico della Regione Lombardia, Rapporto conclusivo relativo alla biomassa.
- Enea, 2006. Rapporto energia e ambiente 2005, Roma, 2006.
- Ericsson K., L.J. Nilsson, 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach, *Biomass & Bioenergy* 30(1): 1-15.
- EurObserv'ER, *Wood energy barometer*, Bruxelles, 2005.
- Facciotto G., S. Bergante, C. Lioia, L. Rosso, G. Mughini, T. Zenone, G. Nervo, Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve, *Forest@* 3(2): 238-252, 2006.
- Fischer G., L. Schrattenholzer, 2001. Global bioenergy potentials through 2050, *Biomass & Bioenergy* 20(3): 151-159.
- Graglia P.S., 2002. L'Unione europea, il Mulino, Bologna.
- Grtn, 2004. Statistiche sulle fonti rinnovabili in Italia, Roma.
- Hoogwijk M., A. Faaij, R. van den Broek, G. Berndes, D. Gielen, W. Turkenburg, 2003. Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy, *Biomass & Bioenergy* 25(2): 119-133.

- IEA, 2005. Bioenergy, Benefits of Bioenergy, Report 01/2005, Rotorua , New Zeland, 2005. [online] URL: <http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=179>
- Istat, 2000. V Censimento Generale dell'Agricoltura, Roma, 2001. [online] URL: <http://www.istat.it/censimenti/agricoltura/>
- Itabia – Italian Biomass Association, 2003. Rapporto sullo stato della bioenergia in Italia nel 2002. Studio di settore, Roma, 2003.
- Itabia – Italian Biomass Association, 2005. Le biomasse per l'energia e l'ambiente: Rapporto 2003, Roma, 2005.
- Kjällstrand J., M. Olsson, 2004. Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances, Biomass and Bioenergy 27: 557–561.
- Klass D.L., 1998. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, Academic Press, San Diego, California.
- Legambiente, 2002. Lombardia terza in Italia per numero di incendi, comunicato stampa.
- McKendry P., 2002a. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass, Bioresource Technology 83: 37-46.
- McKendry P., 2002b. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies, Bioresource Technology 83: 47-54.
- McKendry P., 2002c. Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies, Bioresource Technology 83: 55-63.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development, 1988. Environmental impacts of renewable energy, The OECD Compass Project, Parigi.
- Quaak P., H. Knoef, H. Stassen, 1999. Energy from Biomass – A review of combustion and gasification technologies, World Bank Technical, Energy series, Paper n. 422.
- Righelato, R., D.V. Spracklen, 2007. Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests? Science 317(5840): 902.
- Sørensen B., 2004. Renewable energy. Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects, 3rd edition, Elsevier Academic Press.
- Trinkaas P., 1998. Short-rotation forestry: discussion of 10 Austrian principles from the viewpoint of preservation of environment and nature, Biomass & Bioenergy 1:109-114.
- Yamamoto H., K. Yamaij, J. Fujino, 1999. Evaluation of bioenergy resources with a global land use and energy model formulated with SD technique, Applied Energy 63: 101–113.

4 Potenzialità delle colture energetiche²

Scopo di questo capitolo è proporre un metodo per stimare la produzione di biomassa dalle colture energetiche arboree ed erbacee, date le caratteristiche dell'ambiente locale: geomorfologia, clima, aree protette, uso del suolo. Prima di tutto, sono identificate le specie più adatte alla coltura energetica tra quelle disponibili nel panorama italiano; è quindi formulato un problema di massimizzazione della produzione di biomasse per l'energia per la regione studiata. Ogni cultivar è assegnata così alla superficie tenendo in considerazione sia i parametri che la caratterizzano (massima vocazionalità) sia l'uso del suolo attuale. In particolare, si ipotizza che i terreni agricoli marginali e quelli a riposo (set-aside) siano convertiti alla coltivazione di biomassa per l'energia, senza modificare l'uso del suolo attuale e senza cambiare destinazione alle colture agricole tradizionali. Il metodo si basa sull'integrazione di dati spazialmente distribuiti, elaborati tramite GIS, con dati derivati dai censimenti dell'agricoltura per quanto riguarda l'uso del suolo (aree marginali e a riposo), che hanno invece una struttura discretizzata. L'analisi è applicata alla regione Emilia-Romagna. La produzione sostenibile di colture per l'energia, con un sistema ottimizzato di impianti distribuiti sul territorio per la conversione in energia, può contribuire al soddisfacimento del fabbisogno energetico e alla mitigazione dei cambiamenti climatici.

4.1 Introduzione

L'utilizzo delle colture per produrre biomassa a scopi energetici è un tema di grande attualità nel dibattito energetico: Google Scholar (novembre, 2007) elenca oltre 35.000 articoli scientifici che contengono le parole "biomassa, energia, agricoltura" pubblicati dal 2000 ad oggi. Le biomasse non sono certamente la soluzione finale per la questione energetica (per quanto riguarda la sicurezza dell'approvvigionamento e la differenziazione delle fonti), né per le politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici (Righelato e Spracklen, 2007). Possono tuttavia contribuire ad ampliare il portfolio energetico, e al contempo favorire: la diffusione di sistemi energetici distribuiti; l'uso dei sottoprodotti e dei residui, altrimenti non utilizzati, per la produzione di energia; la conversione di terreno agricolo inutilizzato a colture energetiche.

Globalmente, le biomasse, che forniscono l'11% dell'energia primaria, sono la fonte di energia rinnovabile più importante (IEA, 2005). Nel 2010, l'obiettivo EU-25 presente nel Biomass Action Plan è la produzione di 6,3 EJ (1 EJ = 10^{18} J) dalla bioenergia; nel 2005 la produzione ammontava a 3,0 EJ, suddivisi tra biomasse solida (80%), biogas (7%), biocombustibile (5%) e rifiuti solidi urbani rinnovabili (8%) (EurObserv'ER, 2006). Per quanto riguarda i gas serra (GHG), secondo quanto stabilito nell'ambito del protocollo di Kyoto, l'Unione Europea, che al tempo aveva 15 stati membri, dovrebbe

² Il lavoro presentato in questo capitolo è stato elaborato insieme a Giorgio Guariso del Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano. Il lavoro è una parte del libro "Energia e nuove colture agricole. Potenzialità delle biomasse a scala regionale", 2007, ed. Polipress; inoltre, è stato inviato alla rivista scientifica *Environmental Modeling and Software* per la pubblicazione.

ridurre le proprie emissioni dell'8% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2008-2012, una riduzione pari a circa 330 milioni tonnellate. Tuttavia, raggiungere questo obiettivo sarà difficile per l'UE-15: le emissioni di GHG sono diminuite solo del 2% nel 2005 rispetto al 1990. L'Italia, in particolare, è lontana dagli obiettivi del protocollo di Kyoto (riduzione 6,5% rispetto al 1990): nel 2005 le emissioni sono aumentate del 12% rispetto al 1990 (EEA, 2007).

La short rotation forestry (SRF, forestazione ad avvicendamento rapido) può contribuire, producendo biomasse per l'energia, alla sostituzione dei combustibili fossili convenzionali e quindi ad evitare le emissioni di anidride carbonica in atmosfera, contribuendo così al raggiungimento degli obiettivi di protocollo di Kyoto. La SRF è una coltura intensiva caratterizzata da alte densità di impianto, brevi turni di taglio (1-4 anni), breve ciclo colturale (più meno 20 anni), elevata meccanizzazione.

La maggior parte della letteratura scientifica è incentrata su specie arboree coltivate in SRF quali pioppo, salice, eucalipto e robinia (Mitchell *et al.*, 1999; Volk *et al.*, 2006; Karačić e Weih, 2006). Recentemente, l'attenzione si è spostata anche su specie erbacee, quali il sorgo, che differiscono dalle SRF principalmente perché hanno raccolti annuali (Venturi *et al.*, 1999; Clifton-Brown *et al.*, 2006; Sims, 2006). Nel corso di un anno, le colture energetiche annuali hanno un ciclo colturale simile a quello delle colture alimentari tradizionali e, proprio per questo motivo, possono sostituire più facilmente le colture tradizionali. Sono oggetto di ricerca specie erbacee pluriennali quali il panico (*Panicum virgatum* L.) e il miscanto (*Miscanthus x giganteus*). Queste sono due erbacee perenni capaci di alti rendimenti soprattutto quando acqua e azoto sono disponibili (Heaton *et al.*, 2004; Ercoli *et al.*, 1999). Una volta impiantate, le specie pluriennali possono essere raccolte ogni anno per un ciclo, come nel caso delle SRF, di 15-20 anni (Venturi *et al.*, 1999). Recentemente, Tilman *et al.* (2006) hanno proposto una coltura innovativa di biomasse per l'energia, ipotizzando di utilizzare coltivazioni ad elevata biodiversità e bassi input energetici. Infatti, nella loro ipotesi di 16 specie erbacee (quali quelle diffuse nelle pianure del nord degli Stati Uniti), tra cui anche delle leguminose azotofissatrici, non è più necessario fornire fertilizzanti azotati; inoltre, questo tipo di coltura sarebbe in grado di sequestrare carbonio nelle radici e nel terreno, riportandolo ai valori originali nell'arco di circa trenta anni.

La maggior parte della letteratura scientifica attuale è dedicata alla identificazione tramite via sperimentale o teorica della specie migliore da coltivare (Di Virgilio *et al.*, 2007; Facciotto *et al.*, 2006; Karačić e Weih, 2006; Bazzani *et al.*, 2005; Ercoli *et al.*, 1999); alle valutazioni economiche e ambientali di una determinata coltura (Monti *et al.*, 2007; Heller *et al.*, 2003); all'analisi del bilancio energetico di un singolo impianto di trasformazione in energia (Goor *et al.*, 2000). Come affermato da Wise *et al.* (2007), invece, la pianificazione dei carbon sink dovrebbe essere svolta almeno a livello territoriale locale e in effetti in questo lavoro si prende il punto di vista di un'autorità regionale che deve comprendere se lo sviluppo del settore delle bioenergie può svolgere un ruolo significativo nel fornire energia ed efficace nel ridurre le emissioni GHG. Un'analisi di questo tipo può essere svolta soltanto utilizzando lo strumento dei GIS che permettono di considerare la distribuzione spaziale sia della disponibilità sia dell'utilizzazione finale della biomassa.

Un approccio di pianificazione a scala regionale o nazionale è stato usato in pochi studi. Schneider *et al.* (2001) utilizzano i GIS per valutare la disponibilità di suolo in Brasile per le coltivazioni energetiche. Fischer *et al.* (2005) definiscono un metodo, con tecniche GIS, per identificare alcuni requisiti ambientali di specie arboree ed erbacee come ad esempio il clima, il suolo, in termini di pedologia e morfologia. De la Rosa *et al.* (2004) hanno infine sviluppato un modello per prendere decisioni in campo

agronomico ed ecologico tenendo in considerazione la protezione del suolo, integrando informazioni sulla pianificazione territoriale con l'uso attuale del suolo; inoltre, il sistema sviluppato si basa sull'utilizzo di informazioni di diversa natura e struttura, dalle basi di dati, alla cartografia e alle reti neurali.

Il metodo proposto, quindi, aggrega informazioni provenienti da diversi data set e organizzati in diversi formati: cartografia digitale per le caratteristiche del suolo, descrizioni qualitative delle esigenze agronomiche delle cultivar e dati numerici di uso del suolo. Il metodo è spiegato nel dettaglio nella sezione 4.2. Sarà stimata la potenzialità delle colture energetiche di biomasse valutando la vocazionalità (sulla base delle esigenze agronomiche) e la disponibilità effettiva (sulla base dell'uso del suolo) di suoli da dedicare alle coltivazioni energetiche; verranno considerate specie sia erbacee sia arboree da coltivare sul territorio oggetto di studio e si proporrà un piano per lo sviluppo delle colture di biomassa per l'energia a scala regionale (sezioni 4.3-4.5). La valutazione della produttività delle specie coltivate a fini energetici è accompagnata dall'analisi dei flussi di GHG (sezione 4.6); per ogni specie si considerano le emissioni dovute alle cure colturali e al trasporto all'impianto di trasformazione e il sequestro dovuto all'assorbimento della CO₂ nella biomassa grazie alla fotosintesi. Il metodo presentato è generale e può essere applicato ad altre colture e per utilizzazioni finali dell'energia differenti (per esempio, produzione di biocombustibile, di energia elettrica, di energia termica o di cogenerazione). In questo studio in particolare, il metodo è applicato alla regione dell'Emilia-Romagna (sezione 4.7), una vasta zona agricola dell'Italia, e l'utilizzazione prevista per le biomasse è la combustione per la produzione di energia termica o elettrica.

4.2 Metodo proposto

La superficie che può essere dedicata alla coltivazione di colture energetiche è identificata alla scala locale attraverso l'utilizzo della cartografia e di data-set con informazioni riguardo alle caratteristiche morfologiche, pedologiche e climatiche, ai confini amministrativi e all'uso del suolo attuale. Più precisamente, come mostrato in Figura 4.1, il lavoro è schematicamente organizzato come segue:

1. *Selezione delle specie*: sono definite le esigenze agronomiche per tutte le cultivar che saranno considerate (database fitologico);
2. *Vocazionalità dell'area*: sono necessarie informazioni per descrivere le caratteristiche del suolo e, quindi, per comprendere su quale superficie ogni cultivar possa essere coltivata assecondando al meglio le esigenze agronomiche (cartografia);
3. *Disponibilità dell'area*: poichè non tutto il suolo che risulta vocazionale può essere convertito a coltura energetica, è necessario identificare l'area disponibile sulla base dell'uso del suolo attuale (database statistico), considerando quindi vincoli di natura sociale e politica;
4. *Assegnazione dell'area*: bisogna definire un processo decisionale per stabilire quale coltura assegnare ad ogni parcella di suolo vocata ed effettivamente disponibile.

Il primo passo (*selezione delle specie*) consiste nell'identificare le specie promettenti per l'ambito territoriale in esame e le relative caratteristiche fitologiche. Questo significa che è necessario una base di dati delle preferenze pedologiche, climatiche e geomorfologiche per ogni specie considerata, insieme ad alcune informazioni sulla tipologia delle attività agricole richieste da ogni specie.

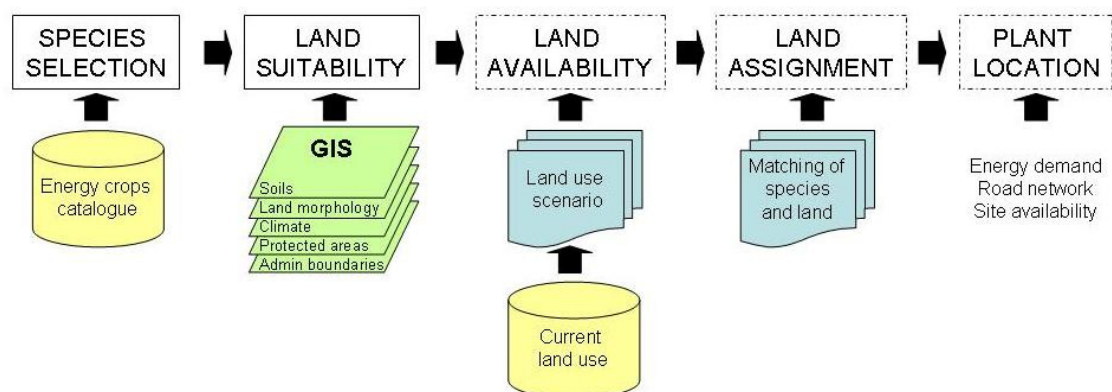


Figura 4.1: Schema del metodo proposto per la selezione delle aree adatte per la coltivazione di colture per l'energia.

Il secondo passo consiste nell'organizzare una base di dati delle informazioni cartografiche (*vocazionalità dell'area*) della zona studiata. Questa base di dati dovrà contenere i dati sulla morfologia, sulla pedologia, sul clima e su tutte quelle altre caratteristiche che servono per valutare l'idoneità della zona alla coltivazione. Tutte queste informazioni dovrebbero essere disponibili come cartografia digitale, permettendo così una rappresentazione continua dei dati sul territorio. Per mezzo del GIS, tutto il territorio studiato è suddiviso in *parcelle* (definite come unità minime con attributi uniformi, come in Tianhong *et al.*, 2003) che soddisfano uno o più criteri per la coltivazione delle colture energetiche. Si noti che una parcella può essere adatta ad una o più specie; di conseguenza successivamente sarà necessario decidere a quale specie assegnare ogni singola parcella (ad es., la specie più produttiva, quella che necessita di minori input, un insieme di specie per salvaguardare la biodiversità).

Utilizzando i dati statistici sull'utilizzo agricolo del suolo in ogni parcella, insieme alle informazioni sulle zone con limitazioni di uso (ad es., parchi naturali), il terzo passo consiste nel definire la disponibilità di suolo adatto per ogni parcella e per ogni specie (*disponibilità dell'area*). Questo passo implica che siano prese alcune scelte di natura politica, prima di tutto sulle eventuali modifiche dell'attuale uso del suolo. In una zona a carattere agricolo, dedicare parte del suolo alle colture energetiche implica la riduzione di suolo per le colture alimentari tradizionali; per valutare bene questa conversione di suolo è necessario confrontare i benefici dell'agricoltura tradizionale rispetto ai possibili guadagni dalle colture energetiche. Tuttavia, per un corretto confronto dovrebbe essere formulato un complesso problema completo di pianificazione agricola (comprendendo colture food e non-food, le relative pratiche agricole, l'idoneità del suolo, i costi di utilizzazione e di trasporto, ecc.), come quello formulato per tutto il settore agricolo degli Stati Uniti da De La Torre Ugarte *et al.* (2003); inoltre, la soluzione di questo problema di pianificazione potrebbe essere troppo lontana dalla realtà e, quindi, in sostanza inaccettabile. Si è quindi deciso di fissare *a priori* alcuni limiti al problema di pianificazione, al fine di garantirne l'accettabilità sociale. Nel caso di studio applicato all'Emilia-Romagna, per esempio, la decisione fissata consente di destinare alle colture energetiche solo i terreni agricoli attualmente non utilizzati per l'agricoltura tradizionale, di conseguenza perturbando in minima parte le pratiche agricole.

Il quarto e ultimo passo consiste nel decidere quale specie deve essere coltivata in ogni superficie adatta e disponibile (*assegnazione dell'area*). Quando più di una specie può essere coltivata su una determinata area, bisogna risolvere un problema di

ottimizzazione per decidere quale specie coltivare. L'obiettivo di questo problema dovrebbe essere, in linea di principio, la massimizzazione dell'energia prodotta. Per massimizzare l'energia prodotta bisogna stimare l'energia lorda estraibile dalla coltura energetica in esame e sottrarre a questo valore l'energia necessaria per la sua coltivazione (fertilizzanti compresi) e per il suo trasporto. Il problema deve quindi determinare anche il tipo di impianto di trasformazione, la sua capacità e localizzazione; diventa quindi un problema abbastanza complesso, soprattutto se affrontato senza grandi limitazioni, ad esempio, sulle concrete possibilità di costruzione di impianti con ridotti impatti ambientali e sociali.

L'energia prodotta in un sistema territoriale è data dall'energia prodotta negli impianti di trasformazione (che dipende dal numero, dalla taglia e dall'efficienza degli impianti) a cui devono essere sottratte l'energia necessaria per il trasporto delle biomasse dal luogo di coltivazione e raccolta agli impianti (definendo quindi dei bacini di conferimento) e l'energia necessaria per le operazioni colturali delle colture energetiche. La massimizzazione della produzione di energia da colture energetiche può quindi essere risolto utilizzando un problema con la seguente formulazione.

Funzione obiettivo:

$$\max J = \sum_i \sum_j \sum_k [(\eta_j \cdot LHV_k \cdot u_k \cdot x_{ijk}) - (en_{transport\ k} \cdot d_{ij} \cdot u_k \cdot x_{ijk}) - (en_{grow\ k} \cdot x_{ijk})] \quad (1)$$

dove:

x_{ijk} è la variabile di decisione che rappresenta l'area, espressa in ettari (ha), nella parcella i -esima, coltivata con la specie k -esima e trasportata all'impianto j -esimo;

u_k è la resa annuale di biomassa della specie k -esima, espressa in ton ss/ha;

η_j è l'efficienza dell'impianto j -esimo;

LHV_k è il potere calorifico inferiore della specie k -esima, in MJ/ton ss;

$en_{transport\ k}$ è il costo energetico annuale, in MJ/ton ss/km, per trasportare la biomassa k -esima dalla parcella i -esima all'impianto j -esimo;

$en_{grow\ k}$ è il costo energetico annuale, in MJ/ha, per le cure colturali della specie k -esima;

d_{ij} è la distanza di trasporto, in km, dalla parcella i -esima all'impianto j -esimo.

Vincoli:

$$\sum_j \sum_k x_{ijk} \leq A_i \quad \forall i \quad (2)$$

Il primo vincolo impone che la somma delle aree x_{ijk} in ogni parcella i -esima coltivate ciascuna con la specie k -esima, sia al massimo grande quanto l'area disponibile della parcella stessa A_i (in ha); e

$$CAP_j \cdot \xi^L \cdot y_j \leq \sum_i \sum_k LHV_k \cdot u_k \cdot x_{ijk} \leq CAP_j \cdot \xi^H \cdot y_j \quad \forall j \quad (3)$$

Il secondo vincolo limita la capacità di ciascun impianto j -esimo in un determinato intervallo, definito da un limite inferiore ξ^L e un limite superiore ξ^H della capacità ottimale dell'impianto CAP_j (in MJ/anno), quando l'impianto è effettivamente costruito nella localizzazione j ($y_j=1$), mentre è nullo altrimenti ($y_j=0$). Il fatto di lavorare in un

intervallo attorno alla capacità nominale dell'impianto garantisce che il valore del rendimento η_j sia effettivamente significativo.

$$x_{ijk} \geq 0, y_j = 0,1 \quad \forall i,j,k \quad (4)$$

Infine, gli ultimi vincoli impongono che le aree destinate alle colture energetiche siano non negative e che la presenza di un impianto in una localizzazione candidate j sia un numero binario.

Questo problema, generalizzazione del problema di localizzazione di un impianto a capacità fissata, è noto per essere NP-hard. In questo caso la domanda di ogni impianto è determinata dalla biomassa disponibile, che è a sua volta una variabile di decisione; nelle applicazioni, il problema può avere migliaia di variabili reali e centinaia di variabili binarie. Abbiamo quindi sviluppato una procedura per dividere il problema in due parti: il primo problema è l'ottimizzazione della biomassa ed il secondo è un problema classico di localizzazione degli impianti, con in ingresso le informazioni fornite sulla disponibilità della biomassa ottenute dal primo problema. Una volta che questo problema è risolto, i flussi di anidride carbonica possono essere stimati, dalla coltivazione alla trasformazione della biomassa. Questo è uno degli aspetti più importanti e interessanti per una amministrazione regionale (o comunque pubblica) poiché mostra se l'ottimizzazione della coltivazione delle colture energetiche e dell'utilizzo in impianti di trasformazione energetica possa contribuire o meno in modo significativo alla riduzione delle emissioni climalteranti.

4.3 Selezione delle specie adatte alle colture energetiche

Come già accennato, differenti specie e cultivar possono essere considerate quali potenziali colture energetiche. Per essere utilizzati nella procedura di pianificazione, i dati relativi a ciascuna specie o cultivar devono includere informazioni sulle esigenze (ad es., suolo, clima, morfologia del terreno) e sulle pratiche colturali. Poiché le colture energetiche non sono molto diffuse nel panorama agricolo italiano, in questo studio abbiamo dovuto limitare la scelta a quelle poche specie e cultivar adatte alla zona studiata (ad es., abbiamo escluso l'eucalipto) e studiate (per avere indicazioni sulle rese e sulle pratiche agricole; Facciotto *et al.*, 2005; Bonari *et al.*, 2004). Le seguenti specie sono state scelte:

- Cloni del pioppo: Lux (*Populus deltoides*), BL Costanzo (*Populus x euramericana*), I-214 (*Populus deltoides x Nigra families*);
- salice (*Salix*);
- robinia (*Robinia pseudoacacia* L.);
- sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench).

La Figura 4.2 mostra le rese delle specie arboree mediate sul ciclo produttivo. Per quanto riguarda i cloni del pioppo sono disponibili più dati, poiché in Italia sono molto studiati. La disponibilità e la qualità dei dati hanno permesso di considerare due distinti schemi culturali per i pioppi: uno con input di energia bassi (LI, low input) e uno con alti input di energia (HI, high input); il secondo, rispetto al primo, è caratterizzato da maggiori applicazioni di fertilizzanti, diserbanti e irrigazione.

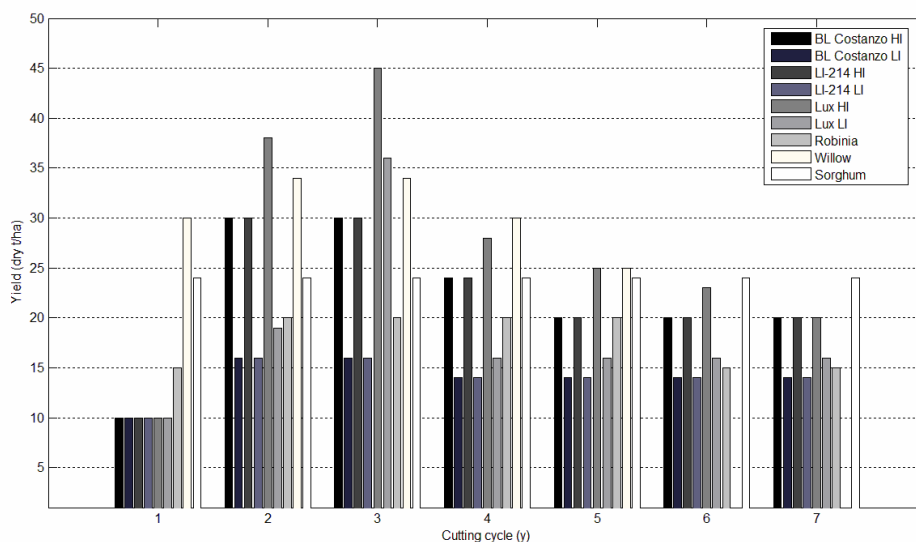


Figura 4.2: resa per turno di taglio per le colture arboree ed erbacee.

Le colture energetiche sono caratterizzate come descritto in Tabella 4.1, mentre le relative operazioni colturali sono elencate in Tabella 4.2. Le operazioni agricole, oltre a caratterizzare ogni coltura, servono anche per valutare gli input di energia e le emissioni di GHG, come indicato in Tabella 4.3. I fertilizzanti sono applicati dopo l'impianto (120 kg/ha N, P, K per LI e colture HI e per il sorgo) e dopo la raccolta (60 kg/ha N, P, K per LI; 300 kg/ha N, 250 kg/ha P, K per colture HI). Le emissioni dei fertilizzanti derivano dalla fabbricazione e dalla applicazione in campo e dalle emissioni di N₂O successive alla loro applicazione, con un fattore di emissione pari a 0,0125. I prodotti fitosanitari (0,3 kg/ha) e l'erbicida (0,45 kg/ha) sono applicati come indicato in Tabella 4.1; questi producono modeste quantità di emissione in atmosfera, dovute all'energia necessaria alla fabbricazione (Tabella 4.3).

Tabella 4.1: caratteristiche delle colture energetiche; la resa annuale è mediata su tutta la durata del ciclo colturale.

	Poplar Lux ^a		Poplar BL Costanzo ^b		Poplar I-214 ^c		Robinia ^c	Willow ^c	Sorghum ^a
	LI	HI	LI	HI	LI	HI			
Rotation year (y)	2	1	2	1	2	1	2	3	1
Cycle duration (y)	14	14	14	14	14	14	14	15	1
Annual yield (dry t/ha/y)	8.6	12.5	7.0	11	7	10.3	7,9	10,2	24
LHV ^d (kJ/kg _{dry})	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,700	17,828	17,247	17,262
Land devoted to each crop (ha)	6,006	6,006	762	762	4,269	4,269	298	0	18,299
CO ₂ from nat. gas displaced (t CO ₂ /ha/y)	4.9	7.2	4.0	6.3	4.0	5.9	4.6	5.7	13.5

^a Bonari *et al.*, 2004; ^b Zenone, 2005; ^c Facciotto *et al.*, 2005; ^d Phyllis Database, 2007

Tabella 4.2: SRF operations; over the life cycle, numbers stand for the year when each operation takes place.

	Poplar LI	Poplar HI	Robinia	Willow	Sorghum
Establishment year					
Ploughing	1	1	1	1	1
Harrowing	1	1	1	1	1
Fertilization	1	1	1	1	1
Planting as cuttings	1	1	1	1	
Sowing					1
Chemical Weed control	1	1	1	1	1
Mechanical weed control	1	1	1	1	
Irrigation	1	1		1	1
Productive years					
Fertilization	2	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14		2	
Plant protection products		2, 4, 6, 8, 10			
Mechanical weed control	2 – 14	2 – 14	3, 5, 7, 9, 11, 13	2 - 14	
Chemical weed control	2, 4, 6, 8, 10, 13	2, 4, 6, 8, 10, 13	2, 4, 6, 8, 10, 13	2, 4, 6, 8, 10, 13	
Irrigation		2-15		2 - 15	
Harvesting	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14	3, 6, 9, 12, 15	1
Crop removal	14	14	14	15	1

Tabella 4.3: Consumi di energia in MJ/ha per le operazioni colturali e per il trasporto. I fattori di emissione per il diesel sono: $74 \cdot 10^3$ kg CO₂/MJ, $0.04 \cdot 10^3$ kgN₂O/MJ, $0.028 \cdot 10^3$ kgCH₄/MJ. Si assume che l'energia necessaria per la produzione di fertilizzanti e prodotti fitosanitari sia fornita da energia elettrica; le emissioni prodotte da 1 kWh sono 0.58 kg CO₂.

Farming operations¹	Diesel consumption (MJ_{diesel}/ha)
Ploughing	1,908
Harrowing	1,080
Planteing as cuttings	540
Sowing	504
Applying chemical weed control	720
Applying mechanical weed control	540
Applying plant protection products	540
Fertilizing (N, P, K)	540
Irrigation	6,912
Harvesting	4,320
Crop removal	1,800
Hauling²	Diesel consumption (MJ_{diesel}/ha)
Low yields (< 11 dry t/y)	2,050
High yields (≥ 11 dry t/y)	2,562
Fertilizers¹	Energy requirement for production (MJ/kg)
N	73.7
P	13.4
K	9.2
Pests and weeds control¹	Energy requirement for production (MJ/kg)
Weed control products	91
Plant protection products	53

¹ Bigon, 2002; Riva, 2004; Zenone, 2005.

² Dubuisson e Sintzoff, 1998.

4.4 Quali terreni destinare alle colture energetiche

Come già sottolineato, l'assegnazione di terreno ha due tipi di vincoli: uno di natura ambientale che può essere considerato continuo sul territorio e che, quindi, può essere applicato utilizzando procedure GIS; e l'altro di natura sociale, che comporta la definizione di quale porzione di terreno adatto può essere dedicata alle colture energetiche. Questo ultimo implica che le decisioni siano prese a livello di ogni parcella e, pertanto, l'assegnazione può essere elaborata solo utilizzando dati statistici che sono discreti, poiché si riferiscono a ciascuna parcella.

4.4.1 Terreni adatti: vocazionalità tramite GIS

Gli specifici requisiti del suolo di ciascuna specie sono definiti in termini di:

- variabili geomorfologiche: pendenza, altitudine;
- variabili pedologiche: caratteristiche geotecniche (conformazione e profondità del suolo, presenza di ghiaie, stabilità, drenaggio), caratteristiche del suolo (pH, presenza di calcare);
- variabili climatiche: regimi di temperatura e precipitazione;

- variabili fisico-chimiche: presenza di elementi come il carbonio organico (C), azoto (N), rapporto C/N, fosforo (P) e calcio (Ca).

Tutte queste variabili possono essere rappresentate sulla cartografia digitale dell'area di studio per mostrare dove le condizioni ambientali sono adatte a ciascuna specie. Sottraendo aree inutilizzabili per motivi normativi (ad esempio, parchi naturali, zone di protezione, ecc), si ottiene una stima della superficie che può essere utilizzata per le colture energetiche (e, ovviamente, anche della superficie dove la coltivazione è irrealizzabile). Può ovviamente accadere che più di una coltura sia adatta in una parcella; sarà quindi necessario, al quarto e ultimo passo della procedura, definire un modo per scegliere la coltura più adatta.

Parcelle che risultano essere minori di una superficie minima possono essere escluse da ulteriori elaborazioni (le SRF richiedono investimenti iniziali di macchinari e di personale, che non possono essere giustificate per superfici molto piccole). Infine, spesso è utile, per esempio per garantire la compatibilità con le statistiche amministrative, imporre che ogni parcella si trovi completamente entro il confine di un'unità amministrativa. Questo richiede semplicemente l'ulteriore intersezione, tramite GIS, con lo strato dei confini amministrativi e divide i settori di eguali caratteristiche di terreno che si trovano lungo i confini in diverse parcelle ciascuna inclusa soltanto in un'unica unità amministrativa.

4.4.2 Terreni disponibili: terreni agricoli abbandonati e set-aside

Un altro punto cruciale è capire che tipo di terreno può essere coltivato o sostituito con colture energetiche senza influenzare negativamente il mercato dei prodotti alimentari al fine di evitare i cosiddetti "tortilla riots," come il Messico e gli Stati Uniti d'America di recente hanno sperimentato. In effetti, l'America ha assistito ad un sostanziale aumento dei prezzi del granturco spinto dalla crescita della domanda di cereali per la produzione di biocarburanti (The Economist, 2007). Come già sottolineato, comprendere i trade-off tra il terreno destinato alla produzione di cibo o di biomasse per l'energia richiederebbe la formulazione di un complesso problema di assegnazione del terreno per l'intero settore agricolo. Oltre ad essere molto al di là delle finalità di questo studio, questo approccio può facilmente condurre a soluzioni che richiedono eccessivi cambiamenti nella prassi attuale, e quindi, in pratica, inaccettabili.

Un vincolo deve essere imposto considerando le condizioni socio-economiche delle zone studiate. Per esempio, può essere deciso di convertire una determinata porzione di terreno attualmente dedicata alle colture alimentari tradizionali. In Italia (come in altri paesi UE) l'agricoltura alimentare ha una lunghissima tradizione, anche se attualmente il reddito degli agricoltori si basa in gran parte sulle sovvenzioni statali, a causa dei prezzi bassi per le importazioni di beni più convenienti e per la sovrapproduzione di colture alimentari tradizionali. Inoltre, gli agricoltori sono tipicamente pagati (con la nuova Politica Agricola Europea tale sovvenzione è stata annullata) per non coltivare colture alimentari su una determinata percentuale del loro terreno da seminare (il cosiddetto set-aside).

In questo studio, per esempio, si suppone di non modificare l'attuale uso del terreno e quindi di dedicare a colture energetiche solo terreno agricolo marginale e terreno a riposo (set-aside land). Chiaramente, qualsiasi altra percentuale di terreni attualmente coltivati può essere destinata a colture energetiche, ma un'analisi economica di una tale alternativa dovrebbe, come già accennato, tener conto dei benefici persi dalle preesistenti colture alimentari.

4.4.3 Assegnazione di ciascuna coltura ai terreni a maggiore vocazionalità disponibili

Infine, una volta che il terreno adatto è stato individuato e che all'interno di esso il terreno disponibile per le colture energetiche è stato selezionato, vale a dire il RHS dei vincoli (2) è stato fissato, è necessario sia risolto il problema dell'ottimizzazione (1) - (3) per decidere quale tipo di coltura energetica coltivare in ogni parcella e dove costruire gli impianti di trasformazione.

Come già anticipato, il problema è stato diviso in due parti, utilizzando la seguente procedura. In primo luogo, limitare le variabili di decisione a solo quelle che rappresentano le parcelle i e le colture j entro una distanza massima di 30 o 40 km. Questo limita i coefficienti dei secondi termini della funzione obiettivo (1) in modo che la funzione stessa diventi certamente crescente con x_{ijk} (una coltura che ha un rendimento energetico netto più elevato per una distanza d_{ij} , è preferibile anche per tutte le distanze più corte dal momento che l'energia per il trasporto diminuirebbe certamente). In questa condizione, solo i vincoli (2) sulla disponibilità del terreno restano attivi, dal momento che non vi è alcun limite al numero di impianti di trasformazione definiti dai vincoli (3). Quindi, siamo in grado di risolvere separatamente il problema dell'assegnazione della coltura in ogni parcella assegnando semplicemente la coltura che massimizza la differenza tra l'energia prodotta e quella spesa (con il valore massimo di d_{ij} assunto). Si noti che, nella situazione comune in cui le colture possibili hanno simili valori di riscaldamento e di energia di coltivazione (ad es., Tabella 4.1), questo significa assegnare a ciascuna parcella la coltura con la maggiore produzione di biomassa. In secondo luogo, il problema di localizzazione dell'impianto viene risolto con la quantità di biomassa fissata, determinata sopra. In questa fase, i corretti bilanci di energia sono calcolati, considerando le effettive distanze sulle quali le colture sono trasportate. Infine, si verifica che le distanze ottimali derivate dalla soluzione dell'ubicazione dell'impianto siano effettivamente entro il limite di distanza imposto inizialmente.

Il problema dell'assegnazione del terreno viene dunque risolto tramite un approccio *greedy*. Parcelle adatte solamente per una coltura, saranno coltivate con quella coltura; mentre nelle parcelle in cui più colture sono adatte, sarà coltivata solo la coltura più produttiva. In queste condizioni, per ciascuna parcella i , solo un valore di k è possibile: vale a dire ogni parcella è una monocoltura (anche se la sua produzione può andare a più di un impianto j).

Nel seguente caso di studio, è stato inoltre ipotizzato che le colture arboree possano essere coltivate solo su terreni agricoli marginali (attualmente inutilizzati), e che le colture erbacee possano essere coltivate solo su terreni messi a riposo (set-aside). In realtà, i terreni messi a riposo sono definiti come una percentuale di terreni seminativi e, in pratica, sono una parte del settore agricolo che, pur non essendo coltivata ogni anno, tuttavia può partecipare alla rotazione annuale dei terreni agricoli. È quindi del tutto ragionevole presumere che gli agricoltori non dedicherebbero così facilmente un terreno a una coltura arborea perenne, che può impedire di continuarne con il normale uso agricolo.

4.4.4 Localizzazione degli impianti

La localizzazione ottimale degli impianti è un problema standard che può essere, almeno approssimativamente, risolto come descritto in letteratura (ad esempio, Drezner e Hamacher, 2001). Esso deve contenere le caratteristiche specifiche sia del territorio sia degli impianti di trasformazione. Per esempio, parcelle candidate ad ospitare un

impianto dovrebbero avere abbastanza terreno a disposizione per la sua installazione. Inoltre, se è stato previsto teleriscaldamento, la parcella dovrebbe contenere una città sufficientemente grande e densamente popolata da poter sfruttare in modo efficiente il calore fornito dall'impianto.

4.5 Flussi di gas serra

La biomassa è una fonte di energia rinnovabile che può essere utilizzata per produrre energia, senza aggiungere nuovo biossido di carbonio all'atmosfera, contribuendo quindi a mitigare i cambiamenti climatici globali e a soddisfare gli obiettivi fissati dal Protocollo di Kyoto. Insieme con la valutazione della disponibilità di biomassa, è quindi necessario valutare come le colture energetiche contribuiscano alla riduzione dei gas serra (GHG). Nell'analisi, sono state considerate le emissioni sia dirette (consumo di carburante in macchinari) sia indirette (produzione di fertilizzante). I flussi sono espressi in termini di tonnellate CO_{2eq}/ha/anno al fine di consentire un confronto tra le diverse colture considerate e di prendere in considerazione le emissioni di N₂O e di CH₄ (rispettivamente, con un potenziale di riscaldamento globale di 296 e 23 oltre 100 anni rispetto a quella di CO₂), insieme con le emissioni di CO₂.

Le emissioni sono associate con le seguenti attività: impianto della coltura, produzione di fertilizzante, operazioni con macchinari (applicazione di fertilizzante, pulizia, irrigazione, raccolta e rimozione del legname dal sito, ristabilimento del sito). Si è ipotizzato che le emissioni di trasporto siano differenti sulle distanze brevi (meno di 5 km) e lunghe (da 5 a 35 km), a causa dei diversi mezzi di trasporto. L'assorbimento (in t CO₂/ha/anno) è associato con la biomassa epigea, ipogea e con il suolo.

L'assorbimento annuale di carbonio varia, a seconda delle specie considerate, da 20,6 a 43 t CO_{2eq}/ha (Tabella 4.4). Le emissioni associate con la coltivazione del terreno e con il trasporto al luogo della trasformazione sono solo una piccola quota del carbonio assorbito dalle colture energetiche. Le SRF ad alto input sono più convenienti di quelle a basso input, perché l'aumentato assorbimento di carbonio supera l'aumento delle emissioni associate con il più elevato fabbisogno energetico della coltura (più piante, concimi, utilizzo di macchinari e trasporto). Il sorgo ha la migliore prestazione, sia a causa della sua maggiore densità sia per la rotazione annuale e, quindi, per le rese più elevate.

Tabella 4.4: flussi di carbonio equivalente per ogni specie; i cloni del pioppo I-214 e BL Costanzo sono soggetti alle stessi operazioni culturali.

Species	Sequestration (t CO _{2eq} /ha/yr)	Farming (t CO _{2eq} /ha/yr)	Transport < 5 km (t CO _{2eq} /ha/yr)	5 < Trasport < 30 km (t CO _{2eq} /ha/yr)
I-214/BL C LI	16.13	0.59	0.03	0.26
I-214/BL C HI	24.93	3.56	0.05	0.32
Lux LI	21.01	0.59	0.03	0.26
Lux HI	30.28	3.56	0.05	0.32
Robinia	21.26	0.46	0.03	0.26
Willow	22.24	1.06	0.03	0.26
Sorghum	52.80	8.97	0.05	0.32

4.6 Caso studio: applicazione all'Emilia-Romagna

L'area di analisi è la regione Emilia-Romagna (Figura 4.3), che si trova nel nord Italia. L'Emilia-Romagna ha un'estensione di circa 22.123 km², pari al 7,3% dell'area dell'Italia. La regione è suddivisa in 341 comuni, raggruppati in nove distretti

provinciali, con un'area media di circa 65 km². Quasi la metà del territorio regionale è nella valle del fiume Po (48%), una pianura ricca e intensamente coltivata; il territorio restante è suddiviso tra colline (27%) e Appennini (25%). Il terreno agricolo ammonta a circa 14.500 km², di questo il 76% è attualmente coltivato (ISTAT, 2000); i dettagli sull'utilizzo dei terreni agricoli sono stati riportati nella Tabella 4.5. I principali prodotti agricoli destinati alla vendita sono il frumento e il granturco. Muovendosi verso la parte montuosa, l'incidenza dei terreni coltivati diminuisce a favore di boschi (che rappresentano il 23% del territorio regionale), e di terreni marginali e abbandonati.

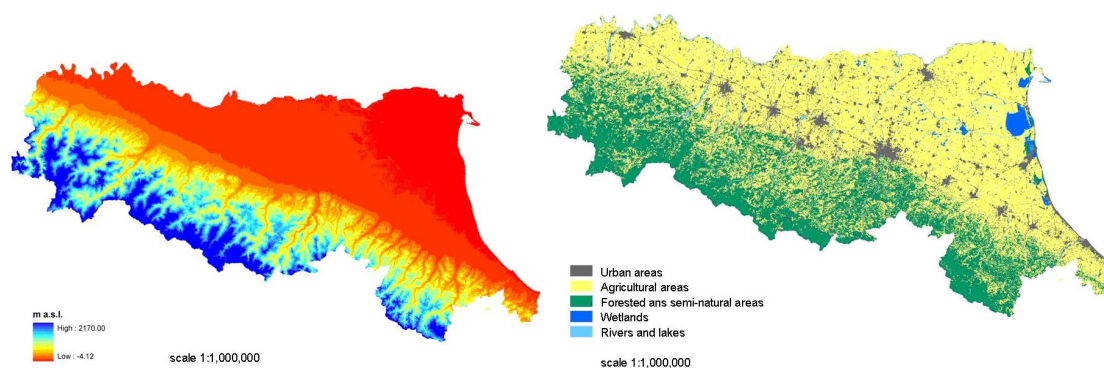


Figura 4.3: elevazione del terreno e mappa di uso del suolo dell'Emilia-Romagna.

Tabella 4.5: uso del suolo nel settore agricolo in Emilia-Romagna (ISTAT, 2000).

	Areas (km ²)	Areas (%)
Utilized agricultural land	11,154	76.5
- Arable land	8,502	56.1
- Set-aside	317	2.2
- Fructiferous trees	1,511	10.4
- Family gardens	13	0.1
- Pastures	1,127	7.7
Productive woods	2,023	13.9
Non utilized agricultural land	423	2.9
Others	984	6.7
Total agricultural land	1,458,413	100

4.6.1 Potenziale regionale delle colture energetiche

Al fine di valutare il terreno adatto per le colture energetiche, i seguenti dati territoriali sono stati raccolti dalla cartografia digitalizzata regionale (Figura 4.1): pedologica (1:250.000), fitoclimatica (1:500.000) e uso del suolo (1:25.000). L'area inadatta per qualsiasi coltura energetica in Emilia Romagna è stata definita come quella che soddisfa uno o più dei i seguenti vincoli:

- altitudine sopra 750 metri;
- pendenza superiore al 20%, che impedisce l'uso di macchinari agricoli;
- suolo contenente rocce, ghiaie, ciottoli;
- suolo non abbastanza profondo per consentire lo sviluppo di radici;
- pH del suolo inferiore a 5,0 e superiore a 8,5;
- precipitazione media annua inferiore a 700 mm e temperatura media inferiore a 10°C, oltre 15°C;

- aree naturali protette, considerate inutilizzabili per qualsiasi attività agricola.

Il terreno adatto per le colture energetiche in Emilia-Romagna è mostrato in Figura 4.4. Nel complesso, ammonta a 9.701 km² (circa il 44% del territorio regionale), la restante superficie (in bianco nella mappa) è esclusa, per uno o più dei vincoli di cui sopra.

Solo una piccola porzione di terreno che si adatta alle esigenze delle colture energetiche (SRF o sorgo), è effettivamente disponibile, a causa dell'attuale uso del terreno in Emilia-Romagna. Si assume di convertire a SRF tutti i terreni marginali, cioè i terreni agricoli abbandonati, e al sorgo, coltura annuale, tutti i terreni a riposo. I terreni a riposo possono ruotare ogni anno e quindi il calendario annuale del sorgo è in fase con la disponibilità della terra. D'altra parte, terreni marginali abbandonati presumibilmente rimangono nella stessa condizione per un più lungo lasso di tempo e, quindi, possono essere riservati a una coltura con la durata di 14-15 anni. Informazioni sull'uso dei terreni con tale dettaglio (terreni agricoli marginali e messi a riposo), non sono disponibili su supporto cartografico, né saranno disponibili in futuro, dal momento che i terreni messi a riposo rientrano nella rotazione annuale delle colture, e quindi cambiano di anno in anno. Abbiamo quindi esaminato la banca dati nazionale dell'agricoltura (ISTAT, 2000), che fornisce dati (in termini di estensioni) per gli usi del suolo di ogni comune della regione (Figura 4.1).

Al fine di fondere le informazioni cartografiche continue e i dati statistici discreti, si è proceduto come segue: per ogni parcella nel h -esimo comune, abbiamo scalato la quantità di terreno adatto per ogni coltura sull'area del comune il cui attuale uso del suolo è "terreno non utilizzato" (nel caso di colture arboree) o "terreno messo a riposo" (nel caso di sorgo). Questa approssimazione implica che la frazione di terreno non utilizzato o messo a riposo è la stessa in tutte le parcelle dello stesso comune, ma questo è abbastanza ragionevole, perché la maggior parte del terreno adatto è nella valle del fiume Po (Figura 4.4), dove la qualità del terreno agricolo è quasi uniforme in ciascun comune. Tale operazione può essere sintetizzata, per ogni parcella, con la semplice formula:

$$A_{hk} = S_h \cdot \frac{M_{hk}}{L_h} \quad (4)$$

dove

A_{hk} è il terreno disponibile di tipo k (non utilizzato o messo a riposo), in una parcella del h -esimo comune;

S_h è l'area della superficie della parcella nel h -esimo comune;

M_{hk} è il terreno marginale o a riposo (in base a k), del h -esimo comune;

L_h è il totale dei terreni agricoli nel h -esimo comune.

In Emilia-Romagna, il terreno disponibile per le colture energetiche è pari a 11.300 ettari per SRF (terreni marginali) e a 18.300 ettari per il sorgo (messa a riposo). La Tabella 4.6 elenca i dettagli per ogni coltura. Tutto il terreno dedicato a colture energetiche sarebbe 1,3% della totale area regionale. I risultati della quantità di terreno destinato a ciascuna coltura arborea e di sorgo sono mostrati in Figura 4.5 e Figura 4.6 rispettivamente. Si noti che il salice non viene assegnato ad alcun terreno perché, avendo gli stessi requisiti del pioppo clone Lux, ma resa minore, è sempre scartato.

Ogni anno, 13.8600 ton di sostanza secca possono essere raccolte da SRF (questo corrisponde alle ipotesi di pioppi HI), mentre inserendo un vincolo sulla disponibilità di acqua per l'irrigazione, sarebbero prodotte 93.100 ton di sostanza secca nell'ipotesi di colture LI. La biomassa da sorgo ammonta a 439.200 ton di sostanza secca all'anno. La produzione di sorgo è di gran lunga superiore a quella di SRF sia per la sua maggiore

resa (24 contro 7-12 t ss/anno), sia per la maggiore disponibilità di terreni. Tuttavia, il sorgo non deve essere visto come la soluzione all'approvvigionamento di biomassa: infatti, è una coltura delicata che può essere completamente danneggiata da avverse condizioni meteorologiche.

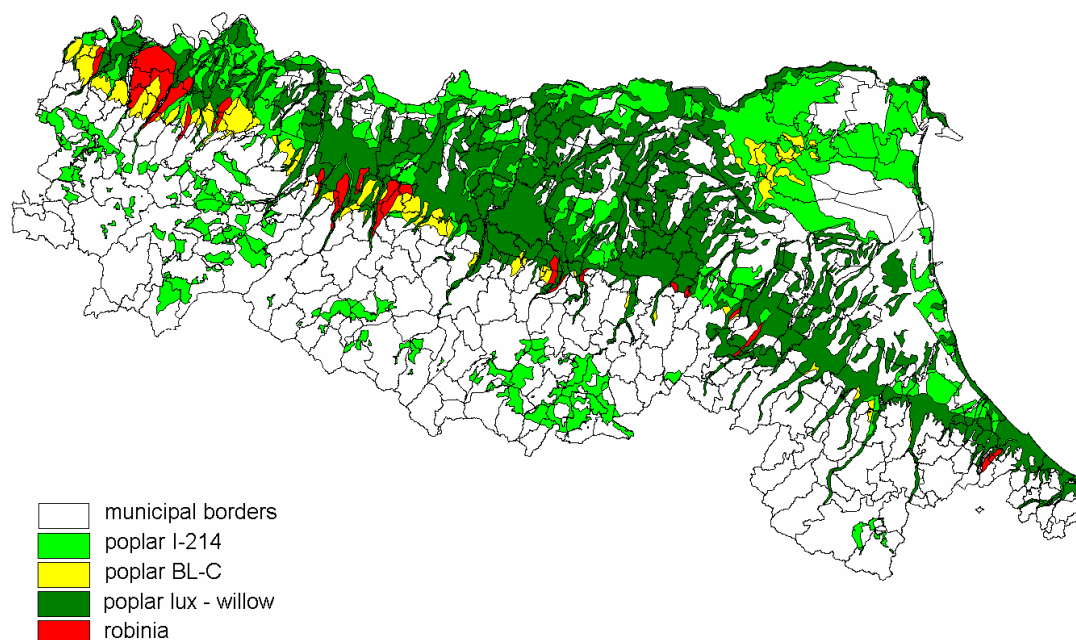


Figura 4.4: terreno potenzialmente adatto alla coltivazione dei cloni del pioppo I-214, BL Costanzo e Lux, salice e robinia; si noti che il clone Lux e il salice possono essere coltivati secondo le stesse esigenze sui medesimi suoli.

Tabella 4.6: potenzialità di mitigazione delle emissioni di GHG delle colture energetiche; le alternative per il pioppo di alti (HI) e bassi (LI) input colturali sono descritti in Figura 4.2 per le rese e Tabella 4.2 per le attività colturali.

	Poplar Lux		Poplar BL Costanzo		Poplar I-214		Robinia	Willow	Sorghum
	LI	HI	LI	HI	LI	HI			
Land devoted to each crop (ha)	6.006		762		4.269		298	0	18.299
CO ₂ from nat, gas displaced for electricity generation (t CO ₂ /ha/y)	5,59	8,12	4,55	7,15	4,55	6,69	5,17	6,46	15,21
CO ₂ from nat, gas displaced for heat generation (t CO ₂ /ha/y)	8,49	12,35	6,91	10,86	6,91	10,17	7,86	9,82	23,12

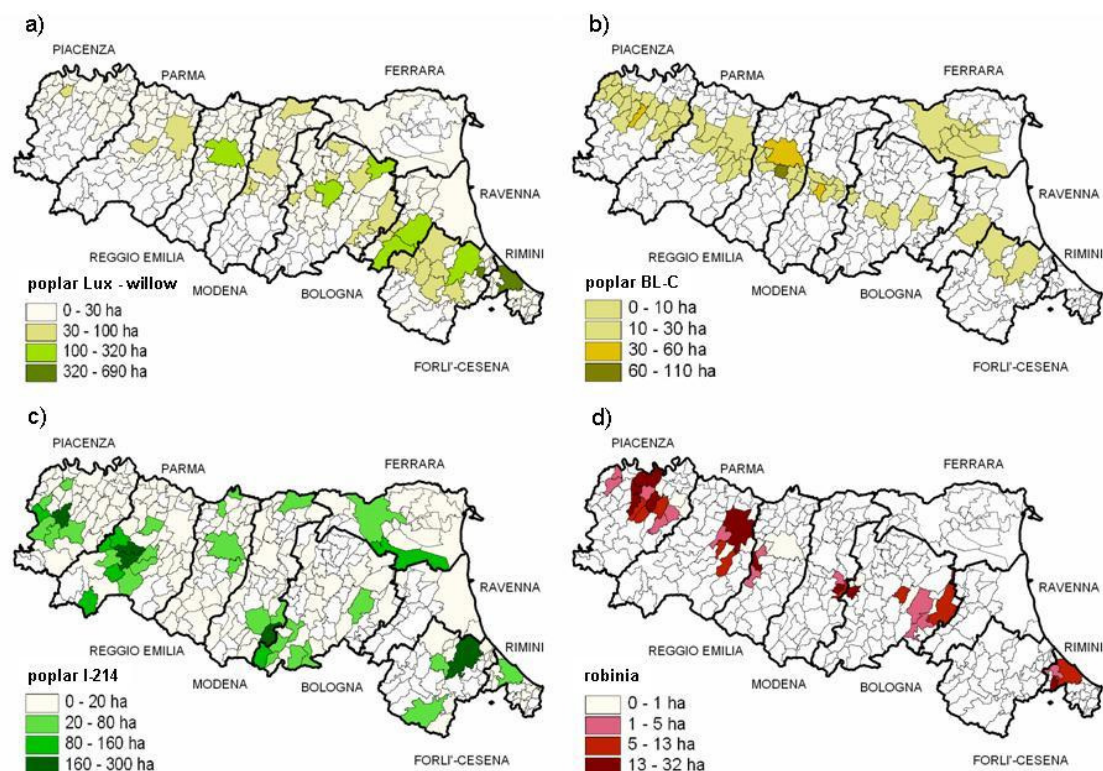


Figura 4.5: Terreno agricolo marginale per comune che può essere destinato alla coltivazione di specie arboree a seconda dell'area ottimale disponibile in ogni comune.

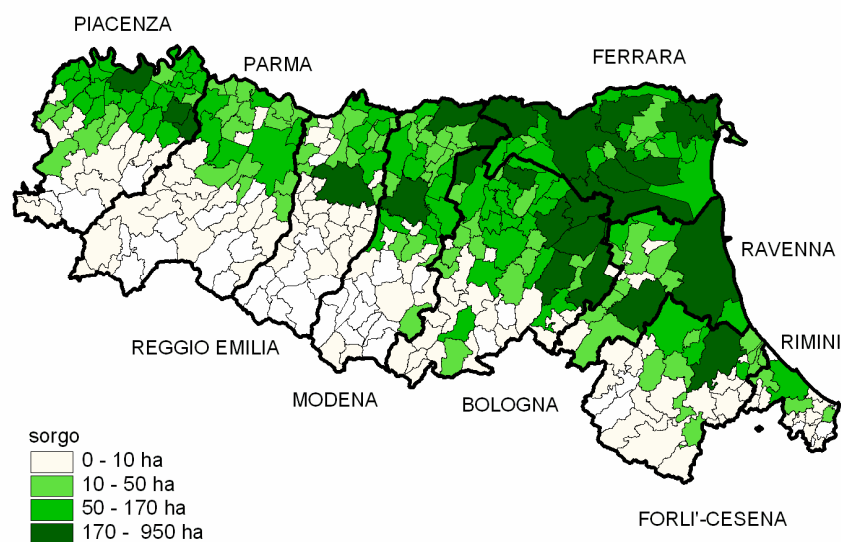


Figura 4.6: Terreno agricolo in set-aside per comune che può essere destinato alla coltivazione di specie sorgo a seconda dell'area ottimale disponibile in ogni comune.

4.6.2 Mitigazione dei CCG tramite le colture energetiche

Nello scenario di sviluppo delle colture per l'energia descritto in questo articolo, il potenziale di mitigazione dei gas serra è alto. Il piano di coltivazione nella prima riga

della Tabella 4.6 corrisponde a una riduzione netta annuale di CO_{2eq} pari a 1.065,1 kt CO_{2eq}/anno nello scenario HI o pari a 998,8 kt CO_{2eq}/anno nello scenario LI.

L'effettivo contributo delle SRF al bilancio energetico e di gas serra regionale dipende chiaramente dalla tecnologia adottata per la conversione finale in energia. Supponendo, ad esempio, che le colture energetiche forniscano biomassa ad impianti analoghi a quelli già installati in Italia che producono energia elettrica (con un rendimento del 25%), o calore (con l'80% di efficienza), si può calcolare la quantità di combustibili fossili e di emissioni di CO₂ evitate. Un confronto con equivalenti impianti di gas naturale con un fattore di emissione di 56,6 tonnellate CO₂/TJ (contro il 93 per il carbone e 74 per il petrolio greggio; Herold, 2003) e con un grado di efficienza del 38% per l'elettricità e dell'80% per la produzione di calore, che sono i valori medi del parco macchine italiano, produce i valori della seconda e la terza riga della Tabella 4.6. Questo significa che l'utilizzo estensivo delle biomasse può evitare tra le 336 (LI) e le 363 (HI) kt di CO₂/anno, che sarebbero altrimenti prodotte dalla tecnologia più pulita disponibile per produrre la stessa quantità di energia. Tale frazione è pari a 0,91-0,98% delle emissioni regionali di biossido di carbonio del 2003, che ammontavano a 7.053 kt (Regione Emilia-Romagna, 2007), ma sale al 4,04-4,35% se si considerano solo le emissioni dovute al settore dell'energia (8.331 kt di CO₂).

4.7 Discussione e conclusioni

In questo studio, abbiamo ipotizzato di dedicare alle colture energetiche solo terreno ottimale, dove ogni specie può trovare le caratteristiche agronomiche e fitoclimatiche che meglio si adattano alle proprie necessità. In queste circostanze, le colture energetiche daranno il loro massimo rendimento. Si tratta di un approccio conservativo che limita la quantità di biomassa che può essere coltivata nella regione studiata. Anche il terreno non ottimale può essere dedicato alle colture energetiche, ma darà rese in biomassa inferiori a quelli massimi. Invece di avere una assegnazione secca sì/no (1/0), il metodo potrebbe essere migliorato definendo una funzione di idoneità del terreno per assegnare un valore compreso tra uno (ottimale) e zero (non idoneo) alla produttività di ogni parcella di terreno con un dato insieme di caratteristiche.

Nel Piano di Sviluppo Rurale, il governo regionale dell'Emilia-Romagna ha previsto incentivi per promuovere la biodiversità nelle colture arboree pari a 4.800 €/ha. Tali incentivi sono forniti quando tre o più specie sono coltivate sulla stessa area. Anche se tre specie non garantiscono la tutela della biodiversità, questo è l'unico incentivo a disposizione per contrastare le monoculture. Il modello applicato in Emilia-Romagna suggerisce la coltivazione di diversi cloni del pioppo o di robinie, mentre il salice è stato escluso a causa della sua resa inferiore (Tabella 4.1). Il salice potrebbe quindi essere reintrodotto al fine di godere di questi incentivi. L'analisi di questa possibilità è un po' complessa in quanto si tratta di aggiungere al problema originale il vincolo di imporre che una quantità minima di terreno sia assegnata a ciascuna specie arborea in ogni parcella adatta. La soluzione di questo problema mostra che c'è da aspettarsi una perdita inferiore a 800 €/anno sull'intero ciclo della coltura a causa dei rendimenti complessivi più bassi che si ottengono sostituendo una sola specie con le tre specie. Questa perdita può essere considerata come il costo da sostenere per praticare una più diversificata agricoltura delle biomasse per l'energia, ma è ampiamente ripagata dal contributo regionale, e quindi, nel caso specifico, c'è una forte motivazione per adottare questo tipo di diversificazione.

Infine, va osservato che l'attuazione del piano proposto prevede un consistente investimento per la realizzazione di impianti di conversione (una stima approssimativa

risulta di circa 270 milioni di euro, vale a dire 0,3% del prodotto regionale lordo), ma anche la capacità gestire una rete di produzione di energia elettrica realmente distribuita, che attualmente sembra essere un compito molto difficile.

I risultati in termini di produzione di biomassa e di flussi di carbonio mostrano il grande potenziale delle colture bioenergetiche. Solo dedicando il 2% della superficie agricola regionale (attualmente terreni marginali abbandonati o messi a riposo), l'incremento della quota di energia rinnovabile nella regione Emilia-Romagna aumenterebbe, fornendo biomassa a, per esempio, 28-30 impianti di cogenerazione (capacità nominale 1,1 MWe e 12 MWt) o 9.700-10.500 caldaie domestiche.

La produzione lorda di energia da colture energetiche in Emilia-Romagna ammonta a 9.169-9.881 TJ/anno (rispettivamente per le alternative LI e HI); per confronto, la domanda regionale di energia nel 2003 ammontava a 57.3675 TJ. Considerando ad esempio di utilizzare tutte le biomasse in impianti di teleriscaldamento con efficienza di conversione media dell'80%, la produzione regionale di energia da biomasse può raggiungere i 7.327-7.913 TJ/anno (1,28-1,38% del consumo energetico regionale, ma circa un quarto del riscaldamento domestico).

Su tutta la regione Emilia-Romagna, le colture energetiche potrebbero contribuire a evitare una notevole quantità di emissioni di biossido di carbonio. Considerando solo le emissioni dal settore energetico, la percentuale di emissioni evitate può essere circa il 4% se è prodotta solo elettricità o più del 6% se tutte le biomasse vengono convertite in calore. Poiché è più probabile che la biomassa da colture energetiche sia utilizzata per produrre sia energia elettrica sia calore, le emissioni di anidride carbonica evitate saranno comprese tra queste cifre.

Le emissioni associate con la coltivazione e il trasporto di biomassa sono modeste, variando tra 0,7% per il sorgo e 1,8% dell'assorbimento per di I-214 e BL Costanzo LI, e quindi essi sono una piccola quota delle emissioni provocate dalla produzione della stessa quantità di energia mediante combustibili fossili.

I risultati positivi che si ottengono da questa analisi non trovano ancora riscontro nel panorama agricolo italiano. Nel 2003-2004 incentivi per terreni messi a riposo erano stati richiesti per 219.000 ettari di terreno a seminativi; di questi, solo 22.500 ettari sono stati coltivati con colture non alimentari in tutto il paese, mentre noi proponiamo la coltivazione di 29.634 ettari solo in Emilia-Romagna. Il principale ostacolo alla diffusione di colture energetiche è il loro elevato costo di "produzione"; gli incentivi sono necessari per guadagnare dalla produzione di biomassa, e gli incentivi sono giustificati anche grazie ai vantaggi ambientali dell'uso di biomasse per la produzione di energia. Recenti studi (www.externe.info) stimano intorno a 20 € il costo esterno di emissione di una tonnellata di CO_{2,eq}. Ciò significa che il piano di sfruttamento della biomassa ha un il valore aggiunto di 7 M€/anno per le emissioni evitate.

Un motivo di preoccupazione per il piano proposto può essere il rischio di perdite di biodiversità a causa delle monoculture. Sebbene, in generale, questo sia un problema ecologico molto importante, la quantità di terreno coinvolta in questo specifico progetto è molto limitata. Nella regione la superficie coltivata solo con grano è circa sei volte di più, e la tradizionale agricoltura alimentare è andata avanti nella maggior parte del territorio da secoli.

4.8 Bibliografia

Bazzani G.M., S. Di Pasquale, V. Gallerani, S. Morganti, M. Raggi, D. Viaggi, 2005. The sustainability of irrigated agricultural systems under the Water Framework Directive: first results. *Environmental Modelling & Software*, 20: 165-175.

- Bigon E., 2002. Il ruolo delle fasce boscate nell'immobilizzazione della CO₂ atmosferica. *AIAM News* 3:3-4.
- Bonari E., G. Picchi, M. Ginanni, A. Fraga, W. Guidi, 2004. Poplar short rotation coppice behaviour under different harvesting treatments. II Conferenza Mondiale ed Esposizione Tecnologica sulla Biomassa 10-14 maggio 2004, Roma.
- Clifton-Brown J., P.F. Stampel, M.B. Jones, 2004. Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions. *Global Change Biology* 10(4): 509-518.
- De la Rosa D., F. Mayol, E. Diaz-Pereira, M. Fernandez, D. de la Rosa, 2004. A land evaluation decision support system (MicroLEIS DSS) for agricultural soil protection: With special reference to the Mediterranean region. *Environmental Modelling & Software* 19(10): 929-942.
- De La Torre Ugarte D.G., M.E. Walsh, H. Shapouri, S.P. Slinsky, 2003. The Economic Impacts of Bioenergy Crop Production on U.S. Agriculture, U.S. Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses. Agricultural Economic Report No. 816. [online] URL: <http://beag.ag.utk.edu/default.html>.
- Di Virgilio N., A. Monti, G. Venturi, 2007. Spatial variability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) yield as related to soil parameters in a small field. *Field Crops Research* 101(2): 232-239.
- Drezner Z., H.W. Hamacher (Eds.), 2001. Facility Location: Applications and Theory. Springer Verlag, Berlin.
- Dubuisson X., I. Sintzoff, 1998. Energy and CO₂ balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice. *Biomass and Bioenergy* 15: 379-390.
- EEA, 2007. Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2005 and inventory report 2007. Technical report No 7/2007. [online] URL: http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2007_7/en.
- Ercoli L., M. Mariotti, A. Masoni, E. Bonari, 1999. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of Miscanthus. *Field Crops Research* 63(1): 3-11.
- EurObserv'ER, 2006. Solid biomass barometer, Paris. [online] URL: http://ec.europa.eu/energy/res/publications/barometers_en.htm
- Facciotto G., M. Chiò, G. Negro, S. Bellan, T. Zenone, 2005. Valutazione della produttività di pioppi e salici in piantagioni a turno breve. *RiservItalia*, Area 2: Produzioni di legno fuori foresta.
- Facciotto G., S. Vergante, C. Lioia, L. Rosso, G. Muggini, T. Zenone, G. Nervo, 2006. Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve. *Forest@* 3(2): 238-252. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.
- Fischer G., S. Prieler, H. van Velthuisen, 2005. Biomass potentials of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia. *Biomass & Bioenergy* 28(2): 119-132.
- Goor F., J.M. Jossart, J.F. Ledent, 2000. ECOP: an economic model to assess the willow short rotation coppice global profitability in a case of small scale gasification pathway in Belgium. *Environmental Modelling and Software* 15(3): 279-292.
- Heaton E., T. Voigt, S.P. Long, 2004. A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water. *Biomass & Bioenergy* 27(1): 21-30.
- Heller M.C., G.A. Keoleian, T.A. Volk, 2003. Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. *Biomass & Bioenergy* 25(2): 147-165.
- Herold A., 2003. Comparison of CO₂ emission factors for fuels used in Greenhouse Gas inventories and consequences for monitoring and reporting under the EC emissions trading scheme. ETC/ACC Technical Paper 2003/10. [Online] URL: http://air-climate.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TechPaper_2003_10_CO2_EF_fuels.pdf
- IEA, 2005. Bioenergy, Benefits of Bioenergy, Report 01/2005, Rotorua, New Zealand, 2005. [online] URL: <http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=179>

- Istat, 2000. V Censimento Generale dell'Agricoltura, Roma, 2001. [online] URL: <http://www.istat.it/censimenti/agricoltura/>
- Karačić A., M. Weih, 2006. Variation in growth and resource utilisation among eight poplar clones grown under different irrigation and fertilisation regimes in Sweden. *Biomass & Bioenergy* 30(2): 115–124.
- Mitchell, C.P., Stevens, E.A., Watters, M.P., 1999. Short-rotation forestry - operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *Forest Ecology and Management* 121 (1) 123-136.
- Phyllis Database, 2007. PHYLLIS - the composition of biomass and waste, Energy research Centre of the Netherlands. [online] URL: <http://www.ecn.nl/phyllis/>, last visited August 2007.
- Regione Emilia-Romagna, 2007. Piano energetico regionale, Bologna.
- Righelato R., D.V. Spracklen, 2007. Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests? *Science* 317(5840): 902.
- Schneider, L.C., Kinzig, A.P., Larson, E.D., Solórzano, L.A., 2001. Method for spatially explicit calculations of potential biomass yields and assessment of land availability for biomass energy production in Northeastern Brazil, Agriculture. *Ecosystems and Environment* 84 (3) 207-226.
- Sims, R.E.H., Hastings, A., Schlamadinger, B., Taylor, G., Smith, P., 2006. Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biology* 12 (11) 2054-2076.
- The Economist, 2007. Agricultural commodities: Biofuelled. *The Economist*, June 23rd.
- Tianhong, L., Yanxin, S., An, X., 2003. Integration of large scale fertilizing models with GIS using minimum unit, *Environmental Modelling & Software*, 18, 221–229
- Tilman, D., Hill, J., Lehman, C., 2006. Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science* 314 (5805) 1598-1600.
- Venturi, P., Gigler, J.K., Huisman, W., 1999. Economical and technical comparison between herbaceous and woody energy. *Renewable Energy* 16 (1) 1023-1026.
- Volk, T.A., Abrahamson, L.P., Nowak, C.A., Smart, L.B., Tharakan, P.J., White, E.H., 2006. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. *Biomass and Bioenergy* 30 (8-9) 715-727.
- Wise, R., Cacho, O., Hean, R., 2007. Fertilizer effects on the sustainability and profitability of agroforestry in the presence of carbon payments. *Environmental Modelling & Software* 22 (9) 1372-1381.
- Zenone T., 2005. comunicazione personale.

5 Biomasse residuali

In questo capitolo è presentato un metodo per la stima della disponibilità delle biomasse residuali che comprendono i sottoprodotti di altre lavorazioni principali (sottoprodotti agricoli e forestali, residui della lavorazione del legno) e che sono attualmente sia recuperabili in modo ecologicamente sostenibile sia utilizzabile in impianti di conversione in energia tramite processi di combustione. La stima delle biomasse residuali è un'importante operazione alla base della pianificazione energetica dell'utilizzo della risorsa stessa. È infatti importante comprendere quali siano le potenzialità delle biomasse per l'energia e se queste possano significativamente incidere sul bilancio energetico di un territorio in modo economicamente sostenibile e rinnovabile nel tempo (poiché le biomasse devono essere usate ad un tasso di utilizzo inferiore al tasso di rinnovamento). Infine, lo studio della disponibilità è condotto a scala il più possibile locale per avere un quadro complessivo della distribuzione su un territorio regionale, nello specifico la regione Emilia-Romagna, delle biomasse sul territorio. Anche questa informazione è importante per le successive fasi di un piano energetico dell'utilizzo delle biomasse poiché permette di identificare aree con maggiore o minore vocazione alla costruzione di impianto. La stima delle biomasse residuali è quindi condotta a scala comunale, visto che a questo livello si trova il giusto compromesso tra dettaglio delle informazioni e uniformità dei dati su un ampio territorio quale la regione Emilia-Romagna.

5.1 *I sottoprodotti agricoli*

Il settore agro-alimentare costituisce uno dei comparti produttivi a cui sono attribuibili le più elevate produzioni di rifiuti speciali. Per la quantificazione di questi residui non è però possibile avvalersi dei MUD, moduli previsti per legge per la dichiarazione dei rifiuti prodotti da attività industriali o artigianali, che non sono richiesti nel caso di attività agricole. L'unico strumento efficace è rappresentato da studi specifici di settore che consentono di determinare le produzioni di rifiuti per unità di prodotto reso.

Stimare la disponibilità dei residui agricoli è un'operazione complessa soprattutto a causa delle differenze in resa, tipologia e umidità tra le diverse colture. Per avere a disposizione dati e parametri il più possibile attendibili e relativi ad una particolare area geografica, si dovrebbe eseguire un lavoro di raccolta di dati sulla quantità dei residui derivanti da colture e dall'area in esame. I valori che caratterizzano una coltura dipendono, infatti, strettamente da fattori come le condizioni climatiche della zona, la fertilità del terreno, il sistema produttivo e la tecnologia utilizzata. Fornire parametri di questo tipo, non è però lo scopo principale di questo lavoro che mira, invece, a stimare la disponibilità di biomassa sul territorio indagato. Si è fatto quindi riferimento a studi di settore e a ricerche che propongono un metodo per la stima dei residui per quantità di prodotto principale.

Potenzialmente, la quantità di energia ricavata dai sottoprodotti agricoli può essere considerevole anche se bisogna tenere conto degli usi alternativi e della localizzazione dispersa sul territorio, che comporta una raccolta capillare e il trasporto agli impianti di utilizzo. Inoltre, al momento del raccolto i residui hanno un elevato contenuto in

umidità: se non si può provvedere alla loro essiccazione sul posto, non solo si trasporta il residuo, ma anche l'acqua in esso contenuta (Klass, 1998).

Le biomasse provenienti dal settore agricolo considerate sono quelle derivanti dalle colture estensive maggiormente diffuse sul territorio: il frumento tenero e il frumento duro, il granoturco, la soia, l'orzo e la vite. I residui di queste colture sono costituiti da: paglia, da frumento e orzo; stocchi e tutoli, dal granoturco; steli e foglie della soia; prodotti derivanti dalla potatura della vite e i sarmenti. In Tabella 5.1 sono riportati alcuni dei parametri utilizzati in letteratura per la stima della quantità di residui rispetto alla produzione principale.

La quantità di residui dipende fortemente dalle pratiche agricole, dai macchinari utilizzati e dalle rese di un dato luogo. Chiaramente, il rapporto tra residuo a grano (o l'inverso, l'indice di raccolta) varia negli anni a seconda delle colture, del periodo di raccolta, della varietà e della densità di semina. L'indice di raccolta in genere aumenta all'aumentare della resa totale e al diminuire dei fattori di stress (Prihar e Stewart, 1990). In alcune prove sperimentali, l'indice di raccolta è leggermente diminuito per le rese maggiori, anche se in campi con densità di semina elevate (Doberman *et al.*, 2003; Perlack *et al.*, 2005).

Tabella 5.1: Parametri per la stima della quantità di residuo rispetto alla quantità di prodotto principale delle colture agricole.

	Residuo ton residuo/ton prodotto principale
Mais	1 ^{a, b, c, d}
Cereali	1,3 ^{a, b}
Frumento invernale	1,7 ^{c, d}
Frumento estivo	1,3 ^{c, d}
Orzo	0,7 ^d - 1 ^c
Avena	1,4 ^c - 2,1 ^d
Soia	1,5 ^d

^a Ericsson *et al.*, 2006; ^b Hall *et al.*, 1993; ^c Larson, 2006; ^d Perlack *et al.*, 2005

I residui agricoli svolgono un ruolo di protezione del suolo dall'erosione, aumento e mantenimento della sostanza organica nel suolo, aumento di nutrienti, aumento dell'attività biologica e miglioramento della struttura del suolo, aumento delle rese agricole. La quantità di residui che si può rimuovere sostenibilmente varia con le caratteristiche del suolo, le condizioni climatiche, la topografia, le pratiche agricole e l'uso passato del suolo. In genere le politiche mirate alla conservazione dei suoli considerano la percentuale di suolo che dovrebbe rimanere coperto, dando quindi una indicazione circa la quantità di residui che si può rimuovere. Una rimozione dei residui del 30% non corrisponde, però, ad una copertura del suolo del 70%: i due valori sono legati secondo una relazione come quella di Figura 5.1, che dipende dalla qualità dei residui agricoli, dal clima, dal suolo, dalle pratiche agricole (ad es., l'applicazione di fertilizzanti) (Andrews, 2006). La curva mostrata è particolare della coltura, un campo non irrigato coltivato a grano e legumi annuali negli USA, ma l'andamento esponenziale può essere generalizzato. In Tabella 5.2 sono riportati alcune indicazioni tratte dalla letteratura scientifica sulla percentuale di residui che può essere rimossa dal suolo. Numerosi studi indicano che circa il 25% di tutti i residui agricoli possa essere raccolta e utilizzata a fini energetici (Swisher e Wilson, 1993; Williams, 1995; Yamamoto *et al.*, 1999).

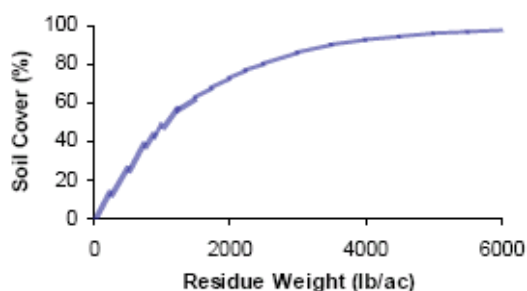


Figura 5.1: Relazione tra la percentuale di copertura del suolo e la quantità di residui agricoli raccolti nel caso di un campo non irrigato coltivato a grano e legumi annuali negli USA (Andrews, 2006).

Tabella 5.2: Categorie di residui delle colture tradizionali e loro attuale utilizzo (Itabia, 2003).

	% Rimozione	Autore	Note
Mais	20-60%	Glassner <i>et al.</i> , 1999	
	58%	Wyman e Hinman, 1990	
	35-40%	Kadam e McMillan, 2003	Till
	68-75%	Kadam e McMillan, 2003	No-till
	76-82%	Glassner <i>et al.</i> , 1998	No-till
Cereali	25%	Yamamoto <i>et al.</i> , 1999;	1,3 t/t-cereali
		Ericsson e Nilsson, 2006	1 t/t-mais
Residui	25%	Swisher e Wilson, 1993; Williams, 1995;	

Per stimare i residui agricoli disponibili per utilizzi energetici, verrà considerata solo quella percentuale attualmente non utilizzata, escludendo quindi la parte già utilizzata negli allevamenti zootecnici o interrata. Si stima che la frazione di sottoprodotti attualmente destinata a vari utilizzi (lettieria, alimentazione animale o combustione) sia pari a circa il 36% delle colture erbacee e al 32% di quelle arboree; in generale, la quota restante è incorporata al terreno (Anpa e Onr, 2001). La paglia di cereali, di cui vi è ampia disponibilità sul territorio nazionale, è destinata per circa il 40-45%, ad usi zootecnici e costituisce la lettiera per i bovini con formazione di letame da utilizzare maturo come ammendante nei terreni agricoli (Tabella 5.3; Itabia, 2003). Una quota marginale di paglia è reinterrata, in quanto fonte di sostanza organica per il suolo agrario; va però ricordato che l'elevato rapporto C/N della paglia altera l'equilibrio del terreno e rende necessario l'apporto di concimi azotati che, viceversa, sono di origine chimica. In sostanza si tratta di una pratica valida, ma non in senso assoluto, e va valutata con attenzione in funzione delle specifiche esigenze dei suoli (Itabia, 2003; CRPV, comunic. personale, 2007). La parte di residui agricoli rimanente è spesso distrutta in campo a mezzo fuoco (pratica in alcune regioni vietata) con l'effetto di sterilizzare la parte superficiale del terreno e lasciare comunque sul terreno la cenere che, però, viene in buona parte dispersa dagli agenti meteorici. Anche i residui delle patate devono essere smaltite e comportano problematiche analoghe a quelle delle paglie. In Ericsson e Nilsson (2006) è ipotizzato che il 25% dei residui agricoli possa essere raccolto e che, della parte raccolta, un terzo sia utilizzato per le lettiere negli allevamenti zootecnici.

Tabella 5.3: Categorie di residui delle colture tradizionali e loro attuale utilizzo (Italia, 2003).

Coltura	Residuo	Utilizzo	% di utilizzo
Frumento tenero E duro	Paglia	• Lettieria per il ricovero degli animali	40-50%
		• Alimentazione animale	5-10%
		• Industria cartaria e varie	5-10%
		• Bruciata in campo	30-40%
Orzo	Paglia	• Lettieria per il ricovero degli animali	40-50%
		• Bruciata in campo	50-60%
Avena	Paglia	• Lettieria per il ricovero degli animali	40-60%
		• Alimentazione animale	40-60%
Riso	Paglia	• Lettieria per il ricovero degli animali	20-30%
		• Bruciata in campo	70-80%
Mais da granella	Stocchi (steli)	• Lettieria per il ricovero degli animali	40-50%
	Tutoli (assi delle spighe)	(stocchi)	
		• Alimentazione animale (stocchi)	10-20%
Vite (da uva E da tavola)	Sarmenti (rami)	• Interramento (tutoli)	70-80%
		• Interramento	30-40%
		• Bruciati a bordo campo	30-40%
		• Fascine da ardere	20-40%
Olivo	Legna, rami, frasche	• Energia (legna)	90-100%
		• Bruciati a bordo campo (legna)	90-100%
Fruttiferi (melo, pero,...)	Rami	• Interrati (solo in pianura)	90-100%
		• Bruciati	
Agrumi, fruttiferi a guscio	Rami	• Bruciati	90-100%

Per i motivi esposti, si è deciso di considerare per la stima dei residui dei parametri in qualche modo tarati sul territorio ambito di studio. In particolare, in Italia è disponibile uno studio di settore realizzato congiuntamente da Anpa e Onr (2001) sui rifiuti del comparto agroalimentare, che riporta proprio delle statistiche sulle quantità di residui agricoli; i parametri sono riportati in Tabella 5.4. La relazione utilizzata per calcolare la biomassa annua di ogni coltura disponibile in ogni comune è la seguente:

$$Biomassa_i = Sup.Coltivata \cdot Resa \cdot \frac{SPI}{100} \cdot \left(1 - \frac{UTSI}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{USI}{100}\right)$$

Dove, per ogni coltura:

Biomassa (ton ss) rappresenta le tonnellate di sostanza secca utilizzabili dell'*i*-esima coltura

(con *i* = frumento tenero, frumento duro, granoturco, soia e orzo),

Sup.Coltivata (ha) sono gli ettari coltivabili,

Resa (ton tq/ha) è la produttività della coltura,

SPI (%) è la percentuale di sottoprodotto principale rispetto al totale raccolto,

UTSI (%) è la frazione di scarto che viene attualmente utilizzata,

USI (%) è l'umidità media al recupero dello scarto principale.

Per la vite, a causa delle particolari modalità di coltivazione (intensità e periodicità della potatura), la relazione che lega la quantità di sarmenti (sottoprodotto principale) in ton tq alla resa è di tipo lineare:

$$Quantità\ Sarmenti = (0,113 \cdot Resa\ Uva + 2,000) \cdot Sup.Coltivata$$

Per calcolare quindi la biomassa (ton ss) della vite si utilizza la relazione:

$$Biomassa_{vite} = Quantità\ Sarmeni \cdot \left(1 - \frac{UTS1}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{US1}{100}\right)$$

A questa quantità, si deve poi sommare la quantità di scarti secondari derivanti dalla massa dendrometrica disponibile al termine del ciclo produttivo:

$$BiomassaSec_{vite} = Sup.Coltivata \cdot \frac{SP2}{FS2} \cdot \left(1 - \frac{UTS2}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{US2}{100}\right)$$

dove:

SP2 (ton tq/ha) è lo scarto secondario disponibile alla fine del ciclo produttivo,

FS2 (anni) rappresenta la durata media dell'impianto arboreo,

UTS2 (%) è la frazione di scarto secondario che viene attualmente utilizzata,

US2 (%) è l'umidità media al recupero dello scarto secondario.

In Tabella 5.4 sono riportati, per ogni coltura, i parametri utilizzati: la percentuale di sottoprodotti primari sul totale del prodotto, l'umidità e la percentuale di sostanza secca già in utilizzo (Anpa e Onr, 2001).

Tabella 5.4: Parametri utilizzati per la stima della biomassa proveniente dai residui agro-alimentari (Anpa e Onr, 2001).

Coltura	SP1 ^a [%]	U ^b [%]	SSU ^c [%]
Frumento tenero	61	15	90
Frumento duro	70	15	90
Granoturco	130	55	50
Orzo	80	15	90
Barbabietola da zucchero	40	80	15
Soia	150	52	5
Vite	(0,113·resa+2)	50	5

^a Percentuale di Sottoprodotto Primario; ^b Umidità; ^c Percentuale di Sostanza Secca già utilizzata per scopi non energetici

5.2 I sottoprodotti forestali

La superficie forestale nazionale è pari a 10.467.533 ha, cifra che corrisponde a circa il 34,7% della superficie territoriale (Tabella 5.5; IFN, 2007). Il bosco rappresenta l'83,7% della superficie forestale complessiva, le altre terre boscate (arbusteti, macchia e arbusteti mediterranei) il 16,3%. I distretti territoriali con la maggiore percentuale di superficie forestale sono Alto Adige, Trentino, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Toscana, Umbria, Abruzzo, Calabria e Sardegna. Le categorie forestali più diffuse a livello nazionale sono i querceti di rovere, roverella e farnia, le faggete e i boschi di cerro, farnetto, fragno e vallonea, che superano ciascuna il milione di ettari.

Tabella 5.5: Estensione delle macrocategorie inventariali Bosco e Altre terre boscate, secondo FRA2000 (IFN, 2007)

Distretto territoriale	Bosco		Altre terre boscate		Superficie forestale totale		Superficie territoriale
	Superficie (ha)	ES (%)	Superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	Superficie (ha)
Piemonte	870.594	1,1	69.522	7,2	940.116	1	2.539.983
Valle d'Aosta	98.439	3,1	7.489	21,4	105.928	2,7	326.322
Lombardia	606.045	1,4	59.657	8,2	665.703	1,2	2.386.285
Alto Adige	336.689	1,6	35.485	9,9	372.174	1,3	739.997
Trentino	375.402	1,4	32.129	10,3	407.531	1,1	620.690
Veneto	397.889	1,7	48.967	8,3	446.856	1,4	1.839.122
Friuli VG	323.832	1,7	33.392	9,9	357.224	1,3	785.648
Liguria	339.107	1,5	36.027	9,5	375.134	1,1	542.024
Emilia-Romagna	563.263	1,4	45.555	8,5	608.818	1,2	2.212.309
Toscana	1.015.728	1	135.811	4,9	1.151.539	0,7	2.299.018
Umbria	371.574	1,4	18.681	13,4	390.255	1,2	845.604
Marche	291.394	1,8	16.682	12,8	308.076	1,6	969.406
Lazio	543.884	1,4	61.974	7,3	605.859	1,2	1.720.768
Abruzzo	391.492	1,5	47.099	7,6	438.590	1,3	1.079.512
Molise	132.562	2,9	16.079	14,2	148.641	2,3	443.765
Campania	384.395	1,9	60.879	7,3	445.274	1,5	1.359.025
Puglia	145.889	3,4	33.151	10	179.040	2,6	1.936.580
Basilicata	263.098	2,4	93.329	5,6	356.426	1,5	999.461
Calabria	468.151	1,8	144.781	4,6	612.931	1,1	1.508.055
Sicilia	256.303	2,7	81.868	6,2	338.171	1,9	2.570.282
Sardegna	583.472	2	629.778	1,8	1.213.250	0,8	2.408.989
Italia	8.759.200	0,4	1.708.333	1,3	10.467.533	0,3	30.132.845

Il volume complessivo dei prelievi legnosi del 2003, in bosco e fuori foresta, è stato di 8,8 milioni di metri cubi (i prelievi degli ultimi anni sono elencati in Tabella 5.6). Il 63% (nel 2000 era il 59%) delle utilizzazioni forestali è destinato ad usi energetici (legna da ardere) ed il 37% (41% nel 2000) come legname da lavoro (Tabella 5.7).

Tabella 5.6: volume complessivo dei prelievi legnosi, in bosco e fuori foresta (ISTAT, 2002, 2003, 2004, 2005).

	Patrimonio boschivo milioni di ettari	Volume milioni di metri cubi
2003	6.856	8,800
2002	6.856	8,058
2000	6,854	9,242
1999	6,166	9,909

Nel 1997, le produzioni forestali rappresentavano quasi i due terzi del totale delle biomasse energetiche prodotte in Italia e provenivano per la maggior parte da boschi cedui (Bernetti, 1998). In base agli ultimi dati ISTAT (1997), la produzione annua dei cedui del nostro Paese ammonta a circa 4,5 milioni di metri cubi, pari ad un potere energetico di 1,2 milioni di tonnellate di petrolio. Confrontando gli incrementi di massa cormometrica (massa legnosa commerciabile come legna da ardere), rilevati dall'Inventario Forestale Nazionale (del 1984-85), con il tasso di utilizzazione per ettaro (Tabella 5.8), è inoltre possibile notare come i boschi cedui italiani siano stati tendenzialmente sottoutilizzati.

Il confronto tra questi dati non è del tutto corretto in quanto riferito ad anni diversi (1994 nel Istat e 1984-85 Inventario forestale). Il problema è che i dati sugli accrescimenti dei boschi nazionali sono rari. Gli incrementi medi dei soprassuoli forestali derivano almeno in parte da fattori (forma di governo, clima, fertilità stagionale) piuttosto stabili nel tempo (Bernetti, 1998). Il recente Inventario nazionale forestale (2007) riporta gli incrementi medi per anno. Secondo l'IFN il tasso di utilizzazione sulla superficie boscata è di circa 1 m³/ha/anno mentre l'accrescimento risulta, sempre secondo l'inventario, di oltre 3 m³/ha/anno. L'accrescimento della massa legnosa non è sempre un dato positivo: spesso è il risultato di un abbandono del bosco che sarà destinato, senza una corretta gestione, ad essere sempre più fragile. Molte superfici forestali, sia pubbliche che private, non vengono più utilizzate, ed il soprassuolo è a volte fortemente degradato, come nel caso dei boschi cedui.

Tabella 5.7: Utilizzazioni legnose per assortimento e specie legnosa - Anno 2003 (ISTAT, 2005).

SPECIE LEGNOSE	Legname da lavoro metri cubi		Legna per combustibili metri cubi		Totale metri cubi
Abeti	850.391	78%	241.191	22%	1.091.582
Larice	86.290	70%	36.988	30%	123.278
Pini	328.724	84%	61.296	16%	390.020
Altre conifere	43.222	24%	137.558	76%	180.780
Totale conifere	1.308.627	73%	477.033	27%	1.785.660
Querce	31.871	1%	2.664.740	99%	2.696.611
Castagno	624.616	61%	397.517	39%	1.022.133
Faggio	87.477	15%	496.996	85%	584.473
Pioppi	1.013.674	97%	26.481	3%	1.040.155
Altre latifoglie	165.533	10%	1.518.029	90%	1.683.562
Totale latifoglie	1.923.171	27%	5.103.763	73%	7.026.934
TOTALE	3.231.798	37%	5.580.796	63%	8.812.594

Tabella 5.8: Caratteristiche dei boschi cedui nazionali - Anno 1997 (Bernetti, 1998).

Regioni	Superfici ha	Utilizzazioni 1994 mc	Tep	Prelievo 1994 mc/ha	Incremento (IFN) mc/ha/anno
Piemonte	459.748	211.749	56.113	0,46	6,14
Valle d'Aosta	10.298	1.789	474	0,17	2,88
Lombardia	315.214	471.030	124.823	1,49	5,35
Trentino Alto Adige	93.860	79.449	21.054	0,85	4,52
Veneto	137.147	143.133	37.930	1,04	4,96
Friuli-Venezia Giulia	64.084	68.360	18.115	1,07	5,37
Liguria	215.679	66.835	17.711	0,31	4,79
Emilia-Romagna	310.811	222.683	59.011	0,72	4,47
Toscana	599.319	1.025.516	271.762	1,71	4,52
Umbria	240.896	301.520	79.903	1,25	4,10
Marche	132.532	225.269	59.696	1,70	-
Lazio	266.131	698.013	184.973	2,62	4,36
Abruzzo	122.751	80.066	21.217	0,65	3,14
Molise	50.036	109.021	28.891	2,18	4,81
Campania	181.856	394.395	104.515	2,17	5,53
Puglia	50.080	69.004	18.286	1,38	3,46
Basilicata	56.542	62.222	16.489	1,10	4,05
Calabria	172.119	220.996	58.564	1,28	4,23
Sicilia	76.944	27.123	7.188	0,35	4,96
Sardegna	188.020	73.805	19.558	0,39	3,33
Totale	3.744.067	4.551.978	1.206.274	-	-

L'incremento del tasso di utilizzazione dei boschi cedui ha degli effetti ambientali sociali ed economici. I boschi cedui forniscono prodotti legnosi utilizzabili per diversi impieghi (legna da ardere, biomasse in impianti di varia scala, produzione di pannelli, ecc.) e servizi sociali (ricreazione all'aperto, protezione del suolo, effetti scenici, purificazione dell'aria). Aumentare il tasso di utilizzazione potrebbe portare all'innescarsi di conflitti tra i diversi portatori di interessi. A complicare la situazione, la proprietà forestale in Italia è estremamente frammentata e principalmente di natura privata, aumentando la difficoltà nel realizzare politiche gestionali efficienti.

In un quadro così complesso, si è scelto di limitare l'analisi ad una tematica ben definita, con lo scopo di fornire una metodologia in grado di dare al decisore pubblico un quadro informativo sufficientemente dettagliato e aderente alla realtà per poter valutare il prelievo potenziale massimo sostenibile nel tempo dall'ecosistema forestale senza compromettere la sua stabilità e la sicurezza della rigenerazione.

Un modello generale per la stima della biomassa forestale dovrebbe avere in ingresso la superficie totale con un determinato soprassuolo, il tasso di prelievo per unità di superficie per ogni soprassuolo, la frazione del prelievo da destinare alle biomasse per energia. un approccio simile è stato usato per stimare la biomassa forestale da utilizzare a scopi energetici per determinati livelli di costo di raccolta (Bernetti, 1998). In altri esempi della letteratura, i sottoprodotti forestali ottenuti dalle operazioni di diradamento e dall'abbattimento di alberi sono ricavati applicando dei tassi di rimozione che variano tra 0,15 e 0,30 tonnellate di residui per tonnellata di biomassa in piedi per le conifere e 0,1-0,2 per le specie decidue (Ericsson e Nilsson, 2006).

La crescita di un bosco può essere rappresentata da una curva di tipo logistico in cui il tasso di crescita aumenta con il passare del tempo fino a raggiungere un massimo e quindi a diminuire, a mano a mano che lo stock di biomassa diventa più grande (in figura è rappresentata la crescita della risorsa $\dot{x}$ in funzione dello stock x di biomassa). Ad ogni livello *stock* corrisponde quindi un determinato prelievo sostenibile S uguale al tasso di crescita, tale che dopo il prelievo la risorsa si rinnoverà da sola in modo da poter ottenere di nuovo S dallo *stock*. Per la regione Toscana, l'individuazione dei modelli di crescita si è basata sulle informazioni derivanti dall'Inventario Forestale Toscano integrate con altre fonti dendroauxometriche (Castellani *et al.* 1982; Bernetti, 1998).

La possibilità di raccogliere le utilizzazioni forestali dipende anche dalla natura del suolo (pendenza, accessibilità) e non solo dalla tipologia forestale e dal tasso di crescita che, peraltro, dipende anche dalle forme di governo del suolo (ceduo semplice, ceduo composto, fustaia). La stima delle biomasse forestali, come schematicamente riassunto in Figura 5.2, è quindi svolta sulla base delle seguenti informazioni: i tipi forestali presenti e la loro estensione, la forma di governo (ceduo semplice, ceduo composto, fustaia), l'accessibilità (strade di accesso, ma anche pendenza per l'utilizzo dei macchinari).

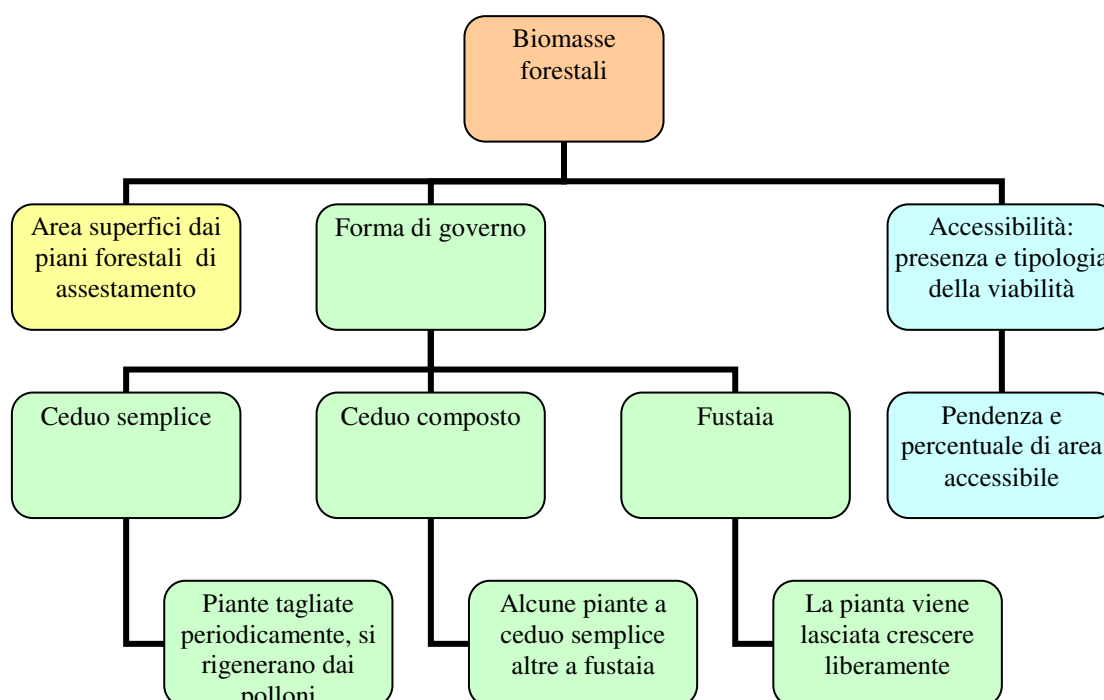


Figura 5.2: informazioni necessarie per la stima delle biomasse forestali.

La pendenza è considerata uno dei fattori morfologici che maggiormente condiziona la possibilità di entrare in un bosco e raccogliere biomasse forestali. Sono state quindi identificate sei classi di pendenza, suddivise come in Tabella 5.9. Considerando per ora le sole variabili morfologiche o logistiche, l'accessibilità alle aree forestali dipende strettamente dallo sviluppo della rete stradale (sia strade provinciali e statali sia strade apposite per l'accesso ai boschi). A seconda della pendenza e dello sviluppo del reticolo stradale è possibile ricavare l'accessibilità delle aree forestali, ovvero la facilità con cui le operazioni di taglio possono essere eseguite (Regione Piemonte, 2002). Si consideri infatti che, in presenza di strada, ci si può inoltrare nel bosco tanto più quanto meno pendente è l'area, a parità di tempo (e quindi costi). Alcuni valori di riferimento per l'accessibilità sono riportati in Tabella 5.10.

Tabella 5.9: classificazione della pendenza (Regione Piemonte, 2002).

Pendenza	Classe
0-20% (terreni pianeggianti)	I
21-40% (terreni inclinati)	II
41-60% (terreni ripidi)	III
61-80% (terreni molto ripidi)	IV
81-100% (terreni scoscesi)	V
Oltre 100%	VI

Tabella 5.10: Distanze per accessibilità buona e scarsa in funzione della classe di pendenza (Regione Piemonte, 2002).

Classe di pendenza	Distanza orizzontale accessibilità BUONA	Distanza orizzontale accessibilità SCARSA
I	500-1000 m	2000-4000 m
II	250-500 m	1000-2000 m
III	150-250 m	650-1000 m
IV-V	< 150 m	< 650 m

Bisogna infine considerare qual è la forma di governo del bosco (ovvero la pratica adottata per la rinnovazione – rigenerazione o riproduzione – di un bosco). Le forme di governo boschivo sono (Istat, 2006):

- Fustaia: superficie a bosco le cui piante sono destinate ad essere allevate ad alto fusto ed a rinnovarsi prevalentemente per via naturale (seme) o artificiale (talee). Rispetto alle specie legnose, le fustaie vengono distinte in: fustaie di conifere (o resinose), fustaie di latifoglie e miste. Le piante sono costituite da un unico tronco, che viene lasciato crescere liberamente fino al momento dell'utilizzazione; dopo l'abbattimento la fustaia si rinnova per via naturale, allevando le piantine nate dalla disseminazione spontanea, oppure artificialmente con una nuova piantagione.
- Ceduo semplice: superficie forestale le cui piante, nate esclusivamente o prevalentemente da gemma, sono destinate a rinnovarsi per via naturale e agamica (gemma). Riguarda esclusivamente le latifoglie; quando le piante hanno raggiunto un certo sviluppo vengono tagliate periodicamente e il bosco si rinnova mediante l'emissione di polloni in corrispondenza dei tagli fatti; la rinnovazione avviene quindi per gemma fino ad esaurimento del ceduo, dopo di che si procede al reimpianto per via artificiale.
- Ceduo composto: superficie a bosco costituito da fustaia e ceduo semplice frammisti. Insieme alle piante allevate a ceduo, si lasciano crescere anche piante d'alto fusto in numero di qualche centinaio per ettaro. Se il numero di piante d'alto fusto è invece limitato a qualche decina per ettaro, con la sola funzione di ottenere la ricostituzione naturale del bosco mediante disseminazione spontanea, si parla di "ceduo matricinato" e matricine sono dette le piante d'alto fusto servono per la disseminazione.

Da quanto detto, è evidente che stimare le biomasse che si possono ricavare dal comparto forestale è un'operazione abbastanza delicata e dipende fortemente dalla tipologia e qualità dei dati a disposizione. L'approccio migliore è quello di applicare il metodo utilizzando i sistemi informativi territoriali (GIS) sulla cartografia forestale dell'area di studio, integrando le informazioni dei soprassuoli forestali con informazioni sulla forma di governo del bosco, sulla pendenza (ricavabile dal DEM) e sulla rete stradale. Come si vedrà nell'applicazione alla regione Emilia-Romagna, la mancanza di dati ha inficiato la possibilità di eseguire una stima quanto più accurata possibile delle biomasse del settore forestale.

5.3 I residui dell'industria del legno

I sottoprodotti dell'industria del legno possono essere distinti in due categorie principali:

- Scarti di legno vergine: costituiti da residui di legno naturale di varia pezzatura (segatura, trucioli, cippato, ecc.) e provenienti da segherie, carpenterie e falegnamerie, produzione di manufatti in legno massiccio e di pannelli a base di legno, rifiuti di imballaggi in legno;
- Scarti di legno trattato: provenienti da produzione di pannelli a base di legno, di mobili e arredamenti costituiti da residui di legno con presenza di colle e/o prodotti vernicianti.

Per la produzione di energia, si possono utilizzare solamente gli scarti di legno vergine; il legno trattato necessita di trattamenti particolari: in alcuni casi deve essere considerato

un rifiuto pericoloso, in altri può essere utilizzato per la fabbricazione di pannelli truciolati.

Con il Decreto Ronchi (D.l. 5 febbraio 1997 n. 22) anche i sottoprodotti della lavorazione del legno sono rientrati di fatto nella disciplina sui rifiuti. Di conseguenza, le aziende dovrebbero compilare un apposito modulo di denuncia, il MUD; dovrebbero quindi esistere statistiche nazionali sulla produzione dei rifiuti delle industrie del settore. Questo non succede a causa dei problemi legati alla distinzione tra ciò che è rifiuto e ciò che invece è Materia Prima Secondaria (MPS). A seconda delle caratteristiche e della destinazione d'uso, i residui di legno vergine possono rientrare nella definizione di rifiuto o in quella di MPS; nel secondo caso i prodotti sfuggono completamente alla denuncia del MUD. Quindi, i dati del MUD sono sicuramente sottostimati e in più non permettono di distinguere tra i vari tipi di scarti legnosi: vergini o trattati.

Secondo uno studio di Assolegno, svolto su aziende del Trentino, l'utilizzo dei residui legnosi raggiunge percentuali molto elevate. La percentuale di fatturato derivante dalla vendita dei sottoprodotti è però decisamente limitata: pari all'1,25% del fatturato dell'azienda. La percentuale di vendita è elevata per tutte le tipologie di sfrido appartenenti al settore delle prime lavorazioni, circa il 98%, mentre è piuttosto bassa per le seconde lavorazioni, circa il 35%. I sottoprodotti della prima lavorazione sono infatti più pregiati in quanto costituiti da cippato; questo deriva da una lavorazione specifica e tecnologicamente avanzata che ne aumenta la possibilità di commercializzazione. Il cippato è prevalentemente usato per la produzione di cellulosa. I sottoprodotti di seconda lavorazione sono invece refili, segatura e trucioli, sfridi misti e polvere e sono principalmente destinati al recupero energetico (Anderle e Pettenella). I residui della lavorazione costituiscono anche un problema per lo stoccaggio, visto che sono ingombranti; per questo motivo, oltre che per la necessità di smaltire i rifiuti nel modo più economico (se non redditizio) possibile, il ritiro in forma gratuita di questo materiale è diffuso.

Le biomasse ricavabili dal settore industriale che verranno considerate sono quelle provenienti dalle industrie di prodotti alimentari e dalle industrie di lavorazione del legno. Verranno considerate le industrie appartenenti alla categoria Istat DD, ossia le industrie del legno e dei prodotti in legno che includono:

- industrie di taglio, piallatura e trattamento del legno;
- industrie per la fabbricazione di fogli da impiallacciatura, compensato e pannelli vari;
- industrie per la fabbricazione di elementi di carpenteria in legno e falegnameria per l'edilizia;
- industrie per la fabbricazione di imballaggi in legno, sughero e materiali da intreccio;
- laboratori corniciari (solo legno vergine, privo quindi di trattamenti chimici e di eventuali vernici).

Per la stima della quantità annuale di residui legnosi prodotti a livello comunale dall'industria del legno, si fa qui riferimento ad uno studio svolto da AssoLegno, in cui si afferma che la quantità di residui legnosi prodotti sia proporzionale al numero di addetti impiegati dall'industria del legno (Cerullo e Pellegrini, 2002). Per la precisione, lo studio stima che ad ogni addetto corrisponda una produzione annua pari a 11,2 tonnellate di scarti legnosi con un'umidità relativa del 15%. Inoltre, il 50% degli scarti è già attualmente impiegato in altri scopi e quindi, nella stima della biomassa disponibile, verrà preso in considerazione solamente il restante 50%.

Questa approssimazione che lega la quantità dei residui al numero di addetti è necessaria per soddisfare l'esigenza principale del metodo di stima proposto, ovvero fornire una stima a livello della disponibilità a livello di comune. Altri metodi stimano infatti i residui sulla base di informazioni sulla quantità di legno in ingresso all'industria e sulla tipologia di lavorazione (pannelli, truciolo, ecc...). In Italia non sono però disponibili informazioni sulla quantità di legno utilizzato nelle industrie per comune (queste statistiche sono disponibili su base regionale o nazionale), né tanto meno per industria di lavorazione. Ci si è dovuti quindi adeguare alle informazioni disponibili: il numero di addetti impiegati nell'industria del legno è disponibile nell'8° Censimento dell'Industria svolto nell'anno 2001 (Istat, 2001).

5.4 Caso di studio: applicazione all'Emilia-Romagna

5.4.1 Sottoprodotti agricoli in Emilia-Romagna

Per la stima dei rifiuti agroalimentari sono state prese in considerazione le colture più diffuse in Emilia-Romagna valutando l'estensione in ettari dei campi coltivati in regione (Figura 5.3). Le colture prese in considerazione sono dunque:

- frumento tenero e duro;
- pomodoro da industria;
- granoturco;
- orzo;
- barbabietola da zucchero;
- soia;
- vite.

I residui agro-alimentari sono quindi stati stimati con il metodo descritto nella sezione 5.1 a partire dalle superfici coltivate con le colture principali diffuse nella regione Emilia-Romagna. Il V Censimento Istat (2000) fornisce, per ogni comune, i dati relativi all'utilizzo del suolo e in particolare la *superficie agraria utilizzata (SAU)*, cioè l'insieme dei terreni investiti a seminativi, coltivazioni legnose agrarie (alberi da frutta, olivo, vite, ecc.), orti familiari, prati permanenti e pascoli e castagneti da frutto. Questa costituisce la superficie effettivamente utilizzata in coltivazioni agricole.

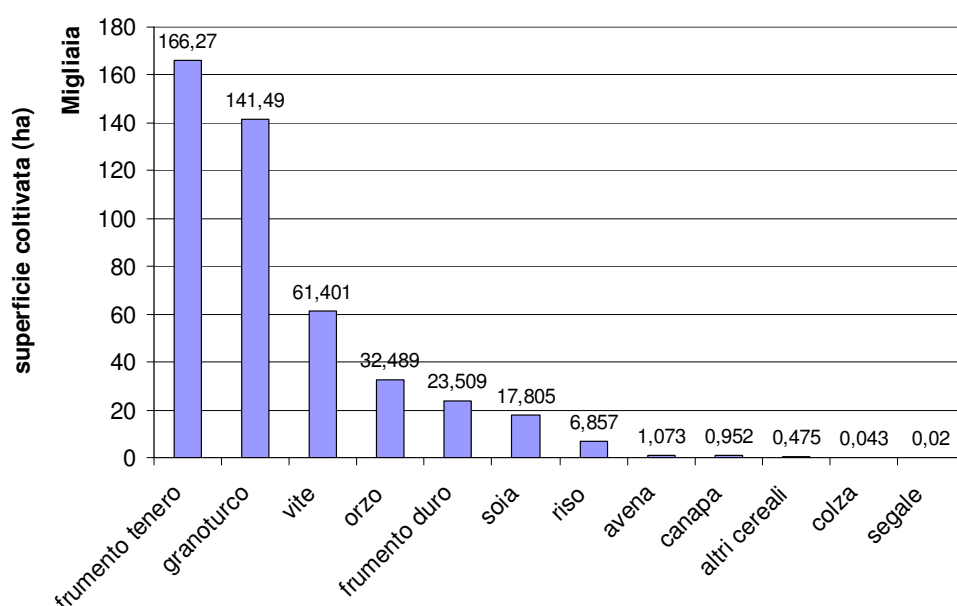


Figura 5.3: Estensione delle colture in regione (Regione Emilia Romagna, 2004).

La quantità di residui derivanti dal settore agro-alimentare dipende fortemente dalla resa (produzione) dell'annata agraria in esame. Per produzione di una coltura si intende la produzione raccolta, ovvero quella effettivamente asportata dal luogo di produzione, indipendentemente da quella che sarà la sua utilizzazione, incluse le eventuali parti utilizzate per l'alimentazione del bestiame (Istat, 2000). Se si osservano le rese dei prodotti tra l'anno 1996 e il 2004 (Figura 5.4) si può notare come varino nel tempo in un intervallo abbastanza ristretto; ad esempio il 2003 (lo stesso in cui si è verificata una ondata di calore su tutta Europa) è stato un anno con rese minori rispetto alla norma, mentre nel 2004 sono tornate ai valori normali. Le variazioni più significative riguardano la produttività dell'uva che è passata da 10 ton/ha nel 1997 a quasi 18 ton/ha nel 2004. Le rese di ogni coltura variano a seconda della provincia e sono riportate in Tabella 5.11; sono state reperite dal sito ufficiale dell'Emilia-Romagna. Mentre gli ettari coltivati per ogni coltura sono disponibili a livello comunale, il valore della resa è disponibile solo a livello provinciale.

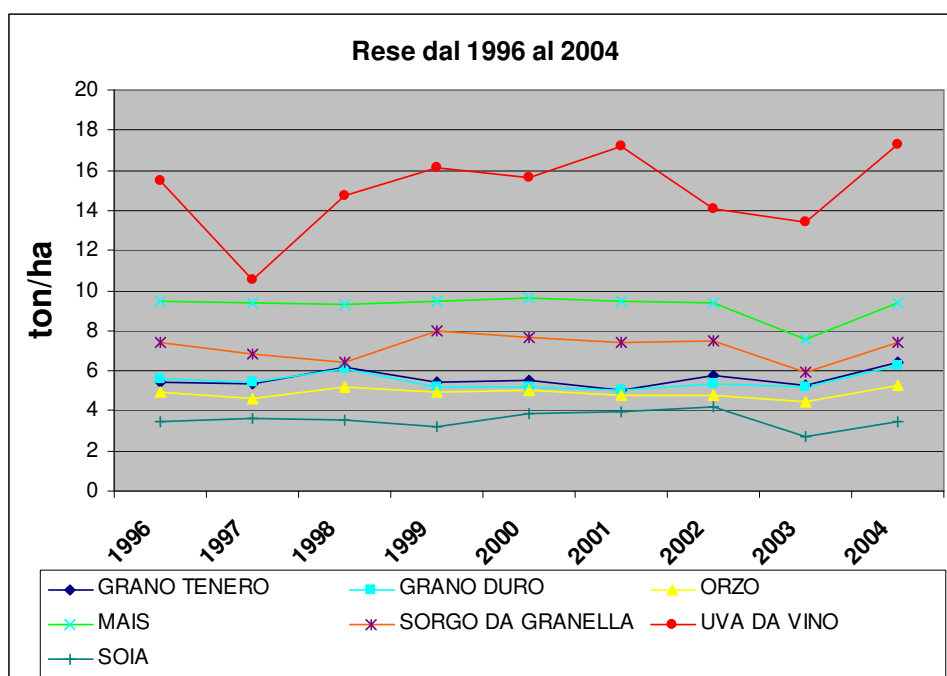


Figura 5.4: Andamento delle rese (ton/ha) medie regionali dei prodotti agro-alimentari dal 1996 al 2004 (Regione Emilia Romagna).

Tabella 5.11: Rese in (ton tq/ha) per coltura e provincia, dati relativi al 2004 (Regione Emilia-Romagna, 2006).

	RESE (ton/ha)					
	Frumento duro	Frumento tenero	Granoturco	Soia	Orzo	Vite
Piacenza	5,70	5,82	8,45	3,00	4,83	8,76
Parma	5,31	6,15	9,87	3,42	4,90	12,41
Reggio Emilia	5,60	6,13	9,18	3,19	5,63	21,83
Modena	5,70	6,33	11,00	4,00	5,80	24,16
Bologna	6,23	6,56	9,89	3,30	5,29	16,82
Ferrara	6,50	7,20	9,00	3,50	5,00	15,00
Ravenna	6,53	6,88	7,80	3,50	5,25	18,85
Forlì-Cesena	5,33	5,87	6,01	3,50	5,57	12,24
Rimini	5,50	6,00	5,50	3,50	5,00	9,88

Frumento duro

La biomassa derivante dalle coltivazioni di frumento duro costituisce solo l'1% di tutta la biomassa disponibile in regione. Dagli scarti del frumento duro si possono ricavare 8.700 ton di sostanza secca, supponendo che si possa raccogliere ed utilizzare per l'energia il 10% dei residui. La produzione in realtà di scarti di questo tipo è molto maggiore ma attualmente più del 90% viene utilizzata per altri scopi come lettiera per il ricovero degli animali, alimentazione per animali e industria cartaria.

La produzione non è uniforme sul territorio, infatti, come si può notare dalla Figura 5.5, essa è localizzata solo nella parte nord orientale dell'Emilia Romagna, tra i comuni di Ferrara, Bologna e Ravenna. La provincia con maggior disponibilità è Ferrara con 3.300 ton di residui che corrispondono a quasi il 40% della biomassa di questo tipo prodotta in regione.

Frumento tenero

Gli scarti del frumento tenero costituiscono l'8% della biomassa totale (se, invece, si considerano anche le biomasse coltivate in apposite colture energetiche, il contributo scende al 4%). Le tonnellate di sostanza secca stimate sono 53.000, supponendo che si possa raccogliere ed utilizzare per l'energia il 10% dei residui. La produzione avviene in tutta la pianura della regione anche se non in modo uniforme (Figura 5.6). Quasi un quinto si può recuperare nella provincia di Bologna (11.900 ton ss). Come nel caso del frumento duro, anche l'utilizzo attuale degli scarti di frumento tenero è considerevole (90%), soprattutto come lettiera per gli animali e concimazione dei campi dopo bruciatura (ITABIA, 2005).

Granoturco

Gli scarti del granturco (Figura 5.7) sono stimati in 282.000 ton di sostanza secca e rappresentano il 40% della biomassa in regione (se, invece, si considerano anche le biomasse coltivate in apposite colture energetiche, il contributo scende al 26%). Attualmente la metà dei residui del granturco, per la maggior parte stocchi (gli steli della pianta) e tutoli (gli assi della spighe), è già utilizzata per le lettiera e l'alimentazione degli animali e per la concimazione dei campi tramite interrimento, abbiamo quindi ipotizzato che sia disponibile il restante 50%.

Orzo

Gli scarti derivanti dalla coltivazione dell'orzo sono molto contenuti: meno di 14.000 ton di sostanza secca, intorno all'1% rispetto al totale. Questo è dovuto sia alla modesta diffusione di questo prodotto sul territorio (solo 38.000 ettari coltivati contro i 104.000 ettari del granturco e i 160.000 ettari del frumento tenero), sia all'elevato utilizzo attuale degli scarti. Il 90% dei residui viene infatti già impiegato per la lettiera per il ricovero degli animali e per la concimazione dei campi dopo bruciatura. La produzione è concentrata nella fascia centrale e orientale della regione nelle zone in prevalenza collinari (Figura 5.8). La provincia con maggior disponibilità è Forlì-Cesena, seguita da Bologna e Piacenza.

Soia

Coltivata principalmente nella parte nord orientale della regione (Figura 5.9), soprattutto nelle province di Ferrara, Modena e Bologna. Gli scarti della soia rappresentano il 12% della biomassa totale disponibile (se, invece, si considerano

anche le biomasse coltivate in apposite colture energetiche, il contributo scende al 7%) con più di 87.000 ton di sostanza secca. A fronte di una superficie coltivata relativamente modesta (36.500 ettari in tutta la regione), i residui di questa coltura risultano così abbondanti per il fatto che attualmente solo il 5% degli scarti viene riutilizzato.

Vite

I residui della vite sono costituiti sia da legna dendrometrica, che si ha a disposizione in genere ad ogni chiusura di un ciclo produttivo delle piante (circa ogni 25 anni), sia dai residui di potatura che, invece, sono a disposizione annualmente. Mentre la legna viene utilizzata per scopi energetici al 95%, i residui di potatura sono per la maggior parte inutilizzati e vengono interrati per concimare il terreno anche se la loro degradazione è molto lenta. La distribuzione sul territorio è disomogenea, come illustrato nella Figura 5.10. La massima produzione si trova tra i comuni di Reggio Emilia e Modena e nell'area di comuni compresa tra Bologna, Ravenna e Forlì. La quantità di biomassa disponibile risulta molto elevata: il recupero è stimato intorno alle 115.000 ton di sostanza secca, che rappresentano il 16% della biomassa totale (se, invece, si considerano anche le biomasse coltivate in apposite colture energetiche, il contributo scende al 9%). La provincia con la maggior quantità di scarti di questo tipo è Ravenna con 34.000 ton ss.

Regione Emilia-Romagna

Per quanto riguarda la biomassa disponibile dal comparto agro-alimentare in regione Emilia-Romagna, la Tabella 5.12 riporta la stima in tonnellate di sostanza secca (ton ss) suddivisa per provincia e per tipo di residuo. Il grafico di Figura 5.11, invece, mostra la suddivisione per tipologia dei residui disponibili sia in ogni provincia sia per l'intera regione. Si osserva che, a scala regionale (nell'ultima colonna), la metà dei residui disponibili proviene dalle colture del granturco; vite e soia sono le due colture che, dopo il granturco, contribuiscono maggiormente alla disponibilità complessiva. La stessa suddivisione percentuale si ritrova nella maggior parte delle province della regione con l'eccezione di Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini dove la vite ha il contributo maggiore. Il frumento duro contribuisce modestamente a livello sia provinciale sia regionale. Si noti, infine, che la provincia di Ferrara, con un contributo di circa 187.000 ton ss, è la provincia con maggiori quantità di residui.

Tabella 5.12: Disponibilità di biomassa in regione suddivisa per provincia e tipologia di residuo.

BIOMASSA DISPONIBILE							
(ton ss/anno)							
	Frumento Duro	Frumento tenero	Granturco	Orzo	Soia	Vite	Totale
Piacenza	419	5.818	29.969	4.683	1.932	9.180	52.002
Parma	283	5.424	23.802	2.988	1.809	1.632	35.939
Reggio Emilia	146	3.295	22.713	2.953	1.320	18.646	49.074
Modena	213	6.133	43.264	10.324	1.478	18.602	80.015
Bologna	2.610	11.915	27.461	6.559	2.399	14.678	65.623
Ferrara	3.300	7.855	117.964	56.134	262	1.390	186.906
Ravenna	1.173	6.642	14.495	3.364	1.090	34.275	61.040
Forlì-Cesena	379	4.032	1.609	92	2.665	12.272	21.049
Rimini	186	1.960	470	41	766	4.764	8.188
Regione	8.710	53.075	281.749	87.141	13.722	115.440	559.836

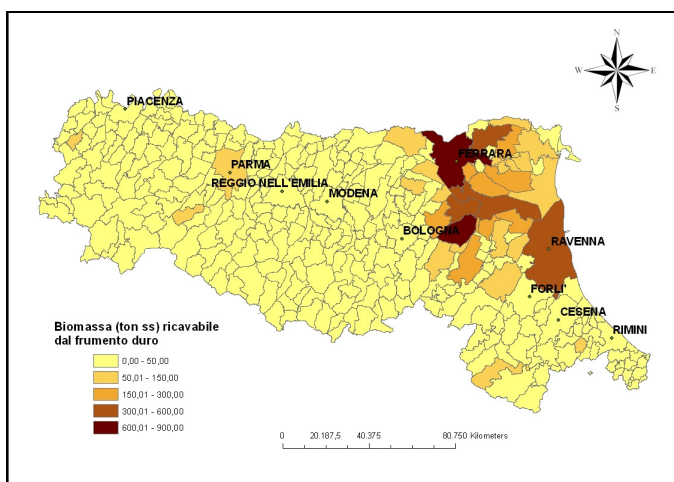


Figura 5.5: Figura 2.3: distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dal frumento duro.

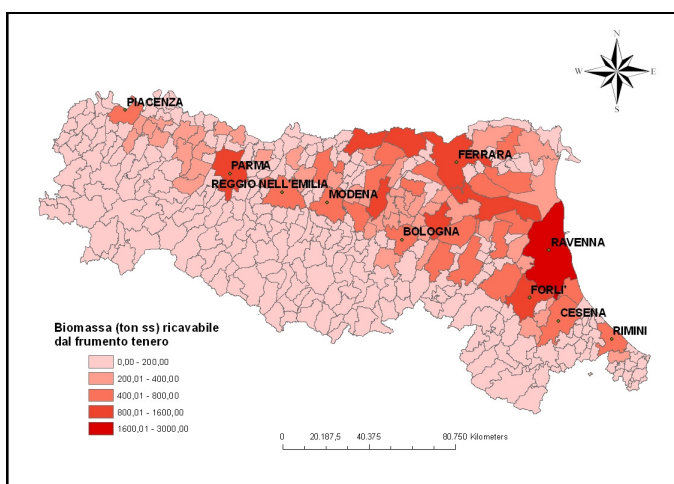


Figura 5.6: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dal frumento tenero.

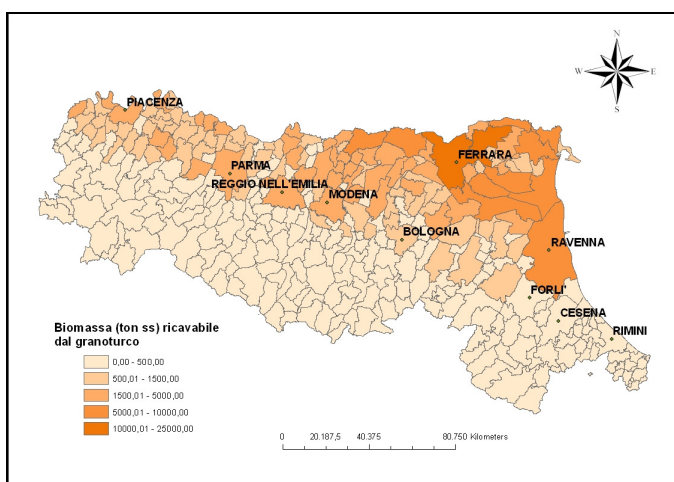


Figura 5.7: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dal granoturco.

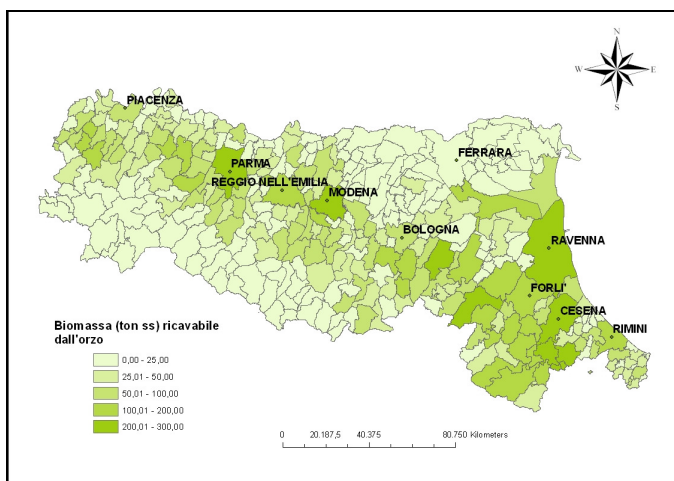


Figura 5.8: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dall'orzo.

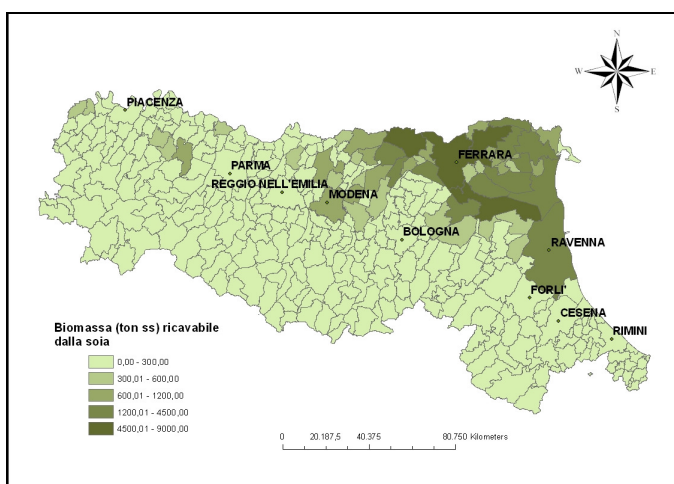


Figura 5.9: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dalla soia.

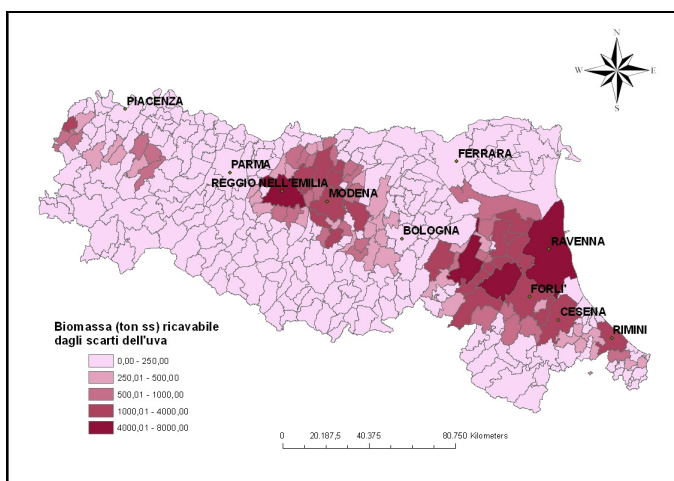


Figura 5.10: Distribuzione spaziale in regione della biomassa ricavabile dalla vite.

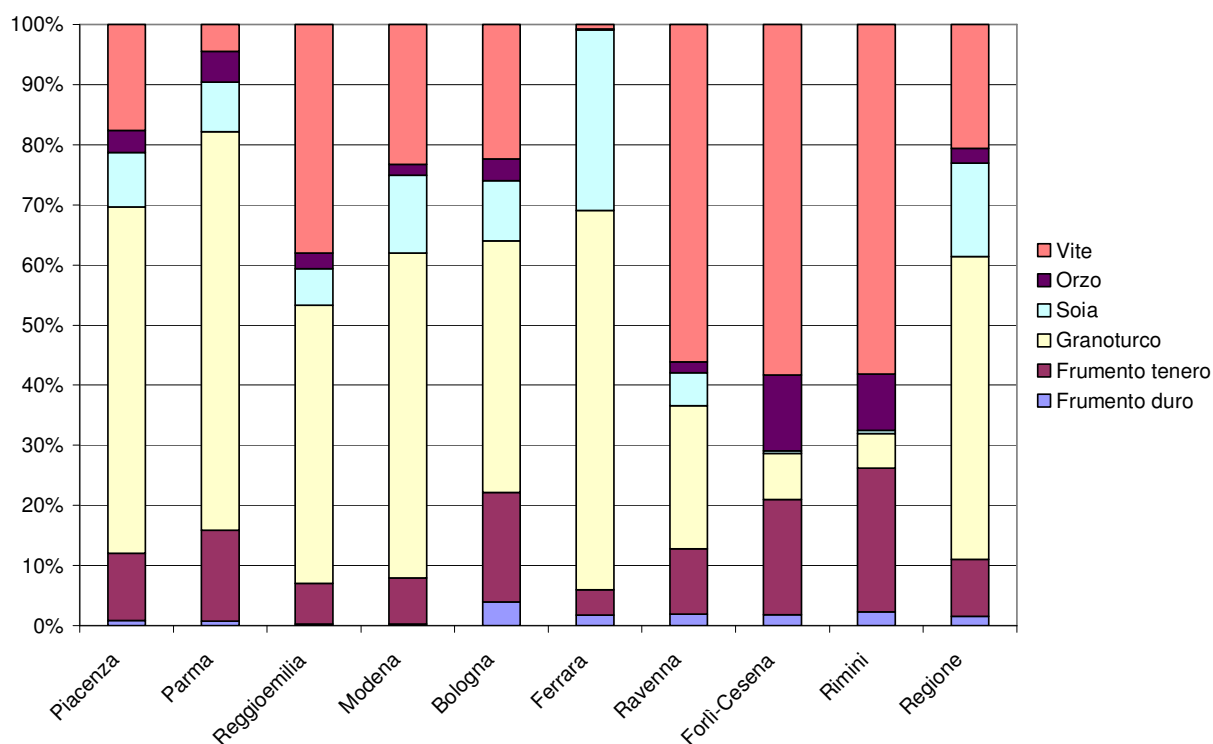


Figura 5.11: Origine dei residui agricoli per provincia e in tutta la regione.

Se si applicassero dei tassi di rimozione dei residui differenti da quelli ricavati per la realtà italiana e si utilizzasse un tasso di rimozione del 25% per i residui di tutte le colture, un numero ricorrente nella letteratura scientifica, allora si avrebbero a disposizione 547.180 t ss di residui anno (Tabella 5.13).

Tabella 5.13: Disponibilità di biomassa in regione per coltura applicando due percentuali di raccolta.

	BIOMASSA DISPONIBILE (ton ss/anno)						Totale
	Frumento duro	Frumento tenero	GranoTurco	Orzo	Soia	Vite	
totale residui	87.100	530.750	563.498	871.410	14.444	121.516	2.188.718
Anpa-Onr							
% raccolta	10%	10%	50%	10%	95%	95%	
	8.710	53.075	281.749	87.141	13.722	115.440	559.837
Letteratura							
% raccolta	25%	25%	25%	25%	25%	25%	
	21.775	132.688	140.875	217.853	3.611	30.379	547.180

5.4.2 Sottoprodotti forestali in Emilia-Romagna

L'inventario forestale regionale (IFR, 2006) indica in circa 560.000 ettari (il 25% dell'intero territorio regionale) l'estensione delle aree forestali presenti in Emilia-Romagna, di cui il 5,2% circa sono localizzate in pianura. La copertura forestale è estremamente eterogenea a causa di molteplici fattori sia naturali (frequenti cambiamenti di versante o di microclima) sia antropici (tipi di governo e trattamento diversi, non di rado complicati da svariate forme di abbandono). I boschi presenti sono stati classificati nel Piano Forestale regionale (1997) in diverse tipologie, come pinete (più spesso dominate dal pino nero), abetine (caratterizzate dall'abete bianco o

dall'abete rosso), boschi di castagno, boschi ripariali (formazioni irregolari a prevalenza di pioppi, salici ed ontani individuati sul margine umido di altri popolamenti boschivi), carpinete (dominanza di carpino nero), cerrete (prevalenza di cerro), querceti misti (presenza equilibrata di querce, carpini e altre latifoglie), querceti xerofili o roverelleti (dominanza della roverella) ed infine faggete (tipici boschi ontani sopra gli 800 m di quota caratterizzati dal faggio). In termini di frequenza, il tipo di bosco più diffuso sull'Appennino rientra nei querceti misti, a cui seguono le faggete e, con frequenze minori, nell'ordine, querceti xerofili, cerrete, boschi di castagno e carpinete.

Per applicare il metodo di stima descritto nel paragrafo 5.2 è necessario disporre di cartografia vettoriale (possibilmente aggiornata) dei soprassuoli forestali e avere informazioni riguardo allo stato dei boschi (ad es., età, stato di salute e forma di governo). Per l'Emilia-Romagna, purtroppo, non esiste nulla di tutto questo, nonostante che nel dicembre 2006 sia stato approvato dalla giunta regionale il Piano Forestale Regionale 2007-2013. Esistono invece le cartografie forestali di alcune province: Piacenza (cartografia semplificata che dovrebbe essere ufficialmente approvata dalla giunta provinciale del dicembre 2007), Bologna, Modena, Forlì-Cesena (di cui però solo recentemente, novembre 2007, sono riuscite ad ottenere la cartografia vettoriale). Inoltre, le cartografie provinciali non sono tra di loro uniformi, ma classificano tipologie forestali e forme di governo in modo diverso in modo diverso.

Oltre al recente Piano Forestale, è inoltre disponibile l'Inventario Forestale (IFR, 2006), che si basa su immagini e rilievi effettuati tra il 1984 e il 1994. L'inventario ha lo scopo di indirizzare la politica forestale regionale e, per questo, "garantisce attendibilità statistica per ambiti territoriali non inferiori a 20.000 ettari". Nell'inventario forestale sono indicate le stime per gli incrementi correnti (in metri cubi per anno) dei diversi tipi di bosco, riportati in Tabella 5.14; questi valori potrebbero però essere sovrastimati perché si riferiscono a piante in buona salute, sono il frutto di rilievi sul campo effettuati più di dieci anni fa e perché in alcuni casi il numero di campioni è limitato (ad es., fustaie in Ostrieti; Bassi e Pattuelli, 2007).

Tabella 5.14: Estensione, valori medi ed errore standard di numero di alberi, area basimetrica, volume ed incremento corrente dei singoli tipi di bosco (IFR, 2006).

Tipo di bosco	Forma di governo	Superficie ha	N° alberi n/ha	Incremento corrente mc/ha
Querceti submesofili	Cedui	93.122	4.070	4,9
	Fustaie	5.623	2.023	6,2
Cerrete	Cedui	31.368	3.177	5,4
	Fustaie	1.871	1.893	7,7
Querceti xerofili a roverella	Cedui	32.004	3.427	3,0
	Fustaie	3.942	2.284	3,3
Ostrieti	Cedui	29.237	5.120	3,5
	Fustaie	365	2.243	4,4
Pinete montane	Cedui	-	-	-
	Fustaie	6.946	1.675	6,8
Boschi ripariali	Cedui	5.110	3.481	6,1
	Fustaie	3.103	2.332	7,2
Faggete	Cedui	69.066	4.451	6,9
	Fustaie	13.627	2.002	8,5
Abetine	Cedui	-	-	-
	Fustaie	5.695	1.715	12,2
Boschi di castagno	Cedui	24.405	3.258	9,6
	Fustaie	3.596	1.361	10,3

Dal piano forestale regionale si possono ricavare informazioni sui prelievi forestali che, negli ultimi anni sono state nettamente di gran lunga inferiori all'incremento annuo di

massa legnosa prodotta (Tabella 5.15). In particolare, si stima che delle attuali utilizzazioni forestali un terzo sia già utilizzato e che è consigliabile lasciare a terra dopo il taglio un altro terzo del legname, per contribuire al mantenimento dei nutrienti nel sottobosco. Il volume finale quindi di legna utilizzabile è un terzo di quello tagliato annualmente. Questo permette, in prima approssimazione, di ipotizzare di destinare il restante 33% del legname raccolto per usi energetici.

Tabella 5.15: Massa legnosa nei boschi della regione, accrescimento e utilizzazione annui (Piano forestale regionale, 2006).

	Milioni metri cubi
Massa legnosa totale	50
Accrescimento annuo stimato	1,5
Utilizzazione annua	0,55

La carta di Uso del Suolo del 2003 (in scala 1:25.000) (Regione Emilia-Romagna, 2005) rimedia almeno in parte la mancanza di una cartografia forestale uniforme per tutta la regione. Secondo l'Uso del Suolo aggiornato al 2003 le aree boscate sono suddivise in tre categorie: boschi a prevalenza di latifoglie (quasi il 94% dell'intera copertura boschiva), boschi a prevalenza di conifere (il 3%) e boschi misti (3%). I boschi di latifoglie vengono ulteriormente suddivisi in boschi di faggio, boschi di querce, carpini e castagni, boschi di salici e pioppi, boschi planiziali di farnie e frassini e castagneti da frutto (Figura 5.12). Sono, inoltre, indicati gli ambienti con vegetazione arbustiva e/o erbacea di recente evoluzione e le aree con vegetazione rada. In particolare, le classi di uso del suolo sono:

- Boschi di latifoglie – formazioni vegetali, costituite principalmente da alberi, ma anche da cespugli e arbusti, nelle quali dominano le specie forestali latifoglie; la superficie a latifoglie deve costituire almeno il 75% della componente arborea forestale, altrimenti è da classificare bosco misto. I boschi di latifoglie sono ulteriormente suddivisi in:
 - Boschi a prevalenza di faggi: in genere situati oltre i 900 m slm;
 - Boschi a prevalenza di querce, carpini e castagni: in genere situati sotto i 900 m slm;
 - Boschi a prevalenza di salici e pioppo: specie igrofile presenti in genere in zone con abbondanza di acqua;
 - Boschi planiziali a prevalenza di farnie, frassini, ecc.;
 - Castagneti da frutto: aree con castagni da frutto in cui sono regolarmente svolte attività di potatura e ripulitura del sottobosco.
- Boschi di conifere: formazioni vegetali costituite principalmente da alberi, ma anche da cespugli e arbusti, nelle quali dominano le specie forestali conifere; la superficie a conifere deve costituire almeno il 75% della componente arborea forestale, altrimenti è da classificare bosco misto.
- Boschi misti di conifere e latifoglie: formazioni vegetali costituite principalmente da alberi, ma anche da cespugli e arbusti, dove né le latifoglie né le conifere superano il 75% della componente arborea forestale.

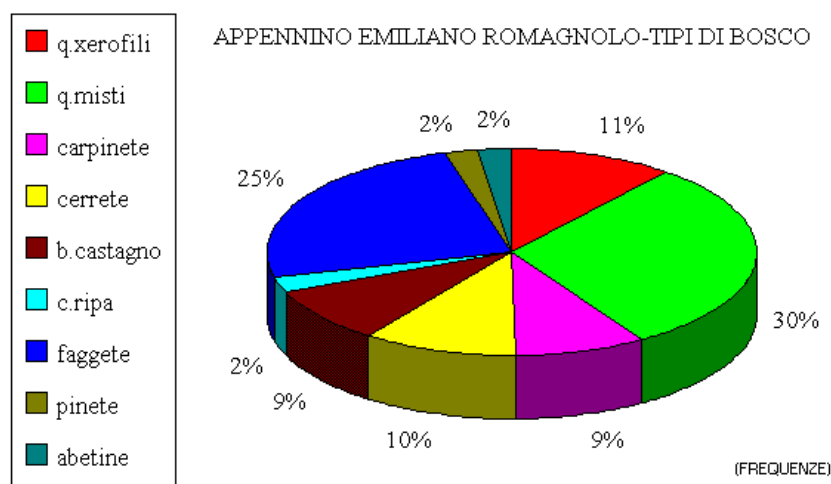


Figura 5.12: Frequenze dei boschi nell'Appennino Emiliano Romagnolo rilevate dall'Inventario Forestale della regione (1997).

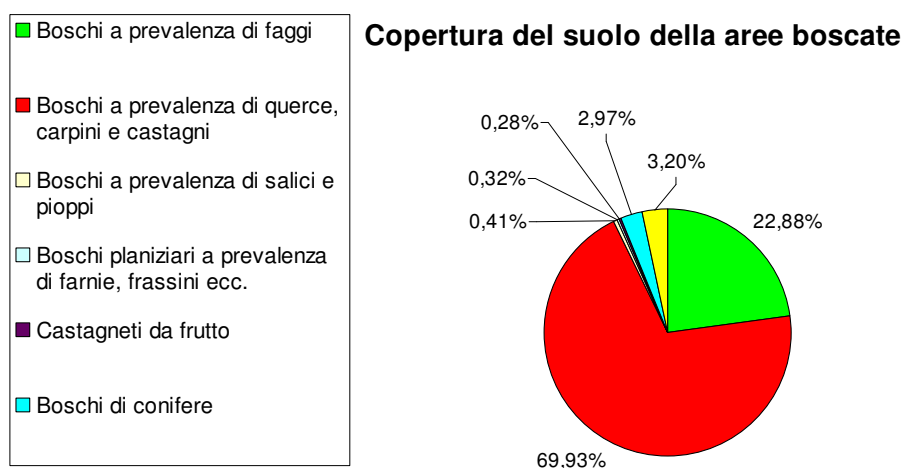


Figura 5.13: Figura 6 Frequenze dei boschi rilevate dalla cartografia vettoriale di Uso del suolo del 2003.

L'analisi è stata così effettuata:

- Attraverso la sovrapposizione della carta digitale dell'Uso del suolo con i limiti amministrativi si individuano per ogni comune gli ettari di bosco presenti;
- Attraverso un DEM (Digital Elevation Model) 5x5 m, ipotizzando che tutte le aree boschive siano soggette a taglio periodico tranne quelle con una pendenza troppo elevata, sono state eliminate tutte le aree con pendenza maggiore del 20% (un ipotesi certamente cautelativa per quanto riguarda il recupero di biomasse dalle aree forestali).

Si ha quindi a disposizione l'estensione delle aree accessibili di bosco per comune. Per non deturpare i boschi con tagli e recuperi troppo abbondanti si è deciso di recuperare annualmente solo una parte della produzione primaria di un anno. I dati di incremento corrente annuale ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{anno}^{-1}$) sono stati reperiti dal Piano Forestale Regionale (2006) e sono riportati in Tabella 5.14. Poiché le classi di uso del suolo sono diverse da quelle per cui si ha l'incremento annuo di biomassa, è necessario creare una corrispondenza, riportata in Tabella 5.16, tra le due informazioni disponibili. Visto che l'estensione dei

boschi misti e planiziari è inferiore al 3% dell'intera area boscata regionale, si è deciso di non includerli nella stima.

Tabella 5.16: Corrispondenza dei dati tra la carta dell'uso del suolo e il Piano Forestale (2006).

Uso del Suolo 2003	Piano Forestale
Boschi a prevalenza faggi	Faggete
Boschi a prevalenza querce, carpini, castagni	Querceti mesofili
Boschi a prevalenza salici e pioppi	Boschi riparali
Boschi planiziari con farnie e frassini	-
Boschi di castagneti	Boschi di castagno
Boschi di conifere	Pinete montane

Infine avendo trovato il volume utilizzabile di legna e conoscendo la massa volumica ($0,90 \text{ ton tq/m}^3$) e l'umidità relativa (40%) forniti da uno studio dell'ANPA (2001) è possibile calcolare le tonnellate di sostanza secca per comune. I residui forestali così stimati sono quindi pari 78.000 tonnellate di sostanza secca, così suddivisi:

- boschi a prevalenza di faggi (residui pari 20.506 ton ss);
- boschi a prevalenza di querce, carpini e castagni (residui pari a 49.319 ton ss);
- boschi a prevalenza di salici e pioppi (residui pari a 2.272 ton ss);
- castagneti da frutto (residui pari a 226 ton ss)
- boschi di conifere (residui pari a 5.677 ton ss).

Gli scarti risultano in quantità inferiore rispetto alle aspettative per il fatto che la maggior parte delle aree boscate si trova in territori con una pendenza maggiore del 20%. Come si può vedere dalla Tabella 5.17, l'85% dei boschi si trova su superfici troppo inclinate ed è stato quindi scartato.

Tabella 5.17: Estensione in ettari delle aree boscate per tipologia di bosco.

	Area boscata	Aree con pendenza > 20%	Area Utile
Faggi	119.387	103.112	16.275
Querce, Carpini, Castagni	365.620	310.821	54.799
Salici e pioppi	2.168	227	1.942
Castagneti da frutto	1.436	1.304	132
Conifere	15.514	11.009	4.506
Totale	504.127	426.473	77.654

La distribuzione dei residui è per lo più omogenea lungo tutta la parte montagnosa della regione (Figura 5.14), ad eccezione del Comune di Ravenna. La provincia con più disponibilità di biomassa risulta essere Parma con 24.400 ton ss seguita da Piacenza con 13.630 ton ss (Tabella 5.18).

Tabella 5.18: Biomassa ricavabile dai residui forestali e dagli scarti dell'industria del legno.

	Biomassa forestale	Biomassa industria del legno
	(ton ss/anno)	(ton ss/anno)
Piacenza	13.628	3.284
Parma	24.421	5.326
Reggio Emilia	8.272	10.648
Modena	10.179	12.019
Bologna	11.412	9.991
Ferrara	783	4.255
Ravenna	3.149	4.289
Forlì-Cesena	5.777	11.410
Rimini	380	7.302
Regione	78.001	68.524

5.4.3 Residui dell'industria del legno in Emilia-Romagna

Per quanto riguarda la lavorazione del legno, sono state considerate le industrie appartenenti alla categoria Istat DD, ossia le industrie del legno e dei prodotti del legno che includono: industrie di taglio, piallatura e trattamento, industrie per la fabbricazione di fogli compensati e pannelli vari, industrie per la fabbricazione di imballaggi in legno, sughero e materiali da intreccio. Le industrie di questo settore sono localizzate per lo più nei comuni capoluogo di provincia (Figura 5.15) e nel 2001 vi trovavano lavoro all'incirca 14.563 addetti (Istat, 2001).

La biomassa recuperabile da queste industrie rappresenta il 10% del totale con 68.500 tonnellate di sostanza secca (se, invece, si considerano anche le biomasse coltivate in apposite colture energetiche, il contributo scende al 6%). La provincia con più disponibilità risulta essere Modena con 12.000 ton ss, seguita da Forlì-Cesena con 11.500 ton ss e Reggio Emilia con 10.600 ton ss (Tabella 5.18).

5.5 Disponibilità di biomasse residuali totale

Sommando tutti i contributi dei diversi settori (agroalimentare, forestale, industria del legno) descritti nei paragrafi precedenti si ottiene la stima della biomassa residuale totale disponibile in regione Emilia-Romagna. In Tabella 5.19 è riportata la disponibilità di biomassa sia dai residui sia colture energetiche dedicate, come descritto nel capitolo 4. La biomassa totale disponibile attualmente, cioè solo da biomasse residuali, in regione risulta quindi pari a 706.362 tonnellate di sostanza secca; la biomassa disponibile se si coltivassero anche le colture energetiche sarebbe invece pari a 1.274.824 ton ss. La suddivisione tra le varie fonti di origine è raffigurata nei grafici di Figura 5.16. La provincia con più tonnellate di sostanza secca è Ferrara (l'unica provincia con il territorio totalmente pianeggiante) con 308.122 ton di ss (comprendendo anche le SRF) seguita da Bologna con 201.000 ton ss. Si può notare dalla Figura 5.17 che i comuni con più disponibilità di biomassa secca sono quelli localizzati in pianura, infatti i comuni di montagna possono contare solo sul contributo modesto dei residui forestali.

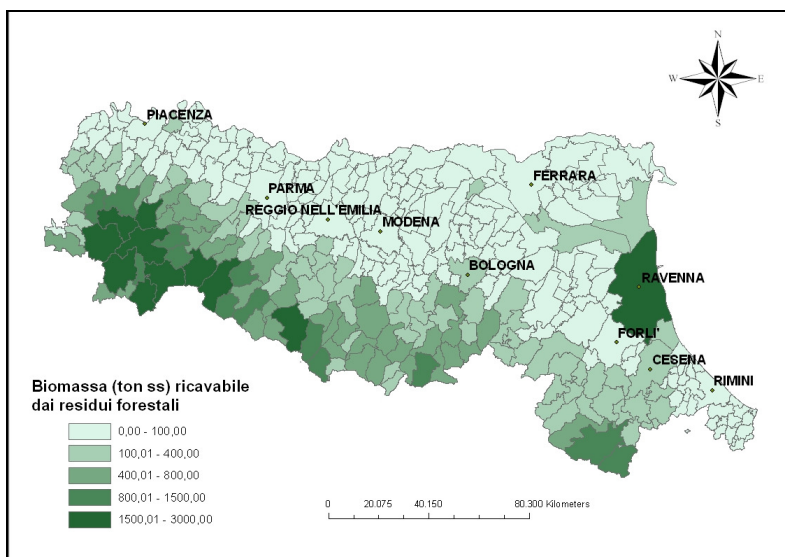


Figura 5.14: distribuzione spaziale in Regione della biomassa ricavabile dai residui forestali.

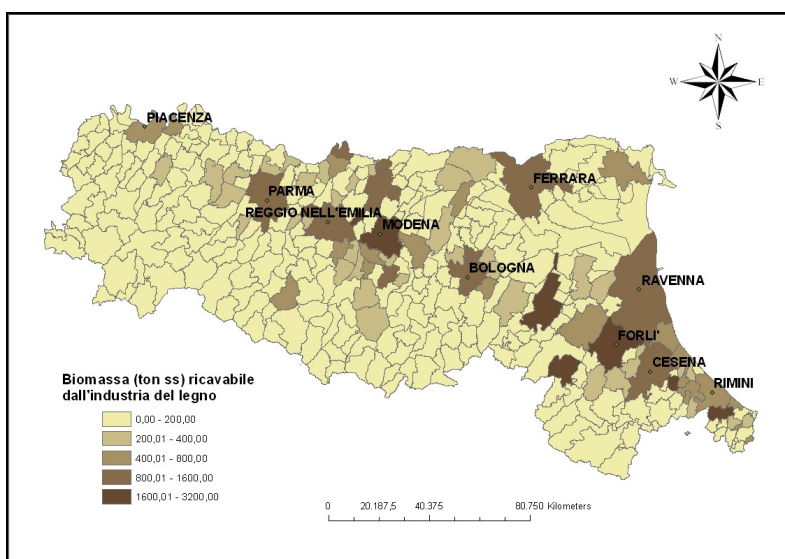


Figura 5.15: Distribuzione spaziale in Regione della biomassa ricavabile dagli scarti dell'industria del legno.

Tabella 5.19: Biomassa totale suddivisa per provincia.

	Biomassa totale (ton ss/anno)								
	Piacenza	Parma	Reggio Emilia	Modena	Bologna	Ferrara	Ravenna	Forlì-Cesena	Rimini
Residuale	68.914	65.686	67.994	102.213	87.026	191.945	68.478	38.236	15.870
Culture energetiche	146.369	113.587	105.723	178.349	201.125	308.122	106.541	85.587	29.422

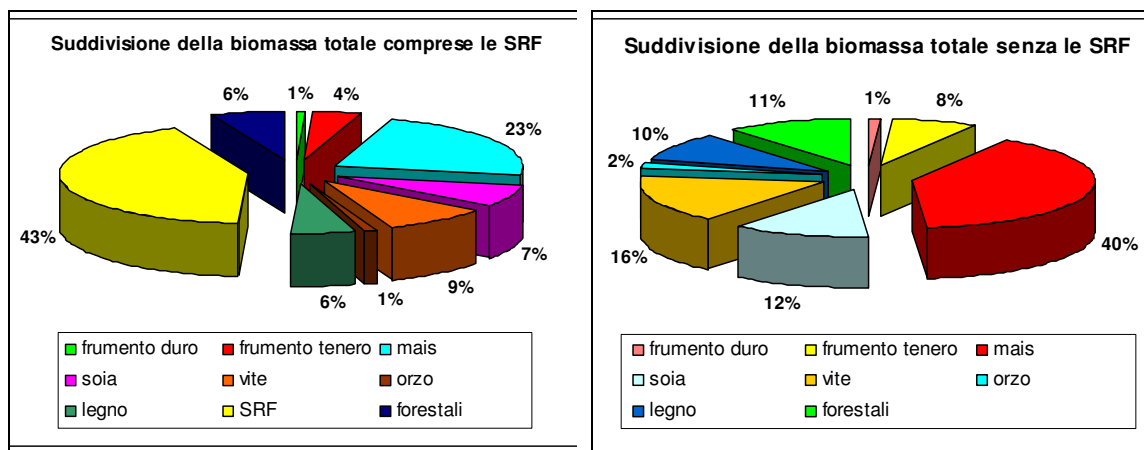


Figura 5.16: Figura 12 Suddivisione della biomassa totale con e senza SRF.

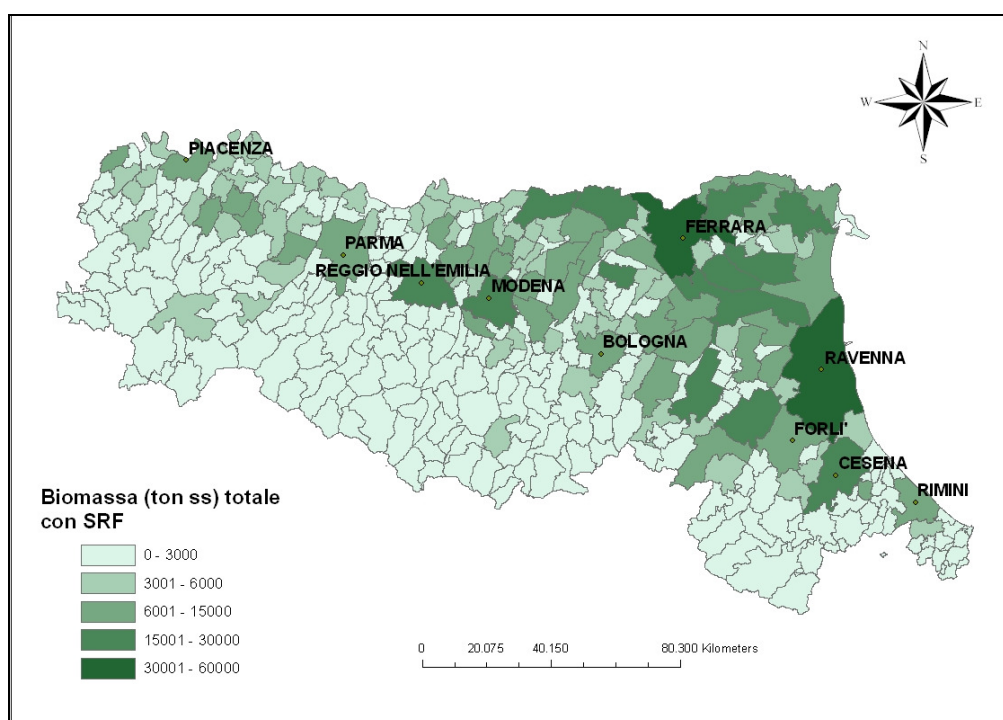


Figura 5.17: Distribuzione spaziale in Regione della biomassa totale comprese le SRF.

5.6 Bibliografia

- Afgan N.H., M.G. Carvalho, N.V. Hovanov, 2000. Energy system assessment with sustainability indicators. *Energy Policy*, 28: 603–612.
- Andrews S.S., 2006. White Paper: Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations, Soil Quality National Technology Development Team USDA-Natural Resource Conservation Service.
- Anpa e Onr, 2001. I rifiuti del comparto agroalimentare. Studio di settore, Rapporti 11/2001, Anpa - Unità Normativa Tecnica.
- Bernetti J., 1998. Il mercato delle biomasse forestali per scopi energetici: un modello di offerta, *Rivista di Economia Agraria*, anno LIII n. 3, settembre 1998.
- Brun F., C. Magnani, 2003. Descrizione del sistema forestale italiano, PEFC Italia, 2003.
- Cerullo S., a. Pellegrini, 2002. Stima delle quantità di residui legnosi prodotti in Italia. AssoLegno, Associazione nazionale industrie forestali e lavorazione legno di Federlegno-Arredo.

- Dobermann A., T. Arkebauer, K. Cassman, R. Drijber, J. Lindquist, J. Specht *et al.* 2003. Understanding Corn Yield Potential in Different Environments. Fluid Focus: The Third Decade. ed. L.S. Murphy. pp. 67-82. In Proceedings of 2003 Fluid Forum, Vol. 20, Fluid Fertilizer Foundation, Manhattan, Kansas. [online] URL: <http://soilfertility.unl.edu/Materials%20to%20include/Research%20Pubs/Ecological%20Intensification.htm>
- Ericsson K., L.J. Nilsson, 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach, *Biomass and Bioenergy* 30(1): 1-15.
- Glassner, D., Hettenhaus, J., Schechinger, T., 1998. Corn stover collection project—a pilot for establishing infrastructure for agricultural residue and other crop collection for biomass processing to ethanol. In: Proc. Bioenergy 1998 Conference, 4–8 October, 1998, Madison, WI, pp. 1100–1110.
- Glassner D., J. Hettenhaus, T. Schechinger, 1999. Corn stover potential: Recasting the corn sweetener industry. In: Janick, J. (Ed.), *Perspectives on New Crops and New Uses*. ASHS Press, Alexandria, VA, pp. 74–82.
- Hall D.O., F. Rosillo-Calle, R.H. Williams, J. Woods, 1993. Biomass for energy: supply prospects. In: T.B. Johansson *et al.*, Editors, *Renewable energy—sources for fuels and electricity*, Island Press, Washington, DC (1993), pp. 593–651.
- IFN – Inventario forestale nazionale, 2007. [online] URL: http://www.sian.it/inventarioforestale/jsp/01tabelle_superficie.jsp
- Istat, 2000. V Censimento Generale dell'Agricoltura, Roma, 2001. [online] URL: <http://www.istat.it/censimenti/agricoltura/>
- Istat, 2001. 8° Censimento dell'Industria e dei Servizi. [online] URL: <http://www.istat.it/censimenti/industria/>
- ISTAT, 2002, 2003, 2004, 2005. Annuario statistico regionale, [online] URL: http://www.istat.it/dati/catalogo/20061109_00/
- ITABIA – Italian Biomass Association, 2005. Le biomasse per l'energia e l'ambiente: Rapporto 2003. Roma.
- Kadam & McMillan, 2003. Availability of corn stover as a sustainable feedstock for bioethanol production, *Bioresource Technology* 88: 17-25.
- Klass D.L., 1998. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, Academic Press, San Diego, California.
- Marinelli A., P. Lassini, D. Pettenella, 1998. Il sistema foresta-legno italiano: problemi e prospettive per il 2000 di una politica dell'offerta interna di legname, CNEL, Roma.
- McKendry P., 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83: 37–46.
- Paine L.K., T.L. Peterson, D.J. Undersander, K.C. Rineer, G.A. Bartelt, S.A. Temple, D.W. Sample, R.M. Klemme, 1996. Some ecological and socioeconomic considerations for biomass energy crop production. *Biomass & Bioenergy* 10(4):231–242.
- Patuelli M., S. Bassi, 2007. Comunicazione personale (novembre 2007), Servizio parchi e foreste Regione Emilia-Romagna.
- Perlack R.D., L.L. Wright, A.F. Turhollow, R.L. Graham, B.J. Sokes, D.C. Erbach, 2005. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Prihar, S.S., A. Steward, 1990. Using Upper-Bound Slope through Origin to Estimate Genetic Harvest Index., *Agron. J.* 82: 1160–1165.
- Swisher J., D. Wilson, 1993. Renewable energy potentials, *Energy* 18(5): 437–459.

Van Belle J., Temmerman M., Schenkel Y., 2003. Three level procurement of forest residues for power plant. *Biomass and Bioenergy* 24: 401–409.

Williams RH., 1995. Variants of a low CO₂-emitting energy supply system (LESS) for the world—prepared for the IPCC Second Assessment Report Working Group IIa, Energy Supply Mitigation Options, Richland: Pacific Northwest Laboratories, p. 39.

Wyman C.E., N.D. Hinman, 1990. Ethanol: Fundamentals of production from renewable feedstocks and use as a transportation fuel, *Appl. Biochem. Biotechnol* 24/25: 735.

Yamamoto H., K. Yamaij, J. Fujino, 1999. Evaluation of bioenergy resources with a global land use and energy model formulated with SD technique, *Applied Energy* 63: 101–113.

6 Localizzazione ottima e valutazione energetica, emissiva ed economica¹

In questo capitolo si propone una metodologia per svolgere un accurato bilancio energetico, emissivo ed economico dell'utilizzo delle biomasse come fonte di energia al fine di valutare la convenienza per un territorio a scala provinciale. Sono considerati i costi di raccolta, trasporto e acquisto di sottoprodotti agricoli, forestali e dell'industria del legno, i costi della *short rotation forestry*, nonché i costi di costruzione e gestione degli impianti (cogenerazione e/o caldaie domestiche). Dalla risoluzione del problema di ottimizzazione si ottengono la localizzazione degli impianti e la definizione dei relativi bacini di conferimento. La metodologia è applicata alla provincia di Cremona, una delle più importanti province agricole d'Italia. Tutte le analisi sono svolte a livello comunale. Date le caratteristiche della provincia, la biomassa risulta un'importante fonte di energia: l'utilizzo di biomassa è positivo in termini di energia prodotta, di emissioni di CO₂ evitate e di ritorno economico.

6.1 Introduzione

Le biomasse sono una importante fonte di energia alternativa ai combustibili fossili come indica anche l'obiettivo della Commissione Europea (2000): portare la percentuale di energia prodotta da biomasse dal 3% (pari a circa 45 milioni di tep) all'8,5% nel 2010 (circa 135 milioni di tep). Questa fonte rinnovabile è una risorsa locale e largamente disponibile che permette la produzione diffusa di energia a costi contenuti e con semplici impianti. La valorizzazione dell'utilizzo delle biomasse può inoltre innescare processi di miglioramento ambientale e socio-economico come la diversificazione delle colture, il ripristino di suoli abbandonati, la manutenzione dei boschi, la creazione di posti di lavoro (McKendry, 2002a). Infine, le biomasse contribuiscono a contrastare il riscaldamento climatico globale poiché il bilancio di produzione di gas serra, tipicamente di CO₂, si può considerare quasi neutro (Roman e Turnbull, 1997). Per ottenere trasformazioni energetiche con elevate efficienze e per un utilizzo sostenibile delle biomasse, è necessario però considerare impianti con tecnologie moderne e pianificare razionalmente l'approvvigionamento, ovvero la raccolta e il trasporto, della biomassa necessaria al loro funzionamento (Rosch e Kaltschmitt, 1999; Combs, 2002). In questo studio, quindi, l'utilizzo energetico delle biomasse è affrontato considerando questi aspetti fondamentali.

Come descritto in McKendry (2002b), esistono diverse tecnologie di trasformazione delle biomasse, ad esempio la combustione e la digestione anaerobica per la produzione di biogas. In questo lavoro si considera solo l'estrazione di calore mediante combustione di biomasse ligno-cellulosiche. Il problema è comunque molto complesso: nella progettazione dell'utilizzo energetico delle biomasse, infatti, si deve tener conto non solo dell'energia netta ottenuta, ma anche dei costi economici, nonché delle

¹ Il lavoro presentato è stato realizzato insieme a Marino Gatto e Giorgio Guariso del Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano. Il lavoro è stato inviato a Biomass & Bioenergy nel 2006 ed è in revisione.

emissioni prodotte e degli altri impatti (OECD, 1988). Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico non ci sono solo i vantaggi a livello globale legati alla riduzione delle emissioni di gas serra, ma anche alcuni svantaggi a livello locale dovuti, ad esempio, all'emissione di particolato.

Il problema di ottimizzazione che verrà qui formulato è sostanzialmente un problema di localizzazione di impianti e di definizione dei bacini d'utenza, per cui esiste un'ampia letteratura scientifica. Per una panoramica dei metodi di localizzazione degli impianti si veda ad esempio Cappanera (2000). Sul tema specifico degli impianti a biomassa, Freppaz *et al.* (2004) hanno affrontato il problema nel caso della Liguria e Voivontas *et al.* (2001) nel caso dell'isola di Creta. Uno studio, per certi aspetti simile a quello qui esposto, è stato affrontato per la localizzazione di impianti di termodistruzione dei rifiuti in Lombardia anche da Caruso *et al.* (1993).

Il problema di localizzazione degli impianti e di definizione dei bacini di conferimento è risolto rispetto a tre obiettivi, tanti quanti sono i principali aspetti legati all'utilizzo delle fonti rinnovabili. Si vogliono, infatti, ottimizzare la resa energetica (obiettivo energetico), la riduzione delle emissioni di gas serra (obiettivo emissivo) e il ritorno monetario netto (obiettivo economico). In questo studio di massima sono trascurate le emissioni di altri inquinanti sia aeriformi sia solidi.

Infine, caratteristica del presente lavoro è lo stretto legame con il territorio in esame: si propone di risolvere il problema di ottimizzazione a scala provinciale e di considerare come unità minima di analisi il comune. A titolo di esempio, si farà riferimento ad un'area agricola della Pianura Padana e, in particolare, alla provincia di Cremona.

6.2 Scenari di raccolta, produzione e utilizzo

In questo paragrafo sono brevemente descritti i metodi per la stima della disponibilità di biomasse e della loro produzione in apposite colture; sono inoltre descritte le alternative impiantistiche e gestionali che saranno considerate.

6.2.1 Disponibilità di biomasse

Le biomasse ligno-cellulosiche sono costituite dai sottoprodotti già disponibili di attività agricole, forestali e della lavorazione del legno e dalle biomasse ottenute da piantagioni energetiche (SRF – *Short Rotation Forestry*) (McKendry, 2002a).

I sottoprodotti agricoli sono stimati dalle superfici destinate alle colture più diffuse nel territorio in esame (tipicamente granoturco, soia, frumento e orzo per la provincia di Cremona), dalla loro resa e dalla frazione di sottoprodotto rispetto al prodotto (ANPA e ONR, 2001). Noto il numero di addetti del settore della lavorazione del legno e la produzione di residui per addetto (Cerullo e Pellegrini, 2002), si stimano i sottoprodotti di questo settore. I sottoprodotti forestali, infine, sono calcolati conoscendo la parte di superficie forestale pulita ogni anno e la biomassa raccolta (Enea, 2000). Da queste stime si sottrae la percentuale di biomassa già utilizzata per scopi diversi dalla produzione di energia e si ottiene la biomassa disponibile.

La biomassa da SRF dipende dalla superficie che si decide di destinare ad essa e dalle caratteristiche della coltura stessa. Le SRF contribuiscono allo sviluppo dell'utilizzo energetico perché producono biomassa dall'approvvigionamento sicuro e dalle caratteristiche chimico-fisiche omogenee. Si suppone si destinare a colture energetiche la superficie agricola non utilizzata e i *set aside*²; tra le varie essenze utilizzabili, qui si

² I *set aside* sono una parte, pari al 10%, dei terreni investiti a seminativi che la Politica Agricola Comunitaria impone di non coltivare.

considerano solo piantagioni di pioppi ad alte densità, brevi turni di taglio ed elevata meccanizzazione con una resa finale per ettaro di 13 ton tal quale l'anno (Klass, 1998; Berndes *et al.*, 2001). In Tabella 6.1 sono riportati i parametri utilizzati per la stima delle biomasse residuali e in Tabella 6.2 sono elencate le caratteristiche della coltura energetica del pioppo considerata.

Tabella 6.1: quantità di residui, frazione disponibile e umidità per le quattro colture più diffuse in provincia di Cremona (tonnellate di residui umidi per tonnellata di prodotto principale), per la lavorazione del legno (tonnellate di sottoprodotto umido per addetto) e per le superfici biscalate (percentuale dell'area sottoposta diramanti).

Settore	Residuo	Frazione disponibile	Umidità
Agricoltura			
Granoturco	1.30 (t residuo/t p.p.)	50 (%)	55 (%)
Frumento	0.69 (t residuo/t p.p.)	70 (%)	15 (%)
Soia	1.50 (t residuo/t p.p.)	5 (%)	52 (%)
Orzo	0.80 (t residuo/t p.p.)	70 (%)	15 (%)
Industria del legno	11.20 (t residuo/addetto)	50 (%)	15 (%)
Boschi	7.60 (% soggetta a manutenzione)	20 (%)	40 (%)

Tabella 6.2: Caratteristiche della SRF di pioppo.

Resa	12.93 t ss ha ⁻¹ anno ⁻¹
Umidità	20 %
Densità d'impianto	17,280 piante ha ⁻¹
Turno di taglio	4 anno

6.2.2 Impianti di produzione di energia

Si considerano due tipi di impianto: impianti di cogenerazione situati in comuni di piccole/medie dimensioni, oppure caldaie domestiche che producono solamente l'energia termica necessaria ad un'abitazione di medie dimensioni (Riva, 2003).

L'impianto di cogenerazione è costituito da una caldaia ad acqua dalla potenzialità energetica di 22 GWh/a (data la potenza pari a 6 MWt e supponendo un funzionamento a pieno carico di 155 g/a), con rendimento medio dell'80%, e dal gruppo di cogenerazione. Quest'ultimo è composto da una caldaia ad olio diatermico da circa 51 GWh/a (data la potenza termica 7,2 MWt e supponendo un funzionamento a pieno carico di 300 g/a), con rendimento medio stagionale dell'80%, e da un ciclo ORC (*Organic Rankine Cycle*) con rendimento elettrico pari a 17,2% e rapporto elettrico/termico pari a 0,215 (1 kWt corrisponde a 0,215 kWe) (Gaia *et al.*, 2000 e Cozzini, 2000). Sotto questa ipotesi³, si producono sia 8,77 GWh/a di energia elettrica sia calore sufficiente ad alimentare una rete di teleriscaldamento di 15 km circa. In questo modo funzionano con successo gli impianti di Tirano (Brè, 2002) e di Lienz, in Austria (Stadtwaerme Lienz, 2002).

Le moderne caldaie domestiche alimentate a biomassa raggiungono rendimenti elevati, superiori anche all'80%, richiedono una semplice manutenzione e sono dotate di efficaci sistemi di pulizia dei fumi (Enea, 2002). Sono qui considerate caldaie da 100 kW.

Supponendo un potere calorifico inferiore delle biomasse pari a 17.178 MJ/ton ss (sostanza secca), sono necessarie circa 19.300 ton ss per il funzionamento di un

³ La potenzialità energetica dipende dalle ore effettive di funzionamento e dalle condizioni ambientali; ad esempio, la produzione di energia elettrica di Tirano del 2003 è stata pari a 7,5 GWh.

impianto di cogenerazione per un anno. Per il funzionamento di una caldaia servono, invece, circa 39 ton ss/anno, supponendo che essa lavori 1.500 h/anno a piena potenza.

6.2.3 Alternative di utilizzo delle biomasse

Le seguenti alternative, schematizzate in figura 1, saranno quindi studiate e confrontate:

- Alternativa I: i sottoprodotti alimentano gli impianti di cogenerazione e non si coltiva biomassa da SRF;
- Alternativa II: i sottoprodotti e la SRF alimentano gli impianti di cogenerazione;
- Alternativa III: i sottoprodotti alimentano le caldaie domestiche e la SRF alimenta gli impianti di cogenerazione.

Si osserva inoltre che, se la biomassa disponibile nel territorio studiato permette la costruzione di più impianti di cogenerazione, un risultato dell'analisi sarà anche la definizione dei bacini di conferimento, cioè l'insieme dei comuni che conferiscono biomassa allo stesso impianto. Infine, si vogliono distinguere le prestazioni dell'utilizzo dei sottoprodotti da quelle della biomassa da SRF per comprendere se e quanto sia conveniente impiantare apposite colture energetiche.

6.3 Formulazione del problema decisionale

Nello studio si vuole mettere in luce l'opportunità di utilizzare biomassa a scopo energetico in un territorio a scala provinciale, valutando tre aspetti (energetico, emissivo ed economico) parimenti importanti per questa fonte rinnovabile di energia. Le seguenti ipotesi adottate consentono una semplificazione della formulazione matematica, ma traducono anche alcune situazioni che si verificano in pratica:

- Ogni alternativa prevede l'utilizzo di tutta la biomassa disponibile;
- I sottoprodotti agricoli, forestali e del legno possono alimentare sia le centrali di cogenerazione sia le caldaie, mentre la biomassa proveniente da SRF, poiché più pregiata e costosa da ottenere, alimenta solo le centrali di cogenerazione;
- Le caldaie domestiche utilizzano solo i sottoprodotti raccolti nell'ambito dello stesso comune;
- La biomassa appartenente ad un comune si considera concentrata nel comune stesso e non distribuita sul suo territorio, di conseguenza i costi di trasporto della biomassa all'interno del comune in cui è raccolta sono trascurati;
- I parametri utilizzati nella valutazione delle alternative (rendimento, costi di gestione e di manutenzione, costo della biomassa, prezzo di vendita dell'energia prodotta) sono considerati costanti lungo tutto l'orizzonte temporale di vita degli impianti di produzione;
- L'orizzonte temporale è di 21 anni: uno per la costruzione dell'impianto e 20 per l'utilizzo delle biomasse e la coltivazione della SRF.

6.3.1 Variabili di decisione

Per definire l'impiego ottimale delle biomasse, detta a_{is} la quantità di biomassa di tipo s ($s=1$ per i sottoprodotti e $s=2$ per la SRF) presente nel comune i , si assumeranno le seguenti variabili di decisione:

- La frazione x_{ijs} della biomassa di tipo s prodotta in ciascun comune i che è conferita all'impianto di cogenerazione posto nel comune j . Naturalmente è $0 \leq x_{ijs} \leq 1$ e, in particolare, $x_{ijs} = 0$ per tutti i comuni che non fanno parte del bacino di raccolta dell'impianto del j -esimo comune. Non si considera la possibilità di costruire più di un impianto in un certo comune. Inoltre, nell'alternativa III, si ha $x_{ij1} = 0$, in quanto tutta la

biomassa dei sottoprodotti viene conferita alle caldaie domestiche.

- La presenza di un impianto nel territorio del comune j è definita dalla variabile binaria y_j . Se l'impianto di cogenerazione è attivo in j allora $y_j = 1$, altrimenti $y_j = 0$. Se per ragioni vincolistiche o di qualsiasi altro tipo non tutti i comuni possono essere sede di un impianto, le rispettive variabili saranno poste a 0.

- La presenza di caldaie domestiche nel comune k , come per l'impianto di cogenerazione, è definita dalla variabile binaria z_k . Quindi $z_k = 1$ significa che tutte le possibili caldaie sono attive nel comune k e $z_k = 0$ che esse non sono utilizzate. Per quanto si è detto quindi, le alternative I e II avranno $z_k = 0$ per ogni k , mentre l'alternativa III avrà $z_k = 1$ per ogni k . Poiché abbiamo supposto che le caldaie utilizzino solo i sottoprodotti raccolti nell'ambito del comune, il loro numero sarà calcolabile a priori sulla base della disponibilità di biomassa in quel comune a_{is} , con $s = 1$. Più precisamente il numero n_k di caldaie è valutabile a priori come rapporto tra la disponibilità locale di sottoprodotti nel comune k e il consumo en_{cald} di una caldaia, aumentato di uno e arrotondato all'intero.

6.3.2 Le funzioni obiettivo

Ad ogni passo della filiera energetica (Figura 4.1), è associato un costo energetico (MJ), emissivo (ton CO₂) ed economico (€). I costi di tutti gli impianti di cogenerazione e di tutte le caldaie sono sommati per comporre ciascuno dei tre obiettivi.

- L'obiettivo energetico da massimizzare è rappresentato dalla quantità di energia che si può estrarre dal sistema: all'energia prodotta nell'impianto di cogenerazione (EN_{out}) si sottrae l'energia utilizzata per il trasporto (EN_{tr}) e per l'eventuale crescita delle piantagioni arboree di SRF (EN_{SRF}). A questi termini va poi aggiunta l'energia prodotta dalle caldaie per l'alternativa III.

$$J_{EN} = \sum_{j=1}^N (EN_{out,j} - EN_{tr,j} - EN_{SRF,j}) \cdot y_j + \sum_{k=1}^N n_k \cdot en_{cald} \cdot z_k$$

dove N è il numero di comuni del territorio in esame.

- L'obiettivo ambientale qui considerato è la riduzione dei gas ad effetto serra: si massimizza, quindi, la quantità di emissioni di CO₂ evitate rispetto all'utilizzo di gas naturale, il meno inquinante tra i combustibili fossili. Per valutare le emissioni evitate, alle emissioni di CO₂ che sarebbero state prodotte utilizzando gas naturale per ottenere la stessa quantità e tipologia (elettrica o termica) di energia (EM_{gas}), si sottraggono le emissioni dovute al trasporto della biomassa (EM_{tr}) e alla eventuale produzione di SRF (EM_{SRF}). Conformemente alle ipotesi fatte, per le caldaie domestiche si valuta invece solo l'emissione (em_{cald}) che avrebbe una caldaia di uguale potenza alimentata a gas. Poiché si assume che il bilancio complessivo di CO₂ delle biomasse (differenza tra la CO₂ assorbita durante la crescita della pianta e quella rilasciata durante la combustione) sia circa nullo, le emissioni degli impianti di cogenerazione e delle caldaie non compaiono nell'espressione dell'obiettivo emissivo.

$$J_{EM} = \sum_{j=1}^N (EM_{gas,j} - EM_{tr,j} - EM_{SRF,j}) \cdot y_j + \sum_{k=1}^N n_k \cdot em_{cald} \cdot z_k$$

- L'obiettivo economico è calcolato con il metodo dell'analisi degli investimenti:

$$J_{EC} = \sum_{j=1}^N NPV_j \cdot y_j + \sum_{k=1}^N n_k \cdot NPV_{cald} \cdot z_k .$$

Il valore attuale netto NPV di un investimento è dato dall'investimento iniziale I_0 e dai flussi di cassa F_t in ciascun anno t , riportati all'anno zero, cioè l'anno di inizio funzionamento degli impianti, con il tasso di interesse r secondo la nota formula:

$$NPV = \sum_{t=0}^{19} \frac{F_t}{(1+r)^t} - \frac{I_0}{(1+r)^{-1}}$$

dove si suppone che la messa in opera delle caldaie e degli impianti di cogenerazione abbia la durata di un anno.

Il flusso di cassa all'anno t è dato da:

$$F_t = EC_{ricavi,t} - (EC_{acq} + EC_{ceneri} + EC_{gest} + EC_{man} + EC_{tr})$$

dove EC_{acq} indica il costo di acquisto delle biomasse, EC_{gest} il costo di gestione e EC_{man} il costo di manutenzione dell'impianto, EC_{ceneri} il costo dello smaltimento delle ceneri della combustione, EC_{tr} il costo di trasporto e, infine, $EC_{ricavi,t}$ i ricavi ottenuti dalla vendita dell'energia prodotta. Si osservi che l'unico termine che varia nel tempo è $EC_{ricavi,t}$ mentre gli altri, per le ipotesi fatte, restano costanti negli anni.

Nel successivo paragrafo sono descritte le modalità di calcolo dei termini che compongono i tre obiettivi, mentre le tabelle 1 e 2 riportano una breve descrizione dei parametri utilizzati.

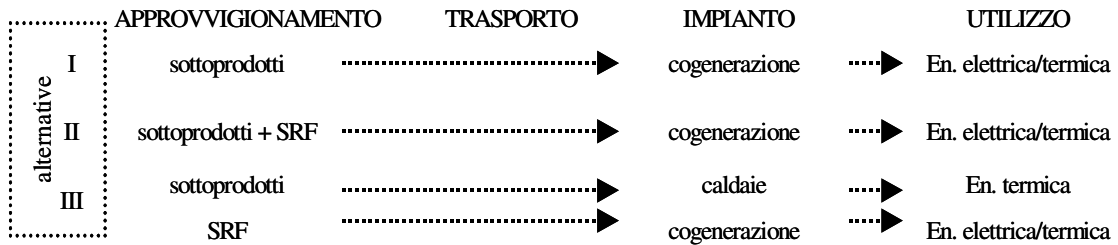


Figura 6.1: Le tre alternative di utilizzo della biomassa si distinguono per la tipologia e la quantità di biomassa in ingresso, per l'impianto considerato e per la produzione di energia termica e/o elettrica; il trasporto della biomassa dal luogo di raccolta a quello di utilizzo è considerato in tutte le alternative.

6.3.3 Calcolo dei costi e benefici legati all'utilizzo energetico delle biomasse

Esaminiamo ora più in dettaglio i termini che entrano nella formulazione degli obiettivi.

Energia prodotta

L'energia prodotta dall'impianto j attivo costituisce il ricavo energetico:

$$EN_{out,j} = \eta \cdot \sum_i \sum_s a_{is} \cdot (1 - u_s) \cdot pci_s \cdot x_{ijs} .$$

In particolare, per gli impianti di cogenerazione, si distingue la produzione elettrica da quella termica:

$$EN_{out-el,j} = \eta_{el} \cdot \sum_i \sum_s a_{is} \cdot (1 - u_s) \cdot pci_s \cdot x_{ijs}$$

$$EN_{out-term,j} = \frac{EN_{out-el,j}}{\alpha}$$

dove α è il rapporto tra la produzione elettrica e la produzione termica, mentre gli altri termini sono definiti nelle Tabella 4.1 e Tabella 6.4.

Tabella 6.3: Parametri che descrivono il territorio considerato e la biomassa presente.

	DIMENSIONE	DESCRIZIONE
d_{ij}	Km	Distanza del comune i dal comune j
a_{is}	ton tal quale	Quantità di biomassa presente nel comune i per tipo s ($s=1$ sottoprodotti, $s=2$ SRF)
u_s	$0 < \text{numero} < 1$	Frazione di umidità della biomassa di tipo s
pci_s	MJ/ton ss	Potere calorifico inferiore della biomassa di tipo s
cen_s	$0 < \text{numero} < 1$	Frazione di ceneri per tipo s di biomassa

Tabella 6.4: Parametri che compongono gli obiettivi energetico, emissivo ed economico.

	DIMENSIONE	DESCRIZIONE
$c_{en, tr}$	MJ/km/ton tq	Costo energetico di trasporto
$c_{em, tr}$	Kg CO ₂ /km/ton tq	Costo emissivo di trasporto
$c_{ec, tr}$	€/km/ton tq	Costo economico di trasporto
$c_{en, srf}$	MJ/ton ss	Costo energetico della SRF
$c_{em, srf}$	kg CO ₂ /ton ss	Costo emissivo della SRF
c_s	€/ton ss	Costo di acquisto per tipo s di biomassa
$c_{ec, srf}$	€/ton ss	Costo economico della SRF
c_{cen}	€/ton cenere	Costo smaltimento ceneri in discarica
en_{cald}	MJ	Energia prodotta da una caldaia domestica
em_{cald}	kg CO ₂	Emissioni di CO ₂ di una caldaia domestica alimentata a gas
ec_{cald}	€	Costo di una caldaia domestica
η, η_{el}	$0 < \text{numero} < 1$	Rendimento e rendimento elettrico
$\eta_{gas-el}, \eta_{gas-term}$	$0 < \text{numero} < 1$	Rendimento impianto, elettrico e termico, alimentato a gas naturale
fe_{gas}	kg CO ₂ /MJ	Fattore emissivo di un impianto alimentato a gas naturale
p_{term}, p_{el}, p_{cv}	€/kWh	Prezzi di vendita dell'energia termica, elettrica e dei certificati verdi

Emissioni evitate di CO₂

Data l'energia prodotta $EN_{out,j}$ e ricordando l'ipotesi che la crescita e la successiva combustione di biomasse non producano CO₂, le emissioni evitate sono calcolate supponendo di produrre la stessa energia con gas naturale, che può essere considerato in linea di massima il combustibile fossile più pulito, anche comprendendo le emissioni legate all'estrazione e al trasporto (Lelieveld *et al.*, 2005):

$$EM_{gas,j} = \frac{fe_{gas}}{\eta_{gas}} \cdot EN_{out,j}$$

Nel caso di impianti di cogenerazione si distinguono le emissioni evitate nella produzione di energia elettrica e termica, poiché nei due casi i rendimenti sono differenti:

$$EM_{gas,j} = \frac{fe_{gas}}{\eta_{gas-el}} \cdot EN_{out-el,j} + \frac{fe_{gas}}{\eta_{gas-term}} \cdot EN_{out-term,j}$$

Costo di trasporto della biomassa

Il costo di trasporto della biomassa dal luogo di produzione all'impianto situato nel j -

esimo comune dipende dal percorso seguito e dalla biomassa trasportata, secondo un coefficiente diverso per il costo unitario energetico, emissivo o economico. L'energia necessaria, ad esempio, per il viaggio di andata e di ritorno di un camion completamente carico dal comune i all'impianto nel comune j è pari a:

$$EN_{tr,j} = 2 \cdot c_{en,tr} \cdot \sum_i \sum_s a_{is} \cdot d_{ij} \cdot x_{ijs}$$

Le emissioni di CO₂ prodotte dal trasporto, o il costo del trasporto, si calcolano nello stesso modo utilizzando però i relativi coefficienti $c_{em,tr}$ e $c_{ec,tr}$.

Approvvigionamento della biomassa

Il costo da sostenere per l'acquisto delle biomasse $EC_{acq,j}$ è una delle variabili che più influiscono sul bilancio economico ed è dato da:

$$EC_{acq,j} = \sum_i \sum_s c_s \cdot a_{is} \cdot x_{ijs}$$

Il costo dipende, infatti, dalla diffusione dell'utilizzo energetico delle biomasse, dalla concorrenza con altre forme di utilizzo e dalla semplicità o difficoltà della raccolta. Per quanto riguarda la SRF, oltre ai costi economici (compresi in $EC_{acq,j}$), ci sono i costi energetico $EN_{srf,j}$ ed emissivo $EM_{srf,j}$. Questi costi sono legati soprattutto ai macchinari necessari per la gestione delle piantagioni arboree.

Utilizzo e vendita dell'energia prodotta

L'energia prodotta in ogni impianto di cogenerazione si suppone venduta alla Rete di Trasmissione Nazionale, nel caso di energia elettrica, o alla rete di teleriscaldamento, nel caso di energia termica. Si considera, per semplicità, un valore costante del prezzo di vendita dell'energia elettrica e termica lungo tutto l'orizzonte; nella realtà le tariffe, soprattutto quelle elettriche, variano non solo di anno in anno, ma anche nell'arco di una giornata. I certificati verdi, che sono emessi solo per i primi 8 anni di funzionamento di una centrale, sono pure considerati costanti. Complessivamente, il ricavo dalla vendita dell'energia prodotta durante tutto l'arco di vita di un impianto è dato da (dove il fattore 1/3,6 converte in KWh in MJ):

$$EC_{ricavi,t,j} = \frac{1}{3,6} \cdot [p_{term} \cdot EN_{out-term,j} + (p_{el} + p_{cv,t}) \cdot EN_{out-el,j}]$$

Valore attuale netto per gli impianti di cogenerazione

Per calcolare il valore attuale netto dell'investimento si devono considerare, oltre ai termini economici precedentemente descritti, anche tutti i termini legati alla gestione e alla manutenzione dell'impianto, nonché l'investimento iniziale. L'investimento iniziale $I_{0,j}$ comprende, per gli impianti di cogenerazione, la rete di teleriscaldamento. I costi da valutare, insieme al costo di approvvigionamento e di trasporto, sono (Duvia e Gaia, 2002):

- il costo del personale:

$$EC_{gest,j} = add \cdot stip \cdot y_j$$

dove $stip$ è lo stipendio di ogni addetto add ;

- il costo dello smaltimento delle ceneri in discarica:

$$EC_{ceneri, j} = \sum_i \sum_s c_{cen} \cdot (cen_s \cdot a_{is}) \cdot x_{ijs} ;$$

- la manutenzione, proporzionale, secondo il fattore m , all'investimento iniziale:

$$EC_{man, j} = m \cdot I_{0, j} .$$

Poiché si considerano tecnologie all'avanguardia e poco diffuse, la stima dei costi è piuttosto complessa. Ove possibile, si è quindi fatto riferimento a progetti reali, in particolare la centrale di Tirano.

Valore attuale netto per le caldaie domestiche

Nel caso delle caldaie domestiche, per calcolare il valore attuale netto si considerano l'investimento iniziale, i costi di manutenzione, i costi di acquisto dei sottoprodotti e dello smaltimento delle ceneri, mentre non ci sono costi per gli addetti alla gestione della caldaia. Il costo di trasporto è, per le ipotesi fatte, nullo. Infine, si considerano ricavi i costi evitati per l'acquisto dell'energia termica.

6.3.4 Vincoli e risoluzione

Come già anticipato, non è detto che tutti i comuni considerati possano ospitare una centrale: è quindi possibile imporre un vincolo sui valori di y_j . Per gli impianti di cogenerazione, ad esempio, è ragionevole porre $y_i = 0$ per tutti i comuni con meno di 3.500 abitanti: solo un numero di abitanti superiore a questa soglia giustifica la costruzione di una rete di teleriscaldamento (Cozzini, 2000).

Per le caldaie domestiche, quindi solo per l'alternativa III, $z_k = 1$ per ogni k ; mentre $z_k \equiv 0$ nelle altre due alternative, dove i sottoprodotti alimentano solo impianti di cogenerazione.

Si impongono inoltre i seguenti vincoli:

- Gli impianti di cogenerazione hanno la stessa taglia e quindi la stessa capacità di combustione. Tuttavia si suppone che ci sia una certa elasticità nell'utilizzo dell'impianto. La biomassa conferita ad ogni impianto di cogenerazione non è quindi vincolata ad uguagliare esattamente la capacità, ma può essere compresa in un intorno della capacità nominale dell'impianto $k_{impianto}$ (vincolo capacitivo):

$$(1-\xi) \cdot k_{impianto} \leq \sum_k \sum_s a_{is} \cdot x_{ijs} \cdot (1-u_s) \leq (1+\xi) \cdot k_{impianto} \quad \forall j$$

dove ξ è la percentuale di sotto o sovrautilizzo.

- Poiché si intende sfruttare tutta la biomassa disponibile in un certo scenario, si pone un vincolo sul numero di impianti di cogenerazione dato da $\sum y_j = \text{int}(M+1)$, dove M è il rapporto tra tutta la biomassa disponibile per alimentare gli impianti e il consumo del singolo impianto. Il termine $\text{int}(M+1)$ indica la parte intera di $M+1$; si noti che per sfruttare completamente la biomassa, può essere necessario che uno o più impianti non lavorino alla loro massima potenzialità.

- Un comune può conferire la propria biomassa solo in un comune dove la centrale di cogenerazione è attivata:

$$x_{ijs} \leq y_j \quad \forall s, j .$$

La risoluzione del problema di ottimizzazione ($\max J_{EN}$, $\max J_{EM}$, $\max J_{EC}$), che è di tipo lineare e misto (variabili reali e variabili binarie) e ha alcune centinaia di variabili di decisione, è stata effettuata con l'ausilio di AMPL, linguaggio per la risoluzione di problemi di programmazione matematica, in particolare è stato usato il risolutore di programmazione matematica CPLEX (Fourer *et al.*, 2002).

6.4 Caso di studio: applicazione alla provincia di Cremona

Il modello sopra illustrato è stato applicato alla provincia di Cremona, nell'ambito della stesura del Piano Energetico Ambientale Provinciale (2003) che ha dato ampio spazio alle risorse rinnovabili. Il settore agro-alimentare riveste grande importanza nella Provincia. La superficie agraria totale occupa l'82% del territorio provinciale; di questa superficie più del 90% è effettivamente utilizzato per colture. Le superfici forestali sono invece molto ridotte, pari al 4% circa della superficie territoriale, e in gran parte utilizzate per i pioppeti (Istat, 2000). La lavorazione del legno è diffusa nella parte meridionale della provincia, dove è presente un distretto della lavorazione del legno. In Tabella 6.5 sono riportate le quantità di sottoprodotti e di SRF, stimate secondo il metodo esposto nel par. 6.2.1; in Figura 6.2 è rappresentata la distribuzione delle biomasse sul territorio della provincia. I dati necessari relativi alla provincia di Cremona e ai suoi comuni, sono reperibili sui censimenti Istat dell'agricoltura (2000) e dell'industria (1996).

Tabella 6.5: Stima della quantità di biomasse utilizzabili nella provincia di Cremona.

SOTTOPRODOTTI	QUANTITÀ UTILIZZABILE TON SS/ANNO	%	SRF	QUANTITÀ UTILIZZABILE TON SS/ANNO
Agricolo	124.046	95,7	SRF	92.158
Industriale	9.453	3,9		
Forestale	736	0,4		
Totale	134.235	100		

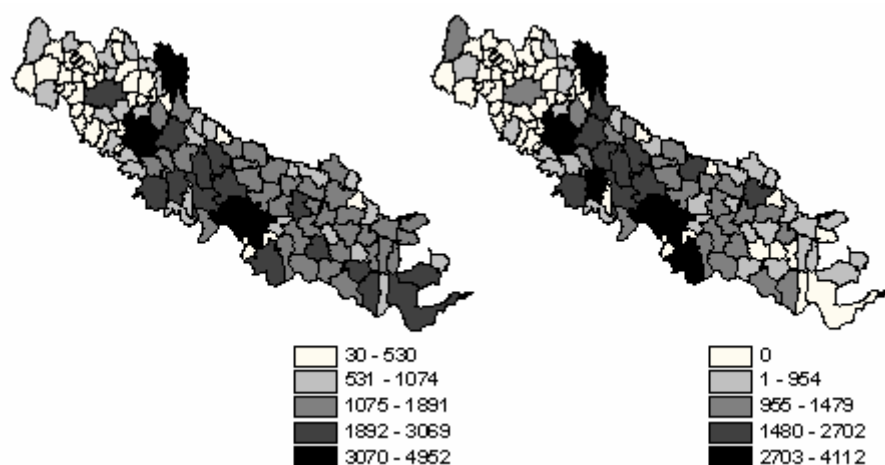


Figura 6.2: mappa della disponibilità di biomasse residuali (sinistra) e di biomasse da SRF (destra) in provincia di Cremona.

I valori ottimi delle tre funzioni obiettivo per la provincia di Cremona sono riportati in Tabella 6.6; si osserva che sono largamente positivi e si può quindi affermare che l'utilizzo a scopo energetico delle biomasse è conveniente sotto tutti e tre gli aspetti analizzati. L'utilizzo energetico delle biomasse nella Provincia risulta positivo

principalmente grazie alla vocazione agricola del territorio: non solo c'è un'elevata densità di colture da cui si possono recuperare i sottoprodotti, ma è anche disponibile, grazie ai *set-aside*, una vasta superficie (circa 8.600 ha) da destinare alla SRF.

Considerando come riferimento i consumi del 1996 di energia elettrica, pari a 2.047 GWh (Regione Lombardia, 2002), le biomasse possono soddisfare dal 3 al 5% del fabbisogno della Provincia. Nel 1996, inoltre, il consumo di combustibili fossili interno alla provincia, senza considerare l'energia elettrica importata, è stato pari a 789 ktep: le biomasse possono sostituire dal 4,7 all'8,7% dei combustibili fossili utilizzati. L'utilizzo delle biomasse a scopo energetico permette inoltre di ridurre le emissioni di CO₂ dal 5 all'8,4%, rispetto alle emissioni stimate, per il 2001, pari a 2.538 kton (Arpa Lombardia e Regione Lombardia, 2003). Si ricorda che il Protocollo di Kyoto prevede per l'Italia una riduzione, entro il 2008-2012, delle emissioni di gas serra del 6,5% rispetto ai valori del 1990. Per quanto riguarda la valutazione economica, il tempo di ritorno dell'investimento è compreso tra i due anni e mezzo e i quattro anni.

Tabella 6.6: Valori ottimi degli obiettivi energetico, emissivo ed economico per le tre alternative; confronto con il consumo di energia elettrica e di combustibili fossili del 1996 e con le emissioni di CO₂ del 2001.

	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
n° impianti di cogenerazione	7	12	5
n° caldaie domestiche	0	0	3.630
Obiettivo Energetico (10 ⁶ MJ)	1.557	2.581	2.869
% energia elettrica sostituita da biomasse (1996, consumo di 2.047 GWh)	3%	5%	3%
% tep sostituita da biomasse (1996, consumo di 789 ktep)	4,7 %	7,8 %	8,7 %
Obiettivo Emissivo (10 ³ ton CO ₂)	127	214	214
% emissioni evitate con biomasse (2001, emissione di 2.538 kton CO ₂)	5,0 %	8,4 %	8,4 %
Obiettivo Economico (10 ⁶ €)	297	361	462
Tempo di Ritorno dell'investimento	2,4 anni	3,3 anni	impianti cogen. 2,4 anni caldaie domest. 3,8 anni

La SRF contribuisce positivamente: l'alternativa II ha un valore ottimo dell'obiettivo energetico superiore del 65% rispetto a quello dell'alternativa I. Il valore ottimo dell'obiettivo economico migliora però solo del 21% perché la SRF ha alte rese, ma è anche più costosa dei sottoprodotti. I valori più elevati degli obiettivi sono raggiunti dall'alternativa III: le caldaie domestiche hanno un rendimento elevato e l'utilizzo dei sottoprodotti nel comune stesso in cui sono raccolti comporta, nella formulazione adottata, costi di trasporto nulli. Le biomasse prodotte da SRF, invece, sono destinate ad impianti di cogenerazione che producono energia termica, anche in questo caso con rendimenti elevati, ed elettrica, più preziosa per quanto riguarda la vendita (soprattutto grazie ai certificati verdi) e che consente di evitare l'emissione di maggiori quantità di CO₂ (la produzione di energia elettrica con gas naturale emette più CO₂ rispetto alla produzione di energia termica poiché il rendimento elettrico è inferiore a quello termico).

Si osserva che, se si considerano tutti e tre gli obiettivi contemporaneamente, l'alternativa III praticamente domina la II, la quale a sua volta domina la I. Ciò significa che un utilizzo intensivo delle biomasse in provincia di Cremona sembra essere molto

positivo: più se ne utilizzano, più si ottengono benefici elevati sia dal punto di vista energetico, sia emissivo (come era scontato che accadesse), ma anche dal punto di vista economico.

Per ogni alternativa, la risoluzione distinta dei tre problemi di ottimizzazione energetico, emissivo ed economico definisce la localizzazione delle centrali e dei relativi bacini; è interessante osservare che, ad eccezione di pochi comuni, le soluzioni ottimali dei tre problemi comportano le stesse localizzazioni e gli stessi bacini. Questo significa che, in ogni alternativa, la localizzazione e il relativo bacino che massimizzano un obiettivo massimizzano anche gli altri due.

A titolo di esempio, la mappa di Figura 6.3 è relativa all'obiettivo energetico dell'alternativa I: i comuni rappresentati con lo stesso colore conferiscono la propria biomassa allo stesso impianto, quelli in bianco conferiscono la biomassa a più impianti. I bacini di conferimento individuati servono soprattutto come punto di partenza per la definizione di una programmazione più dettagliata dell'utilizzo della biomassa. Là dove ci sono bacini costituiti da comuni non confinanti, ad esempio aggregando i bacini 1 e 6 al bacino 4 (Cremona) si possono prevedere impianti di dimensioni maggiori, più utili per servire una città qual è il comune di Cremona. Analogamente, si possono progettare impianti di dimensioni inferiori per quei bacini che sono particolarmente frammentati.

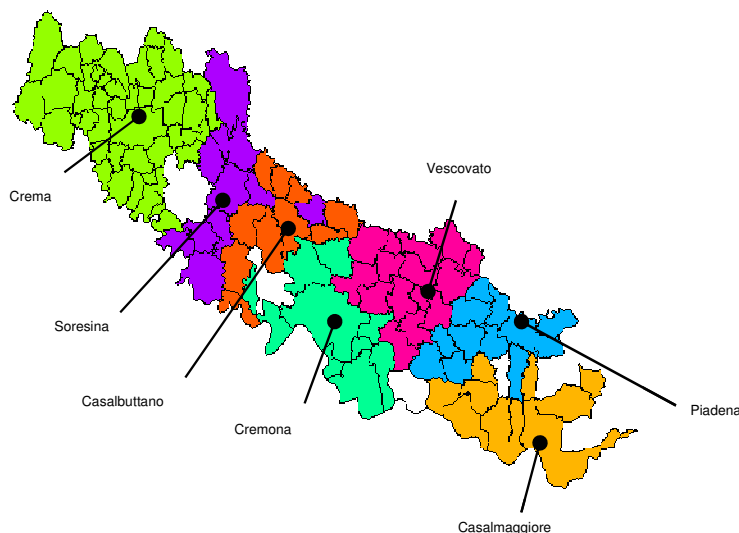


Figura 6.3: Localizzazione impianti e bacini di conferimento, caso I – obiettivo energetico.

6.5 Conclusioni

Il lavoro qui presentato propone una metodologia per la pianificazione dell'utilizzo delle biomasse considerando produzione, raccolta, trasporto e due differenti tipi di impianti di produzione dell'energia. La metodologia viene applicata alla provincia di Cremona ottenendo risultati significativi. Il modello proposto permette di determinare il numero di impianti, la localizzazione e i bacini di conferimento ottimi, valutando la prestazione delle alternative analizzate dal confronto di tre obiettivi distinti (energetico, emissivo e economico).

L'approccio proposto permette anche di stimare la quantità di biomassa disponibile sul territorio in analisi. Nel caso di Cremona, provincia a vocazione agricola, prevalgono i sottoprodotti dell'agricoltura, ma il metodo presentato ben si adatta a realtà diverse: territori montani, ad esempio, in cui l'agricoltura è in secondo piano rispetto alla

presenza di aree boschive. È possibile, inoltre, valutare se destinare a SRF una parte della superficie agraria è conveniente secondo le tre funzioni obiettivo formulate.

I risultati ottenuti mostrano che l'utilizzo energetico delle biomasse è positivo in una zona di pianura con agricoltura intensiva e che i vantaggi derivano non solo dal possibile risparmio di combustibili fossili, ma anche dalla possibilità di evitare emissioni di CO₂ e di avere ritorni dall'investimento economico iniziale. Aver ottenuto risultati largamente positivi significa che, anche includendo altri aspetti qui trascurati, si dovrebbero ottenere valori probabilmente inferiori delle funzioni obiettivo, ma comunque positivi e tali da permettere una valutazione complessivamente favorevole all'utilizzo energetico delle biomasse. Bisogna osservare che l'emissione, e quindi la vendita, di certificati verdi contribuisce in larga misura al risultato positivo dell'obiettivo economico. I certificati verdi, d'altra parte, costituiscono non solo un incentivo alla diffusione delle fonti rinnovabili di energia in Italia, ma servono anche per internalizzare quei costi esterni dell'inquinamento a scala globale che non sono normalmente considerati nelle analisi costi-benefici. Per questo si è ritenuto opportuno tenerne conto.

Per una valutazione completa dell'utilizzo di biomasse restano da indagare alcuni aspetti, che saranno oggetto di successivi lavori. Devono essere valutate le emissioni atmosferiche a scala locale, soprattutto particolato e NO_x, e quelle solide, tenendo anche conto che esistono metodi per il recupero e il riutilizzo delle ceneri. Il confronto tra diverse tecnologie di trasformazione può essere allargato fino a comprendere impianti di taglia maggiore, come centrali da 10 MWe, oppure impianti che producono bio-combustibili liquidi o gassosi. Anche il confronto con utilizzi diversi delle biomasse (cellulosa, materiale per costruzione di mobili, fertilizzanti o ammendanti per suoli agricoli) dovrebbe essere considerato, poiché la concorrenza con altre filiere può influire notevolmente sull'utilizzo energetico.

6.6 Bibliografia

Anpa, Onr, 2001. I rifiuti del comparto agro-alimentare, Studio di settore, n. 11.

Arpa Lombardia e Regione Lombardia (2003). Emissioni in provincia di Cremona nel 2001 – database INEMAR. [online] URL: www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/inemarhome.

Berndes G., C. Azar, T. Kåberger, D. Abrahamson, 2001. The feasibility of large-scale lignocellulose-based bioenergy production, *Biomass & Bioenergy* 20: 371-383.

Brè A., 2002. Relazione tecnica per l'ampliamento della centrale di Tirano con installazione di un impianto di cogenerazione elettrica da 1.100 kW, Comune di Tirano e Provincia di Sondrio.

Cappanera P., 2000. Discrete facility location and routing of obnoxious activities, tesi di dottorato, XII ciclo, Università degli Studi di Milano.

Caruso C., A. Colorni, M. Paruccini, 1993. The regional urban solid waste management system: a modelling approach, *European Journal of Operational Research* 70: 16-30.

Cerullo S., A. Pellegrini, 2002. Stima delle quantità di residui legnosi prodotti in Italia, Atti del Convegno "Pellet per l'energia", Verona 23 marzo 2002.

Combs J., 2002. Biomass energy: an industry waiting for growth, *Renewable Energy World*, Review issue 2002-03.

Commissione Europea, 2000. Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili, Libro Bianco per una strategia e un piano di azione della Comunità, www.europa.eu.int.

Cozzini M., 2000. L'utilizzo di biomasse legnose per sistemi di teleriscaldamento e cogenerazione., Foglio di collegamento – settembre 2000, AIRU-Associazione Italiana Riscaldamento Urbano.

Duvia A., Gaia M., 2002. ORC plants for power production from biomass from 0,4 to 1,5 MWe:

Technology, efficiency, practical experiences and economy, 7th Holzenergie Synopsium, ETH Zurich, 18 October 2002.

Enea, 2000. Piano Energetico della Regione Lombardia, Rapporto conclusivo relativo alla biomassa.

Enea, 2002. Riscaldamento dei grandi edifici con combustibili legnosi – informazioni tecniche di base, www.bioheat.it.

Fourer R., D.M. Gay, B.W. Kernighan, 2002. AMPL : a modeling language for mathematical programming, Duxbury Press and Brooks/Cole Publishing Company.

Freppaz D., R. Minciardi, M. Robba, M. Rovatti, R. Sacile, A. Taramasso, 2004. Optimizing forest biomass exploitation for energy supply at a regional level, *Biomass & Bioenergy* 26:15-25.

Gaia M., K. Scheidegger, R. Bini, P. Bertuzzo, 2000. Small scale biomass powered CHP plants featuring thermal oil boiler and organic Rankine cycle turbogenerators, 1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Seville (Spain), 5-9 June 2000.

Istat (1996). Censimento Intermedio dell'Industria. [online] URL: <http://www.istat.it/censimenti/industria/>

Istat, 2000. V Censimento Generale dell'Agricoltura, Roma, 2001. [online] URL: <http://www.istat.it/censimenti/agricoltura/>

Klass D.L., 1998. Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, Academic Press, San Diego, California.

Lelieveld J., S. Lechtenböhmer, S.S. Assonov, C.A.M. Brenninkmeijer, C. Dienst, M. Fishedick, T. Hanke, 2005. Low methane leakage from gas pipelines, *Nature* 434: 841-842.

McKendry P., 2002a. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass, *Bioresource Technology* 83: 37-46.

McKendry P., 2002b. Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies, *Bioresource Technology* 83:47-54.

Provincia di Cremona, 2003. Piano Energetico Ambientale Provinciale, Cremona. [online] URL: <http://www.provincia.cremona.it/agenda21/>

Regione Lombardia, 2002. Programma energetico regionale: indirizzi e obiettivi di politica energetica per la Lombardia, Milano.

Riva G., 2003. Impianti della giusta taglia, qualEnergia.

Roman U., J. Turnbull, 1997. Integrated biomass energy systems and emissions of carbon dioxide, *Biomass & Bioenergy* 13: 333-343.

Rosch C., M. Kaltschmitt, 1999. Energy from biomass – do non technical barriers prevent an increased use?, *Biomass & Bioenergy* 16: 347-356.

Sims R., J. Gigler, 2002. The brilliance of bioenergy, small projects using biomass, *Renewable Energy World* 1.

Stadtwaerme Lienz, 2001. Heat and electricity for the city of Lienz. [online] URL: www.stadtwaerme-lienz.at

Voivontas D., D. Assimacopoulos, E.G. Koukios, 2001. Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method, *Biomass & Bioenergy* 20: 101-112.

7 Produrre biocombustibili a emissioni zero⁴

Le potenzialità di un complesso sistema energetico, alimentato a biomasse e carbone, sono esplorate in questo capitolo. L'impianto di gassificazione, che si immagina localizzato in Illinois (USA), produce sia combustibili sintetici Fischer-Tropsch (FTL) sia energia elettrica; inoltre, l'impianto è dotato di tecnologia per la cattura e stoccaggio (CCS) della CO₂ nel sottosuolo. Le biomasse che alimentano l'impianto provengono dalla coltivazione in praterie a elevata biodiversità e bassi input colturali (*mixed prairie-grasses*) su terreni agricoli degradati; il carbone invece proviene dalle miniere dell'Illinois.

L'obiettivo di un tale impianto è quello di produrre biocombustibili ed energia elettrica ad emissioni nulle di carbonio in atmosfera sfruttando sia la CCS sia il contributo delle biomasse e, in particolare, delle *prairie grasses* grazie alle quali il carbonio è anche accumulato nel suolo in modo permanente. Il carbonio sequestrato dall'atmosfera è costituito dunque da quello sequestrato grazie alla crescita della biomassa nel suolo e nelle radici sia da quello catturato e stoccato nel suolo che proviene dall'impianto di conversione. Il rapporto biomassa/carbone in ingresso all'impianto è quindi stimato per rendere pari a zero le emissioni in atmosfera di carbonio.

In queste condizioni, le emissioni del carbonio dovute al trasporto del combustibile della centrale (biomasse e carbone), alla relativa conversione in elettricità e combustibile, l'utilizzo dei combustibili FTL sono uguali all'assorbimento di carbonio nelle biomasse, cioè il carbonio contenuto nella biomassa raccolta più quello immagazzinato nelle radici e nel suolo. Questa strategia consente di produrre combustibili FTL caratterizzati da emissioni di gas serra pari a zero con circa 1/3 della biomassa che sarebbe necessaria per combustibili liquidi convenzionali quali l'etanolo cellulosico. Nell'ambito di una politica del carbonio sufficientemente stringente da motivare il ricorso al CCS per la produzione di energia da carbone, benzina e diesel sintetici con emissioni di GHG nette pari a zero potrebbero essere competitivi con i combustibili convenzionali derivati da petrolio a 50 \$/barile. Infine, si mostra che anche dal punto di vista dell'imprenditore agricolo, la coltivazione di biomasse in praterie per l'utilizzo in sistemi energetici come quello ipotizzato potrebbe essere remunerativa come la coltivazione tradizionale di granoturco in presenza di incentivi. Nel nostro caso, il reddito dell'imprenditore agricolo è raggiunto senza incentivi statali (come in Italia, anche negli USA sono distribuiti incentivi agli agricoltori), ma assumendo che il valore del carbonio sia pari a 100 \$/t.

7.1 Introduzione

⁴ Il lavoro presentato in questo capitolo è frutto della collaborazione instaurata con Robert Williams ed Eric Larson del Princeton Environmental Institute, Princeton University durante il soggiorno all'estero del 2007. Ha inoltre collaborato al lavoro Stefano Consonni del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Milano. Il presente capitolo è tratto da un articolo in fase di stesura.

I trasporti contribuiscono significativamente alle emissioni di CO₂ in atmosfera e ridurre le emissioni di questo settore è una delle sfide più difficili (tantissime fonti diffuse, netto monopolio di benzina e diesel), ma più pressanti, vista la sua forte crescita. Una soluzione interessante consiste nello sfruttare il potenziale di sequestro fotosintetico delle emissioni di CO₂ nelle biomasse e quindi trasformare le biomasse da fonte di energia a emissioni di carbonio pari a zero a fonte di energia a emissioni di carbonio negative. Il capitolo è suddiviso in due parti: la prima consiste nella descrizione del processo di gassificazione di carbone e biomassa per co-produrre elettricità e combustibili liquidi di Fischer-Tropsch (FTL) con CCS, come discusso in Williams *et al.* (2006). L'utilizzo di carbone è desiderabile per sfruttarne le economie di scala e il basso costo di approvvigionamento. La seconda parte consiste nell'approfondire il tema del sequestro del carbonio nel suolo e nelle radici attraverso le praterie ad elevata biodiversità (MPG) coltivate su terreni degradati per il precedente utilizzo agricolo intensivo, come proposto in Tilman *et al.* (2006).

In questo lavoro viene analizzato un impianto, che si assume localizzato nel sud dell'Illinois, alimentato a biomasse raccolte da praterie ad elevata biodiversità. Si immagina che queste praterie siano stabilite su terreni precedentemente coltivati con pratiche agricole intensive a granoturco. L'analisi economica è svolta secondo la prospettiva dell'imprenditore agricolo, per comprendere come il suo reddito cambi passando dalla coltivazione del granoturco a quella delle biomasse, ipotizzando che queste siano vendute all'impianto di gassificazione alimentato anche a carbone. Nello studio si ipotizza che il valore del carbonio sia pari a 100 \$/tC_{eq}, che equivale al prezzo minimo del carbonio per rendere economicamente fattibile la cattura e lo stoccaggio della CO₂ in uscita da impianti a carbone e, in particolare, da centrali elettriche alimentate a carbone. La mitigazione dei cambiamenti climatici per la stabilizzazione della concentrazione atmosferica della CO₂ ad un livello inferiore al raddoppio del livello pre-industriale non può che essere raggiunta o con l'abbandono completo del carbone o con l'introduzione delle tecnologie del CCS negli impianti alimentati a carbone (principalmente centrali elettriche). Affinché una nuova centrale a carbone con CCS produca energia elettrica a costi inferiori rispetto ad una centrale analoga senza CCS, il prezzo minimo del carbonio deve essere di 100 \$/tC.

Se le biomasse dovranno in futuro contribuire significativamente alla produzione di combustibili a basso contenuto di carbonio, dovranno essere coltivate sia su terreni agricoli sia su terreni degradati. Tuttavia, coltivare biomasse su terreni agricoli porta ad un aumento dei prezzi nel settore alimentare, come sta accadendo negli Stati Uniti grazie alla diffusione degli impianti di produzione di etanolo finanziati da abbondanti sussidi statali (The Economist, 2007). Si tenga però presente che non esiste un vero e proprio libero mercato per le produzioni alimentari, visto che il governo federale negli USA (ma lo stesso succede in Italia e Europa) da sempre fornisce abbondanti sovvenzioni per garantire un reddito minimo all'agricoltore. La coltivazione delle biomasse su terreni agricoli, secondo alcuni, potrebbe in futuro portare alla eliminazione dei sussidi per l'agricoltura. In particolare, in assenza di sussidi per la produzione di etanolo, se le MPG fossero coltivate su terreni agricoli in precedenza utilizzati per produrre granoturco, si riuscirebbero ad avere prezzi del granoturco tali da eliminare la necessità di sussidi al settore.

7.1.1 Tecnologie per la conversione in energia

In questo studio vengono considerate le stesse tecnologie di conversione e gli stessi impianti discussi in Williams *et al.* (2006), ma supponendo di alimentare l'impianto con

biomasse da prateria ad alta biodiversità anziché il panico (*Panicum virgatum*, *switchgrass*). Per mostrare l'importanza cruciale del CCS e dell'utilizzo combinato di biomassa e carbone, le tre seguenti alternative tecnologiche sono confrontate:

- impianto alimentato solo a carbone con emissione in atmosfera della CO₂ (C-FT-V);
- impianto alimentato solo a carbone con cattura e stoccaggio della CO₂ e dell'H₂S (C-FT-CoC);
- impianto alimentato a carbone e biomasse con cattura e stoccaggio della CO₂ e dell'H₂S (CB-FT-CoC).

7.1.2 Biomasse in ingresso

L'idea di coltivare biomasse da prateria ad alta biodiversità deriva dal lavoro di Tilman e dei suoi collaboratori presso la University del Minnesota che hanno effettuato numerosi esperimenti sulle *prairie grasses* fino dal 1994 coltivando su terreni impoveriti di carbonio e fortemente degradati a Cedar Creek Natural History nelle grandi pianure settentrionali degli Stati Uniti (Tilman *et al.*, 2006). L'esperimento è stato motivato:

- da considerazioni sul potenziale di utilizzo delle terre degradate per la produzione di biomasse per l'energia;
- da preoccupazioni circa la perdita di carbonio dal suolo e dalle radici che avviene quando i terreni sono convertiti da prateria ad agricoltura tradizionale intensiva;
- da preoccupazioni circa la concorrenza sui terreni agricoli fertili delle biomasse per l'energia con la produzione alimentare;
- da preoccupazioni circa la perdita di biodiversità connessa con la produzione di coltivazioni di monoculture di qualsiasi tipo e di colture per l'energia in particolare.

La preoccupazione per la perdita di biodiversità ha portato ad essere cauti verso lo sviluppo di strategie di mitigazione dei CCG attraverso colture energetiche a monoculture. Un recente rapporto dell'Agenzia di Valutazione dell'Ambiente dei Paesi Bassi (MNP, 2006), è stato commissionato proprio per esplorare le opzioni che potrebbero contribuire alla realizzazione dell'Obiettivo 2010 della Convenzione sulla biodiversità. In particolare, il rapporto presta particolare attenzione alle implicazioni a lungo termine dei biocarburanti e mette in guardia dal fare dei biocarburanti il maggior punto focale degli sforzi di attenuazione dei CCG, a causa delle possibili implicazioni sulla biodiversità. La relazione afferma che nel 2050 il guadagno di biodiversità (+1%) dal minor cambiamento climatico e dalla riduzione della deposizione di azoto a causa del minor combustibile fossile bruciato non compensa la perdita dell'habitat naturale (-2%) per la produzione di biocarburanti su circa il 10% della superficie agricola globale.

Pertanto, il nostro obiettivo è quello di esplorare altre opzioni di attenuazione, differenti dai biocarburanti, quali etanolo e biodiesel, che possono avere effetti meno negativi, o addirittura fornire benefici per la conservazione della biodiversità.

Dal nostro punto di vista i più importanti risultati dello studio Tilman e al. (2006) sono che

- la resa sostenibile delle *prairie grasses* aumenta monotonicamente con il numero di specie;
- l'accumulo di carbonio nel suolo più quello nelle radici, aumenta monotonicamente con il numero di specie;
- è probabile che l'accumulo di carbonio nel suolo continui per un secolo o più, anche se la gran parte dell'accumulo si ha nei primi 30 anni;

- una volta che le *prairie grasses* sono state impiantate, solo piccoli input agricoli sono necessari, grazie alla presenza di specie azotofissatrici;
- la pratica agricola di tagliare e raccogliere le *prairie grasses* ogni anno dopo la senescenza è sostenibile;
- le *prairie grasses* sono composte da un mix di sedici specie e comportano quindi aumenti di biodiversità locale, in contrasto alla perdita di biodiversità che deriverebbero dalle monoculture.

7.2 Localizzazione dell'impianto di conversione

L'Illinois è stato scelto sia per la disponibilità di terreno agricolo utilizzato e marginale, sia per la presenza di carbone e, infine, per la presenza di siti adatti allo stoccaggio del carbonio nel sottosuolo. Si ipotizza di coltivare *prairie grasses* per l'energia sul $\sim 10^5$ ettari di terreno ora piantati a mais tramite coltivazione convenzionale in quattro regioni nell'Illinois meridionale: Bond, Clinton, Marion, e Madison, mostrate in Figura 7.1. Abbiamo scelto queste quattro regioni limitrofe perché vi sono rese di mais inferiori rispetto ad altre province dell'Illinois: 130-152 (in media 142) bushel/acre⁵ (bu/ac) contro la media dello stato di 164 bu/ac. Si immagina quindi che, dal punto di vista dell'imprenditore agricolo, sarebbe più facile convertire queste zone agricole meno produttive ad una nuova coltura energetica.

Si suppone di localizzare l'impianto di conversione nella contea Clinton. Questa posizione è baricentrica rispetto sia alle quattro contee che forniscono le biomasse in ingresso all'impianto, sia alle miniere di carbone (Figura 7.2).

Anche i siti per il sequestro del carbonio nel sottosuolo sono vicini alla contea di Clinton. Ci sono grandi opportunità per il sequestro di carbonio nel bacino Illinois (la maggior parte nell'area dell'Illinois, Indiana occidentale e Kentucky occidentale); queste potenzialità sono state attentamente studiate dal consorzio per il sequestro geologico del Midwest (Midwest Geological Sequestration Consortium; MGSC, 2005). In particolare, questi studi indicano il Mt Simon Sandstone come una possibile destinazione per il sequestro di anidride carbonica (Figura 7.2).

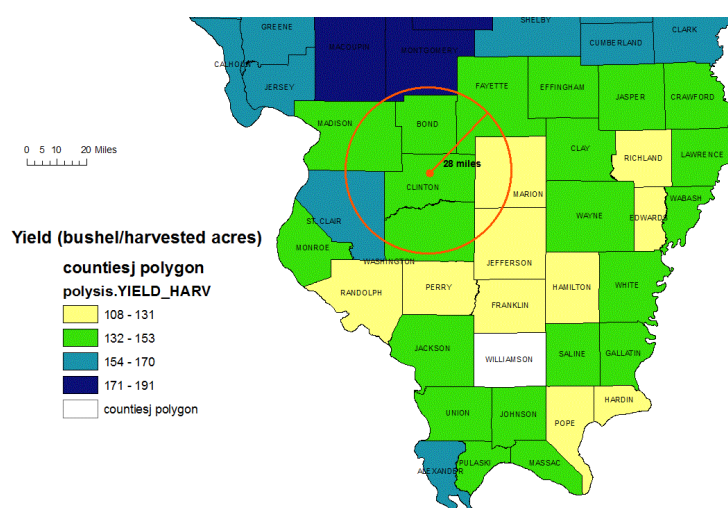


Figura 7.1: mappa delle contee considerate, delle rese in mais.

⁵ L'unità di misura dei bushel è tipicamente americana, utilizzata per il peso secco delle beni agricoli quali, appunto, il raccolto di mais. Un bushel di mais corrisponde a 56 lb e quindi a circa 25,401 kg. Un acro corrisponde a 0,40469 ettari. Di conseguenza, la resa media di 142 bushel per acro corrisponde a circa 9 tonnellate per ettaro.

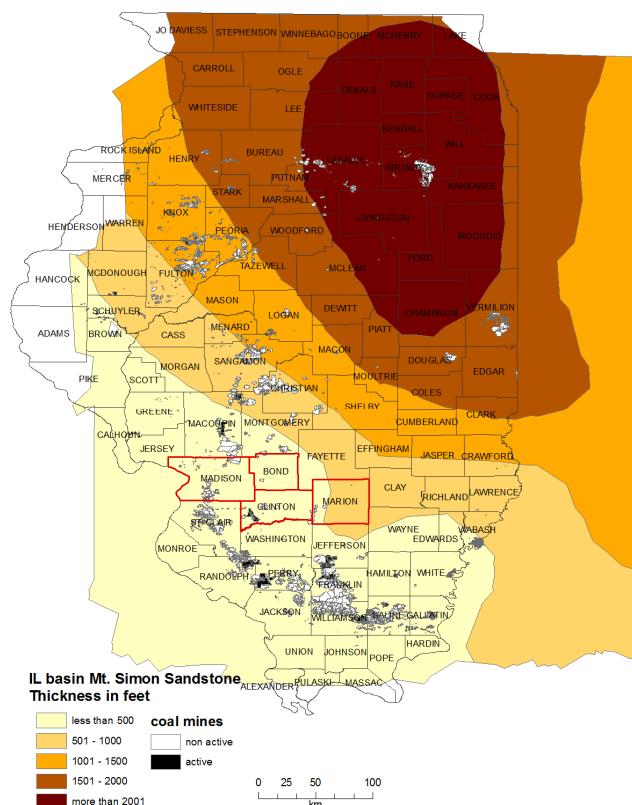


Figura 7.2: nella mappa sono indicate le miniere di carbone funzionanti (in nero) e non (in bianco) nel 1996 (Stiff, 1997). È inoltre indicato lo spessore del Mt. Simon Sandstone (MGSC, 2005); la CCS è possibile per spessore maggiori di 501 feet.

7.3 Approvvigionamento dei combustibili

In questo caso di studio dell'Illinois, il carbone proviene dalle miniere presenti nell'Illinois stesso, mentre le biomasse sono coltivate su terreno agricolo di quattro contee situate nella parte meridionale dello stato. Le caratteristiche dei due combustibili sono elencate nella Tabella 7.1.

Tabella 7.1: Caratteristiche dei combustibili in ingresso, biomassa e carbone, e dei liquidi FTL in uscita.

BIOMASS		
LHV of dry matter	17,630	MJ _{LHV} /kg _{dry biom}
HHV of dry matter	18,730	MJ _{HHV} /kg _{dry biom}
Moisture content	20%	%
LHV	13,604	MJ _{LHV} /kg
Ash content	21%	%
Carbon content	0,498	kg _C /kg _{dry biom}
	29,286	kg _C /GJ _{LHV}
Soil & root C storage rate	0,6	t _C /t _{C dry biom}
	0,299	t _C /t _{dry biom}
COAL		
LHV	25,30	MJ _{LHV} /kg
Carbon content	0,637	kg _C /kg
	25,18	kg _C /GJ _{LHV}
FT-L		
LHV FT-L	43,4	MJ/kg
Carbon content	0,8808	kg _C /kg _{FT-L}
	20,29	kg _C /GJ _{LHV}

7.3.1 Approvvigionamento del carbone

Circa il 65% della superficie dell'Illinois copre giacimenti di carbone. Le riserve di carbone recuperabile in Illinois rappresentano quasi 1/10 delle totali riserve degli Stati Uniti, ma solo una piccola parte di queste riserve è effettivamente in produzione (l'Illinois si colloca al nono posto tra gli Stati produttori di carbone, estraendo più di 32 milioni di tonnellate di carbone ogni anno in 10 contee). Ciò è principalmente dovuto a due fattori: il carbone bituminoso estratto in Illinois ha un più elevato contenuto di zolfo del carbone occidentale, e le condizioni in miniera sono spesso sfavorevoli. Depositi di carbone sono concentrati nel Bacino Illinois, nella parte meridionale e orientale dello stato.

Nel 2005, il prezzo di vendita medio del mercato libero del carbone dell'Illinois era 32,70 \$/tonnellate, mentre il prezzo medio di vendita degli Stati Uniti era 26,00 \$/tonnellata (EIA, 2007). I principali siti minerari sono localizzati nelle regioni Gallatin (Galatia Mine/The American Coal Company), Jackson, Macoupin, Perry, Randolph, Saline, Sangamon, Vermilion, Wabash e White. In Illinois, quasi il 49% dei 16 miliardi di MWh prodotte ogni anno, proviene da impianti a carbone, mentre 48% proviene da centrali nucleari (Tabella 7.2).

Tabella 7.2: Generazione di elettricità in Illinois, marzo 2007 (EIA, 2007).

	Electricity generation per source thousand MWh	Share of Illinois	Share of U.S.
Petroleum-Fired	11	0,07%	0.3%
Natural Gas-Fired	382	2,29%	0.7%
Coal-Fired	8,118	48,67%	5.1%
Nuclear	8,017	48,07%	12.5%
Hydroelectric	11	0,07%	0.0%
Other Renewables	139	0,83%	1.6%
Total	16,678	100 %	5.2%

7.3.2 Approvvigionamento delle biomasse

Le biomasse possono contribuire in maniera significativa all'industria di trasformazione del carbone in combustibili (*coal-to-liquid*), fornendo, nel sistema energetico qui proposto, quella quantità di combustibile che permette di avere emissioni di carbonio in atmosfera pari a zero. Tilman *et al.* (2006) mostrano che la *prairie grasses* hanno un grande potenziale come fonte della biomassa e possono affrontare diverse questioni importanti, quali la conservazione della biodiversità, il restauro del suolo, bassi input e alti guadagni energetici.

In questa analisi, sono presi in considerazione flussi economici e di gas serra (GHG) coinvolti nella attività agricole di raccolta, di trasformazione e di trasporto della biomassa. Poiché le *prairie grasses* sono perenni, con un ciclo di vita di circa 30 anni, si presume che l'installazione iniziale abbia costi molto piccoli per quanto riguarda le spese di gestione annuali. Inoltre, si ritiene che i costi iniziali saranno coperti da una sovvenzione per la produzione di energia pulita, quindi, l'investimento iniziale non devono essere recuperati dagli agricoltori.

Le praterie per la coltivazione di biomasse per l'energia

In questa sede, ci interessa esplorare le implicazioni economiche per gli imprenditori agricoli circa l'idea delle colture energetiche di *prairie grasses* quando vi è un alto prezzo di mercato per le emissioni di gas serra. Si ipotizza quindi di coltivare *prairie grasses* in terreni ad elevata diversità, 16 specie, al centro del lavoro di Tilman e al. (2006). Per lo stesso livello di input, esperimenti di campo con alta biodiversità (16

specie: C3, C4, specie non leguminose erbacee ed arboree, leguminose) hanno comportato rese e accumuli di carbonio nel suolo maggiori rispetto ad esperimenti con un numero di specie variabile da 1 a 8. Gli input di questi esperimenti sono costantemente inferiori a quelli necessari per le colture energetiche tipiche (ad es., il panico). Nelle *mixed prairie grasses*, i legumi forniscono il necessario azoto e solo piccole quantità di fosforo sono necessarie ogni tre anni; irrigazione e controllo delle piante infestanti sono necessari solo nell'anno di impianto. Si presume che vi sia stoccaggio fotosintetico di CO₂, in forma di accumulo di carbonio nel terreno e nelle radici, pari a ~0,3 tC per ogni tonnellata secco di *prairie grasses* raccolte (o equivalentemente ~0,6 tC per tC raccolta), grazie alla coltivazione delle *prairie grasses* su terreni degradati impoveriti di carbonio, a causa dell'agricoltura intensiva. Tilman *et al.* (2006) stimano che questo tasso di accumulo di carbonio possa durare per almeno 30 anni (sufficienti a ripristinare il contenuto originario di carbonio del suolo), dopo di che inizierà ad accumularsi a tassi inferiori.

A questo tasso di accumulo di carbonio nel suolo, valutando 100 \$/tC_{eq} le emissioni di carbonio, il beneficio della mitigazione dei CCG dovuto all'accumulo di C nel suolo è del valore di 30 \$ per ogni tonnellata secca di biomassa venduta per la produzione di energia; lo stoccaggio di C nel suolo può avere in prospettiva un sostanziale impatto sull'economia globale del sistema energetico. In questo studio si ipotizza che il rapporto dello stoccaggio di carbonio nel suolo non vari con la produzione di biomassa.

Un fattore determinante dei costi della logistica è la resa delle *prairie grasses*. A livello locale, date le caratteristiche climatiche e del suolo, la resa di tali colture è proporzionale alla resa di fieno con un fattore 1,5 (Lehman, 2007). Le rese media di fieno nella contea nell'Illinois per il periodo 2001-2004 sono state messe a disposizione degli autori dal modello POLYSIS (Hellwinckel, 2007), basato su dati assemblati della USDA (US Department of Agriculture).

Raccolta, stoccaggio e trasporto

Un modo comune di trattare la biomassa erbacea quali sono le *prairie grasses* (analogo a quello di altre colture erbacee come il fieno), è in forma di balle (come le balle di fieno), che possono essere facilmente trasportate con i camion. Nel seguito sono descritte le macchine agricole e le operazioni da svolgere per la coltivazione, raccolta e trasporto delle biomasse, al fine di valutare i costi di produzione e della logistica.

La biomassa è tagliata, raccolta in cumuli, e seccata sul campo fino ad un contenuto di umidità inferiore al 20%. Un imballatore poi forma balle rettangolari (1,2x1,2x2,4 di m³, 0,476 tonnellate, con volume di densità 8,2 lb/ft³), che rimangono sul campo fino a quando un raccoglitore automatico, un muletto come uno Stinger Stacker 6500, carica 8 balle alla volta e le scarica a bordo campo. Le balle sono disposte una in larghezza e quattro in altezza (Kumar e Sokhansanj, 2007; Grant *et al.*, 2006). Le balle rettangolari sono considerate essere più adatte ai fini energetici rispetto alle balle rotonde che, invece, tendono a deformarsi e sono più complicate da accatastare negli impianti di stoccaggio o su rimorchi a pianale (Chariton Valley, 2002). Al fine di essere conservate senza una consistente perdita di sostanza secca, le balle sono coperte con teloni. La prevista perdita di sostanza secca (LMD) con la copertura è 7% (Duffy, 2003). In prima approssimazione, si assume che le balle siano temporaneamente conservate a bordo campo e quindi trasportate all'impianto di conversione in cui sono immagazzinate. Possiamo quindi supporre che tutta la perdita di sostanza secca avvenga presso l'impianto. Più realisticamente, un certo periodo di tempo sarà necessario per il trasporto delle balle all'impianto di conversione, e la perdita di sostanza secca avverrà in momenti diversi. Un trasportatore telescopico (ad esempio, JCB 520) muove le balle dai

mucchi e le carica sui piani del rimorchio che trasporta la biomassa al luogo dell'impianto per la poligenerazione. Al sito, le balle sono scaricate dal rimorchio e impilate fino a che non siano trattate in un tritatore, che ridurrà la dimensione delle particelle (Kumar e Sokhansanj, 2007). I rimorchi a pianale sono di 16 m e trainati da semi camion. Questi rimorchi possono caricare 42 balle rettangolari (circa 21 tonnellate; Chariton Valley RC & S, 2002; Perlack e Turhollow, 2003). La macchina riduttrice della dimensione (detta *grinder*) è situata all'impianto di conversione ed è in grado di tritare circa 26 tonnellate/ora. Gli esperimenti di triturazione condotti in campo (Grant *et al.*, 2006) hanno utilizzato un tritatore dalla capacità di 33 t/ora, alimentandolo con biomassa di umidità compresa tra il 9 e il 12%; la dimensione della particella di biomassa macinata risultava meno di 0,64 cm. Il materiale macinato viene scaricato con un nastro trasportatore in un deposito, da dove la biomassa verrà rimossa per alimentare il gassificatore.

Le prestazioni e i costi dei macchinari sono valutati sulla base della loro capacità di lavoro sul campo (Hanna, 2001; Turhollow e Sokhansanji, 200x). La capacità di lavoro sul campo di una macchina agricola è la velocità con la quale svolge la sua funzione primaria, ossia, il numero di ettari che può essere falciato all'ora o il numero di tonnellate di fieno, che può essere imballato all'ora.

Il caso dell'Illinois

Coltivando *prairie grasses* con una resa che varia tra 9,41 (Marion) e 12,15 tss/ha all'anno (Clinton) e una resa media di 10,4 tss/ha all'anno su 108.000 ettari, le quattro contee forniscono 1.000.000 ton di biomassa all'anno all'impianto di conversione. Supponendo che il 15% dei terreni è convertito da mais a erbe della prateria miste (tutta la zona interessata è di circa 724.000 ettari), e come fattore di strada tortuosa $\sqrt{2}$, la distanza media di trasporto è di 45 km. I costi sono elencati nella Tabella 7.3.

Tabella 7.3: Costi delle operazioni logistiche di raccolta e trasporto delle *prairie grasses*.

Resa 10.4 dt/ha/y	\$/dt
Impianto	3.6
Raccolta	8.4
Trasporto in campo	10.7
Stoccaggio	2.2
Trasporto su strada	8.4
Triturazione	4.7
Totale	38

7.4 Emissioni a monte dell'impianto di conversione

I tassi di emissione a monte per il carbone e la biomassa sono riportati nella Tabella 7.4. Il tasso di emissione del carbone di carbonio equivalente tiene conto delle emissioni di CO₂, N₂O e CH₄, stimati dai modelli GREET (Argonne National Laboratory, 2007) che considerano anche impianti a carbone a H₂ o gli impianti F-T. I tassi di emissione totale a monte per il carbone sono inferiori ai tassi di emissione del carbone per la generazione di energia elettrica (1,0621 contro 1,270 kgC/GJ LHV) perché si prevede che gli impianti FT siano costruiti più vicino alle miniere di carbone di quanto non siano oggi gli impianti di potenza. Il tasso di emissioni a monte delle biomasse tiene conto della produzione, raccolta, trasporto e trasformazione di biomassa (Tilman *et al.*, 2006).

Si assume, inoltre, che l'energia elettrica prodotta nella struttura di poligenerazione sostituisca l'energia elettrica prodotta in un impianto IGCC (*Integrated gasification and combined cycle*) con cattura di carbonio e sequestro. Il tasso di emissione quindi è dato dalla somma delle emissioni in atmosfera (la frazione che non è catturata), e le emissioni di carbone a monte (la stessa che per l'impianto di poligenerazione).

Tabella 7.4: Tassi di emissione a valle della conversione nell'impianto; l'emissione ha valori positivi, il sequestro ha valori negativi (Argonne National Laboratory, 2007; Tilman *et al.*, 2006).

Upstream GHG emission rate	GHG emission rate	
Coal	1.0621	kg C_{eq}/GJ_{LHV}
CH ₄	0.125	kg CH ₄ /GJ _{LHV}
N ₂ O	1.64·10 ⁻⁵	kg N ₂ O/GJ _{LHV}
CO ₂	1.0125	kg CO ₂ /GJ _{LHV}
Biomass	1.2895	kg C_{eq}/GJ_{HHV}
CH ₄	-0.0946	kg CH ₄ /GJ _{HHV}
N ₂ O	0.00784	kg N ₂ O/GJ _{HHV}
CO ₂	4.583	kg CO ₂ /GJ _{HHV}
Electricity	20.54	g C_{eq}/kWh

Note: GHG global warming potential is: 1 kgCO_{2,eq}/kgCO₂; 23 kgCO_{2,eq}/kgCH₄; 296 kgCO_{2,eq}/kgN₂O.

7.5 Tecnologie di conversione

In Figura 7.3 sono riportati gli schemi dei tre tipi di impianto considerati. Fatta eccezione per la materia prima biomassa in ingressi considerata per l'impianto di Figura 7.3c, che proviene dalle *prairie grasses* invece che dalle coltivazioni di panico (*switchgrass*), i tre impianti hanno le stesse caratteristiche discusse in Williams *et al.* (2006). In tutti i casi, la dimensione dell'impianto è stata fissata per produrre un equivalente di 1.035 MW di biocombustibili FTL; questo accorgimento rende i tre sistemi facilmente paragonali.

In tutti i casi, la coproduzione di elettricità e di combustibile FTL è effettuata da un processo termo-chimico, dove la materia prima è gassificata in reattore pressurizzato con ossigeno per generare un gas di sintesi ricco di H₂ e CO. Dopo raffreddamento e pulizia, una frazione del gas di sintesi è shiftata in un reattore convertitore di gas d'acqua (WGS) per raggiungere il rapporto globale H₂/CO che si desidera. Il gas di sintesi shiftato entra in un sistema Rectisol, dove tutta la H₂S e la maggior parte della CO₂ vengono rimosse.

Il gas di sintesi pulito e senza zolfo, che consiste essenzialmente di H₂ e CO, entra in un reattore Fischer-Tropsch a singolo passaggio in uno *slurry-bed*, in cui una frazione elevata di H₂ e CO è convertita in petrolio greggio FT, vale a dire una miscela di gas leggeri, nafta, distillati medi e cere, che è quindi inviata ad una sezione di un sistema integrato di raffineria per la produzione di gasolio e benzina sintetici. I prodotti secondari gassosi leggeri (C₁ - C₄) della raffinazione insieme al gas di sintesi non convertito che esce dal reattore FTL, alimentano la turbina a gas di una centrale elettrica a ciclo combinato, dove il ciclo a vapore è alimentato non solo dal calore recuperato dai gas di scarico della turbina, ma anche da vari processi esotermici a monte, in particolare la sintesi esotermica del reattore FTL.

La maggior parte della tecnologia considerata in questo studio è sviluppata a livello commerciale. Una notevole eccezione è il gassificatore a biomassa, per il quale l'esperienza è limitata a un impianto pilota sviluppato da GTI (200x). A parte lo stato delle singole tecnologie, la loro applicazione nelle complesse, configurazioni integrate

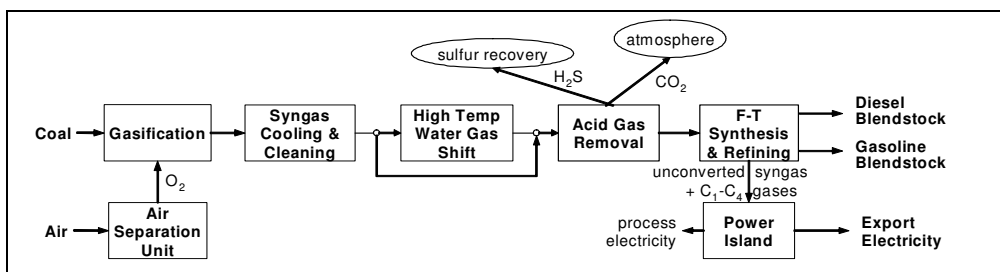
considerate qui sarebbe nuova e richiederebbe una dimostrazione, così come lo sviluppo di un'adeguata esperienza operativa.

7.5.1 Prestazioni dell'impianto e flussi del carbonio

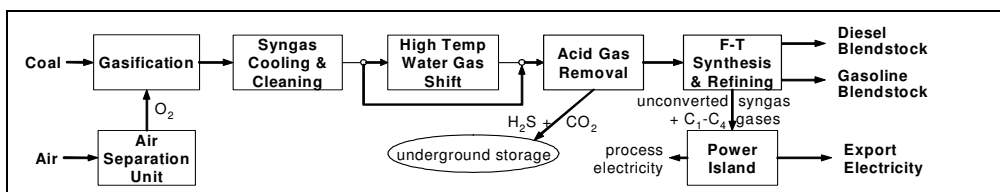
I tre impianti sono stati modellizzati usando un software di simulazione di processi chimici (AspenPlus) che stima nel dettaglio i bilanci di massa e di energia. In tutti i casi la taglia dell'impianto era fissata per produrre circa 1035 MW di liquidi FT. Gli impianti schematizzati nelle Figure 3a e 3b, quelle alimentate solo a carbone, sono gli stessi modellizzati in Williams *et al.* (2006). La configurazione, invece, del terzo impianto di Figura 3c, alimentato a carbone e biomassa, differisce da quella considerata in Williams *et al.* (2006) per i seguenti punti:

- le biomasse in ingresso sono *prairie grasses* invece di panico (*Panicum virgatum*);
- il rapporto tra biomasse e carbone in ingresso è differente, poiché in questo studio viene deciso in modo tale che le emissioni di carbonio siano nulle.

a)



b)



c)

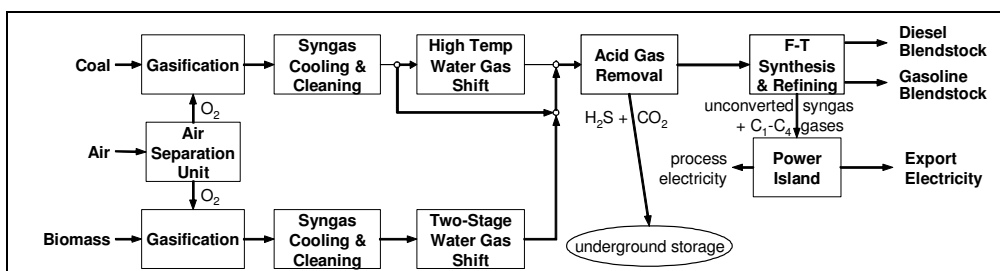


Figura 7.3: configurazione del processo di conversione per il sistema energetico (a) C-FT-V, solo carbone in ingresso, carbonio emesso in atmosfera; (b) C-FT-CoC, solo carbone in ingresso, carbonio in CCS; (c) CB-FT-CoC, carbone e biomasse in ingresso, carbonio in CCS.

L'utilizzo di *prairie grasses* invece del panico comporta anche qualche differenza marginale, che non è stata considerata, nella modellizzazione del sistema. Dal punto di vista dei bilanci di massa e di energia, il parametro che può causare le maggiori differenze è il contenuto di umidità della biomassa in ingresso. Si assume però che prima dell'utilizzo delle biomasse nell'impianto, queste vengano fatte essiccare, al limite anche a bordo campo, fino ad un contenuto di umidità pari a circa il 20%; le

differenze nella composizione della frazione volatile o delle ceneri possono essere considerate a questo punto irrilevanti. Per quanto riguarda la variazione della frazione di biomassa rispetto al carbone in ingresso, è stata eseguita una interpolazione lineare tra l'impianto C-FT-CoC (solo carbone, cattura di CO₂ e H₂S) e l'impianto CB-FT-CoC (biomasse e carbone, cattura di CO₂ e H₂S) modellizzati in Williams *et al.* (2006). L'interpolazione lineare è una approssimazione che dovrà essere in futuro verificata tramite una simulazione vera e propria dei bilanci in massa e in energia. In ogni caso, l'approssimazione utilizzata è compatibile con lo scopo di questo studio; inoltre, come risultato si ottiene un rapporto biomassa/carbone non dissimile da quello di Williams *et al.* (2006), giustificandone ulteriormente l'utilizzo.

In Tabella 7.5 sono riportate le prestazioni dei tre impianti. In Tabella 7.6 sono riportate le ripartizione dei flussi di carbonio, di ingresso e di uscita dall'impianto. Il carbonio scaricato nell'atmosfera da impianti con CCS proviene principalmente dalla CO e CO₂ rilasciate da gas di sintesi (*syngas*) non convertito e dai gas fuoriusciti che alimentano le turbine a gas.

Tabella 7.5: Prestazioni complessive dei tre sistemi energetici.

Plant scheme		C-FT-V	C-FT-CoC	CB-FT-CoC	
Source		this paper	Williams <i>et al.</i> (2006)	this paper	Williams <i>et al.</i> (2006)
H ₂ /CO ahead of FTL synthesis		2,25	2,75	2,75	2,75
Coal input	MW _{LHV}	2.946,0	3.085,1	2.447,8	2.241,0
	% of total input	100,0	100,0	78,5	71,6
Biomass input	MW _{LHV}	0,0	0,0	668,4	886,8
	% of total input	0,0	0,0	21,5	28,4
Total input		2.946,0	3.085,1	3.116,2	3.127,8
FTL Diesel	MW _{LHV}	639,8	639,8	639,8	639,8
	MW _{LHV}	395,2	395,5	392,1	392,0
Total FTL output	MW _{LHV}	1.035,0	1.035,3	1.031,9	1.031,8
	% of total input	35,1	33,6	33,1	33,0
Electricity Output	MW _e	461,3	428,3	451,7	459,5
	% of total input	15,7	13,9	14,5	14,7

Tabella 7.6: Flussi di carbonio per i tre sistemi energetici; i flussi sono espresso in tonnellate di carbonio per giorno.

Plant scheme	C-FT-V	C-FT-CoC	CB-FT-CoC
Carbon from coal	6.410,0	6.713,3	5.326,4
Carbon from biomass	0,0	0,0	1.607,3
Total carbon to plant	6.410,0	6.713,3	6.933,7
Carbon in FTL	1.818,7	1.811,4	1.809,4
Carbon in char	64,1	67,1	53,3
Carbon to CCS	0,0	4.250,0	4.336,3
Carbon vented to atmosphere	4.527,2	584,8	734,7
Total carbon discharged from the plant	6.410,0	6.713,3	6.933,7
Carbon captured (%)	0%	63%	63%

In Figura 7.4 è mostrata una descrizione schematica dell'impianto CG-FT-CoC (gli altri due impianti sono in Appendice III) di conversione suddiviso per i principali blocchi che lo compongono e che definisco il bilancio finale del carbonio: il carbone e la biomassa in ingresso, l'impianto di conversione vero e proprio con l'energia elettrica prodotta, i liquidi FTL prodotti, l'atmosfera e il suolo che ricevono forniscono carbonio. Come si può osservare i flussi di carbonio in atmosfera sono pari a zero, poiché il carbonio in ingresso è esattamente uguale a quello in uscita. Per ottenere

questo risultato, la potenza in ingresso all'impianto deve provenire per il 22% circa dalle biomasse e per il restante 78% dal carbone.

7.6 Risultati e conclusioni

Tutte le analisi, come già ricordato, sono state svolte considerando un valore di 100 \$ per tonnellata di carbonio. Tutti le stime dei costi sono in dollari del 2003; l'investimento dell'impianto è quello di un ipotetico n -esimo impianto e, quindi, non di un impianto pilota. Si presume che il prezzo del carbone sia pari a 1,16 \$/GJ_{HHV}. Si assume che, dopo la cattura, la CO₂ sia trasportata per 160 km e sequestrata nel sottosuolo a 2 km di profondità. I costi di trasporto e stoccaggio sono stimati secondo le ipotesi di costo di Ogden (2006) supponendo un flusso massimo di 1000 ton/giorno di iniezione di CO₂ nel suolo.

Il prezzo pagato per la biomassa all'impianto di conversione è determinato dal principio della disponibilità a pagare; il prezzo è stimato tenendo conto che i due impianti, con approssimativamente la stessa produzione di elettricità e FTL (venduti allo stesso prezzo), ma uno alimentato a carbone e l'altro a biomassa+carbone, abbiano la stessa redditività economica. Dalle analisi, risulta quindi che la disponibilità a pagare per la biomassa all'impianto sia pari a 96 \$/t ss. La Tabella 7.7 riassume questi risultati, insieme alla resa delle *prairie grasses* e ai loro costi di produzione, come spiegato nella sezione 7.4.2, che ammontano a 38 \$/t ss. L'imprenditore agricolo può quindi guadagnare da questa coltivazione di biomasse 58 \$/t ss. Inoltre, si osserva che per le quattro contee considerate, i guadagni complessivi che si avrebbero con le biomasse da *prairie grasses* ammontano a circa 567 \$ per ettaro, di poco inferiori a quelli che si hanno attualmente con la coltivazione del mais e che ammontano a 601 \$ per ettaro.

Le figure dalla 7.5 alla 7.7 mostrano i flussi di carbonio nei tre sistemi considerati. Nel primo caso (Figura 7.5), in cui l'impianto è alimentato a solo carbone e non c'è CCS, tutto il carbonio proveniente dal carbone è emesso in atmosfera e ammonta a circa 6.600 tonnellate al giorno. Nel secondo caso (Figura 7.6), in cui si introducono la cattura e lo stoccaggio del carbonio nel sottosuolo, la quantità di carbonio emessa in atmosfera si riduce a circa 2.500 tonnellate al giorno. Nel terzo caso (Figura 7.7), infine, insieme al carbone vengono utilizzate anche le biomasse da *prairie grasses* che permettono, grazie alla loro proprietà di assorbire carbonio dall'atmosfera e di fissarlo sia nella biomassa epigea (1.600 tC/giorno) sia in quella ipogea e nel suolo (1.000 tC/giorno), di ridurre a zero le emissioni complessive di carbonio in atmosfera.

Nei sistemi che producono sia combustibili FTL sia elettricità, l'allocazione delle emissioni di carbonio tra i due prodotti è arbitraria. In questo lavoro, si considera che il tasso di emissione di GHG dell'elettricità (gC_{equiv}/kWh) è pari a quello di un impianto di gassificazione senza CCS nel caso in cui non ci sia CCS e, invece, è pari a quello di un impianto di gassificazione con CCS negli altri due casi. Si sottolinea che le emissioni comprendono quelle dell'impianto di conversione e quelle dovute all'utilizzo dei combustibili FTL nei veicoli; inoltre sono state considerate le emissioni di carbone (1,0 kgCeq/GJ) e biomassa (2,06 kgCeq/GJ) a valle dell'impianto di conversione (Argonne National Laboratory, 2006).

BIOMASS		
LHV of dry matter	17,5	MJ / kg biom dry
moisture content	20%	%
ash content	2,0%	%
LHV	13,50	MJ / kg biom
Carbon content	0,469638	kg C / kg biom dry
	0,375710	kg C / kg biom
	27,83040	kg C / GJ LHV
upstream biomass emissions	0,02412	kg C / kg biom dry
	0,019296495	kg C / kg biom
	1,429370	kg C / GJ LHV
Yield	7,91	t dry/ha
Cultivated area	157.924	ha
Biomass supply	3.422	t dry/day
	4.278	t /day
	668,44	MW
carbon from biomass flows in		
carbon in biomass	1.607,29	t C/day
carbon from biomass flows out		
carbon in biomass to plant	1.607,29	t C/day
upstream biomass emissions	82,55	t C/day

ATMOSPHERE			
Carbon flows in			
Carbon vented from plant	734,7	t C/day	
Carbon from combustion of FT-L	1.809,6	t C/day	
Carbon from coal upstream emissions	224,7	t C/day	
Carbon from biomass upstream emissions	82,6	t C/day	
Carbon emitted by soil	0,0	t C/day	
Total carbon flow in	2.851,5	t C/day	
Carbon flows out			
Carbon to biomass	1.607,3	t C/day	
Carbon to soil and roots	1.021,5	t C/day	
Carbon credit for electricity	222,7	t C/day	
Total carbon flow out	2.851,5	t C/day	
Carbon balance			
carbon in - carbon out	0,0000	t C/day	

PLANT			
Capacity factor	80,0%	%	
hours/year	8.760	hr/yr	
sec/year	31.536.000	sec/yr	
Unconverted char	1,00%	%	
ηLHV of FT-L production	33,1137%	%	
ηLHV of electricity production	14,4944%	%	
ηCCS	85,5117%	%	
Total feedstock (coal+biomass)	3.117	MW	
of which biomass	21,45%	%	
of which coal	78,55%	%	
Electric power	451,74	MW	
Electricity produced	3.957,20	GWh	
Carbon flows in			
Carbon from coal to plant	5.326,40	t C/day	
Carbon from biomass to plant	1.607,29	t C/day	
Total carbon flow in	6.933,69	t C/day	
Carbon flows out			
Carbon in FT-L	1.809,60	t C/day	
Carbon in char	53,26	t C/day	
Carbon to CCS	4.336,14	t C/day	
Carbon vented	734,68	t C/day	
Total carbon flow out	6.933,69	t C/day	

SOIL		
Carbon uptake by soil and roots	0,29848	t C/t dry biomass
	1,10879	t C/ha/yr
Carbon emissions from soil	0	t C/ha
Carbon flows in		
Carbon sequestered in soil	1.021,51	t C/day
Carbon captured in CCS	4.336,14	t C/day
Carbon in char	53,3	t C/day
Carbon flows out		
Carbon emitted by soil	0	t C/day

FT-L		
LHV FT-L	43,40	MJ/kg
C content	0,88078	kg C/kg fuel
	20,29452	g C / MJ LHV
FT-L production	2.054,54	t/day
	1.032,03	MW
Carbon content of FT-L		
Carbon to FT-L	1.809,60	t C/day

COAL		
LHV dry	0,00	MJ/kg coal dry
moisture content	0,00	%
ash content	0,00	%
LHV	25,3000	MJ/kg coal
Carbon content	0,637084876	t C/t coal
	25,1812	kg C / GJ LHV
Upstream coal emission	0,02687	kg C / kg coal
	1,062100	kg C / GJ LHV
Coal supply	8.360,57	t/day
	2.448,18	MW
Carbon from coal flows		
Carbon in coal	5.326,40	t C/day
Coal upstream emission	224,66	t C/day
Total carbon output	5.551,05	t C/day

Figura 7.4: CB-FT-CoC: caratteristiche dei combustibili in ingresso (biomasse e carbone) e dei prodotti in uscita (energia elettrica, liquidi FTL) all'impianto di conversione; flussi di carbonio in tonnellate per giorno.

Tabella 7.7: Sintesi dei costi di produzione delle biomasse e dei guadagni degli imprenditori agricoli nel caso di conversione della coltivazione da mais a *prairie grasses* per l'energia.

Prezzo del carbonio, \$/t C	100
Resa delle <i>prairie grasses</i> dt/ha/y	10.4
Prezzo delle <i>prairie grasses</i>, \$/t ss	
Disponibilità a pagare per biomassa da <i>prairie grasses</i> all'impianto (~4.5 prezzo del carbone)	96
Costi di produzione e raccolta delle biomasse	-38
All'imprenditore agricolo	58
Income to farmer (\$/ha/y) for Bond, Clinton, Madison, and Marion counties	
For sale of grasses to FTL plant	567
Corn returns (<i>acres</i> , <i>yields</i> = 2001-2004 averages, 2007 farm prices)	601

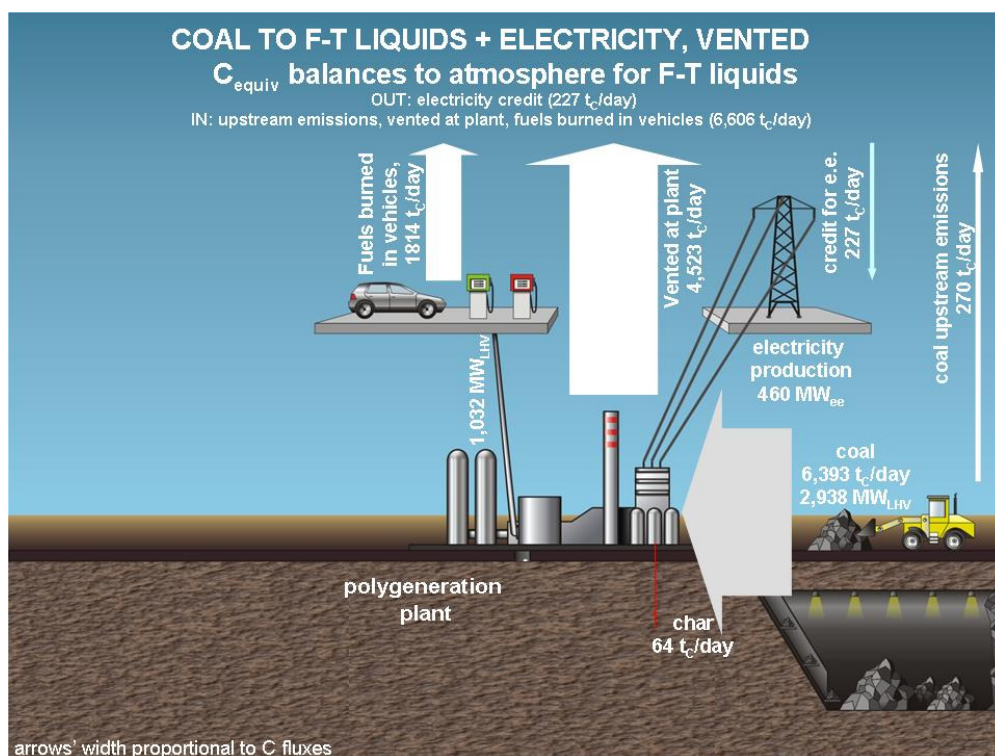


Figura 7.5: diagram of carbon and energy flows in the C-FT-V case.

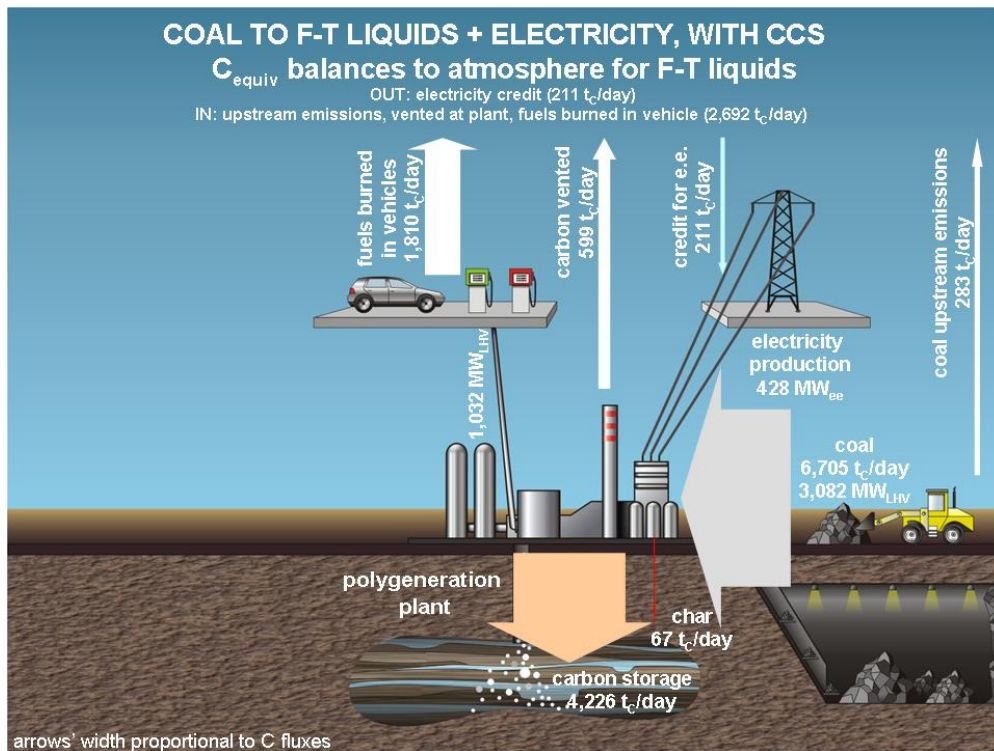


Figure 7.6: Diagram of carbon and energy flows in the C-FT-CoC case.

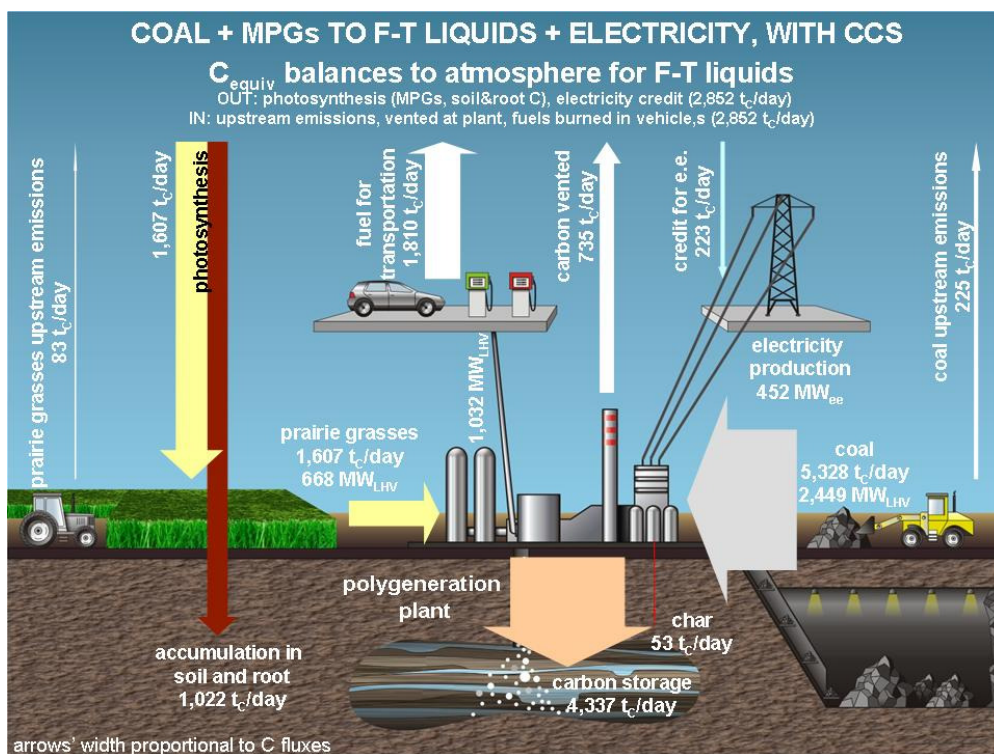


Figure 7.7: Diagram of carbon and energy flows in the C/B-FT-CoC case; this solution gives zero net emissions to the atmosphere.

7.7 Bibliografia

- Argonne National Laboratory, 2006. The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model. [online] URL: <http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/index.html>.
- Chariton Valley RC&D, 2002. Chariton Valley biomass project, prepared for: The United States Department of Energy, Contract Number: DE-FC36-96GO10148. [online] URL: <http://www.iowaswitchgrass.com/>
- Duffy M, 2003. On farm costs of switchgrass production in Chariton Valley, Iowa State Extension Economist. [online] URL: <http://www.extension.iastate.edu/>
- EIA – Energy Information Administration, 2007. State Energy Profile : Illinois. [online] URL: http://tonto.eia.doe.gov/state/state_energy_profiles.cfm?sid=IL#
- Grant D., J.R. Hess, K. Kenney, P. Laney, D. Muth, P. Pryfogle, C. Radtke, C. Wright, 2006. Feasibility of a producer owned ground-straw feedstock supply system for bioethanol and other products, Idaho National Laboratory and Straw Value Add Committee, INL/EXT-06-11815. [online] URL: <http://www.inl.gov/bioenergy/projects/>.
- GTI, 200x. The GTI gasification process,
- Hanna M., 2001. Estimating Field Capacity of Farm Machines - Machinery Management. [online] URL: <http://www.extension.iastate.edu/>.
- Hellwinckel C.M., 2007. Personal communication, U. of Tennessee.
- Kumar A., S. Sokhansanj, 2007. Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model, Bioresource Technology 98: 1033-1044.
- Lehman C. (2007). Personal communication, University of Minnesota.
- MGSC – Midwest Geological Sequestration Consortium, 2005. An Assessment of Geological Carbon Sequestration Options in the Illinois Basin, U.S. DOE Contract: DE-FC26-03NT41994. [online] URL: <http://sequestration.org/>.
- MNP – Netherlands Environmental Assessment Agency, 2006. Cross-Roads of Planet Earth's Life: Exploring Means to Meet the 2010-Biodiversity Target. [online] URL: <http://www.cbd.int/doc/gbo2/cbd-gbo2-global-scenarios.pdf>
- Ogden J.M., 2002. Modeling infrastructure for a fossil hydrogen energy system with CO2 sequestration, Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto, Japan, October.
- Perlack R.D., A.F. Turhollow, 2002. Assessment of options for the collection, handling, and transport of corn stover, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2002/44. [online] URL: <http://www.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/113127.pdf>.
- Perlack R.D., A.F. Turhollow, 2003. Feedstock cost analysis of corn stover residues for further processing, Energy 28(14): 1395-1403.
- Stiff B., 1997. Areas Mined for Coal in Illinois, ISGS GIS Database. [online] URL: <http://www.isgs.uiuc.edu/nsd/home/webdocs/browse.html>.
- Tilman D., J. Hill, C. Lehman, 2006. Carbon-negative biofuels from Low-Input High-Diversity grassland biomass, *Science* 314: 1598-1600.
- Turhollow A, S. Sokhansanj, 200x. Cost methodology for biomass crops, Oak Ridge National Laboratory.
- Williams R., E. Larson, H. Jin, 2006. Synthetic Fuels in a World with High Oil and Carbon Prices, Proceedings of the 8th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 19-22 June 2006 (forthcoming).

8 Conclusioni

In molte sedi si discute della necessità di ridurre la forte dipendenza della nostra società dai combustibili fossili: il problema è spiccato in Italia, ma riguarda tutti i paesi, industrializzati e in via di sviluppo. In Italia, una decisa politica di riduzione delle fonti fossili potrebbe contribuire a evitare il verificarsi di black-out energetici e contemporaneamente aumenterebbe la diversificazione delle fonti con conseguente maggiore stabilità della fornitura. Alcuni esempi di attualità, come l'eclatante black-out del settembre 2003 o come quelli programmati delle estati 2004 e 2005 o i numerosi tagli dell'inverno 2006 alle quantità di gas naturale proveniente dalla Russia, dicono quanto il problema sia rilevante. I costi delle fonti fossili, per di più, sono in continua crescita: la fattura energetica italiana del 2005 è aumentata di più del 31,8% rispetto al 2004, arrivando a 38,5 miliardi €. La nostra spesa energetica è composta soprattutto da petrolio, che ha contribuito con più di 22 miliardi € (più 30% rispetto al 2004), e da gas naturale, con più di 12 miliardi di € (+38,2%). In termini di peso sul PIL, la fattura energetica rappresentava nel 2005 il 2,9% contro il 2,2% del 2004 (UP, 2006).

Un altro valido motivo, forse oggi il più pressante, per orientarsi verso la produzione di energia da fonti rinnovabili è la salvaguardia dell'ambiente. Servono politiche per mitigare i cambiamenti climatici attraverso la riduzione delle emissioni di gas serra e per assicurare il raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto. In questo contesto, le fonti rinnovabili per la produzione di energia rivestono un ruolo strategico. La riduzione di gas serra fissata dal Protocollo di Kyoto per il 2010 è, in realtà, modesta ai fini del rallentamento dei cambiamenti climatici; il dibattito attuale parla di riduzioni di gran lunga superiori a quelle fissate da Kyoto per poter stabilizzare la concentrazione atmosferica di CO₂ a circa 500 ppmv (dai 280 ppmv dell'era preindustriale). Ma anche se considerando i soli obiettivi di Kyoto, si pensi che nel 2003, l'Italia ha emesso circa 569 milioni di tonnellate di CO_{2eq}: oltre 60 in più del 1990, mentre dovrebbe ridurle a circa 475 Mt entro il 2008-2012 (Apat, 2005).

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili è dunque importante non solo sul lungo periodo (per la scarsità e il costo delle fonti fossili, per la mitigazione degli impatti più dannosi dei cambiamenti climatici), ma anche sul breve periodo (per il rispetto degli accordi di Kyoto, per la diversificazione delle fonti). L'obiettivo di questo lavoro è mostrare quale possa essere il contributo di una particolare fonte rinnovabile: le biomasse. Per svolgere questa valutazione, sono state affrontate quattro tematiche:

1. La potenzialità di un territorio nella produzione di biomasse da colture energetiche dedicate attraverso l'individuazione, per specifiche cultivar (tre cloni del pioppo, salice, robinia e sorgo), dei suoli ottimali ad oggi potenzialmente convertibili dal loro attuale uso del suolo. In particolare, per non modificare il mercato agroalimentare, si è ipotizzato di convertire a colture energetiche solo aree agricole attualmente non utilizzate e i set-aside (capitolo 4).
2. La potenzialità delle biomasse residuali dalla stima delle biomasse disponibili da residui delle principali colture alimentari, da sottoprodotti della lavorazione del

legno nelle industrie di settore e, infine, da residui della manutenzione delle foreste (capitolo 5).

3. La definizione di un metodo per la pianificazione dell'utilizzo energetico delle biomasse su un dato territorio, a partire dalla disponibilità di biomasse a livello locale (come ai punti 1 e 2) e dalla rete stradale per definire in primo luogo la localizzazione ottimale degli impianti di conversione e i relativi bacini di conferimento e, quindi, per valutare il sistema complessivo sulla base dell'energia prodotta, delle emissioni evitate e dei ritorni economici (capitolo 6).
4. La definizione di quello che in futuro potrebbe essere un sistema energetico alimentato a carbone (combustibile fossile economico, abbondante e ad alto contenuto di carbonio) e a biomasse (provenienti da colture energetiche ad elevata biodiversità e con bassi input culturali) che produce energia elettrica e biocombustibili a emissioni nulle di carbonio. Il sistema è infatti configurato in modo tale che il carbonio emesso all'impianto, al momento dell'utilizzo nelle vetture e dalle operazioni di approvvigionamento di biomassa e carbone sia controbilanciato dal carbonio immagazzinato nel sottosuolo grazie sia alla cattura e allo stoccaggio del flusso in uscita all'impianto sia al carbonio accumulato nelle biomasse e nel suolo (capitolo 7).

In tutti i sistemi energetici presentati, le biomasse emergono quale un valido contributo al bilancio energetico e alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti. Ad esempio, in regione Emilia-Romagna (capitolo 4), dalla coltivazione di circa 11.000 ha di superficie non utilizzata, la produzione annuale di biomasse da colture arboree potrebbe essere compresa tra 93.000 e 138.000 tss, a seconda che i cloni del pioppo siano coltivati con bassi o alti input culturali. La produzione di sorgo raggiungerebbe invece 439.000 t ss su una superficie a riposo stimata in circa 18.000 ha. Complessivamente, quindi, la produzione di biomasse sfrutterebbe poco più di 29.000 ha, pari al 2% della superficie agricola totale e al 1,3% dell'intero territorio dell'Emilia-Romagna. Utilizzando una piccola parte della superficie agricola della regione per la produzione di biomasse per l'energia, è possibile aumentare considerevolmente il contributo delle fonti rinnovabili, con una conseguente riduzione delle emissioni di gas serra. Infatti, se tutta la biomassa venisse impiegata nelle caldaie per il riscaldamento domestico, si potrebbe ottenere una riduzione tra l'1 e l'1,4% (a seconda che si vada a sostituire gas naturale o gasolio) dei 39 milioni di tonnellate di CO₂ emessi nel 2004. È un valore che può apparire modesto, ma corrisponde ad una calo tra l'8 e il 10% di tutte le emissioni dovute al settore residenziale (nella regione circa il 35% delle emissioni sono dovute ai trasporti).

In Emilia-Romagna oltre a studiare le potenzialità del territorio alla produzione di biomasse da colture energetiche dedicate, è stata anche affrontata la stima delle biomasse residuali (capitolo 5). Complessivamente è stata stimata una quantità notevole di biomasse residuali, pari a 706.362 ton ss/anno di cui il 79% proveniente dal settore agricolo, l'11% dal settore forestale e il restante 10% dal settore dell'industria del legno. Anche senza la coltivazione in colture energetiche, la disponibilità di biomasse della regione è quindi elevata. Si consideri, inoltre, che l'utilizzo delle biomasse residuali è uno degli aspetti più delicati della bioenergia: è necessario un attento studio del territorio per attuare politiche energetiche compatibili con la salvaguardia e il miglioramento dell'ambiente. Nella raccolta dei residui agricoli, infatti, è necessario prestare attenzione a lasciare parte dei residui sul suolo quale copertura per la

prevenzione dall'erosione e per il ricircolo dei nutrienti. Tuttavia, queste buone pratiche agricole si scontrano con la realtà dei fatti, dato che attualmente gran parte dei residui viene rimossa per essere utilizzata nelle lettiere degli allevamenti zootecnici o per essere bruciata, con una combustione assolutamente non controllata, a bordo campo. Per quanto riguarda il settore forestale, la stima dei residui dovrebbe essere svolta sulla base delle caratteristiche del territorio, dei soprassuoli forestali, dello stato delle foreste e delle forme di governo. Per la regione Emilia-Romagna la scarsità di dati ha permesso di concludere una stima approssimativa delle potenzialità del settore, probabilmente una sottostima in quanto è stato posto un vincolo molto forte sulla pendenza, ipotizzando di raccogliere biomasse forestali solo su pendenze inferiori al 20%. Poiché alcuni dati cartografici sono ancora in fase di acquisizione dalla Regione e da alcune Province (in particolare Piacenza), l'aspetto dell'approvvigionamento locale delle biomasse sarà oggetto di prossime elaborazioni e approfondimenti. Infine, i sottoprodotti dell'industria del legno sono facilmente riutilizzabili per la produzione di energia visto che, soprattutto negli stabilimenti di grandi dimensioni, sono già disponibili in abbondanza e con basso contenuto di umidità. Spesso le industrie del legno già riutilizzano i sottoprodotti per alimentare le caldaie all'interno dello stabilimento o per la fabbricazione di pannelli. Nello stimare la disponibilità di sottoprodotti dal settore del legno bisognerebbe dunque tenere in considerazione il loro reale valore mercato; in questo studio, invece, si è fatta semplicemente l'ipotesi di utilizzare una frazione dei sottoprodotti.

Una volta nota la disponibilità di biomasse sul territorio, si è passati alla valutazione di alternative di utilizzo in diversi impianti di trasformazione in modo da definire sia la tecnologia sia la localizzazione migliori nell'ambito di un dato territorio (date quindi le caratteristiche geo-morfologiche, la rete stradale e la domanda/offerta dell'energia). Nel caso di studio della provincia di Cremona (capitolo 6) è stata presentata una metodologia per la pianificazione dell'utilizzo delle biomasse considerando produzione, raccolta, trasporto e due differenti tipi di impianti di produzione dell'energia. I risultati ottenuti mostrano che l'utilizzo energetico delle biomasse è positivo in una zona di pianura con agricoltura intensiva e che i vantaggi derivano non solo dal possibile risparmio di combustibili fossili, ma anche dalla possibilità di evitare emissioni di CO₂ e di avere ritorni dall'investimento economico iniziale. L'emissione e la vendita di certificati verdi contribuisce in larga misura al risultato positivo del bilancio economico; d'altra parte, i certificati verdi servono per internalizzare quei costi esterni dell'inquinamento a scala globale che non sono normalmente considerati nelle analisi costi-benefici.

Il trasporto delle biomasse dai luoghi di produzione o raccolta al luogo di utilizzo è talvolta considerato un aspetto critico nei bilanci di gas serra di sistemi energetici, fino al punto di poter trasformare il sistema da assorbitore a emettitore. Le biomasse, infatti, hanno un potere calorifico per unità di peso basso rispetto a quello dei tradizionali combustibili fossili (17.500 MJ tss⁻¹ contro 33.900 MJ t⁻¹ del greggio) e hanno un contenuto di umidità elevato che aumenta il costo di trasporto, a meno che non si preveda lo stoccaggio e l'essiccazione sul luogo di produzione. Questo studio, così come quelli di Dubuisson e Sintzoff (1998) o Matthews and Mortimer (2000), mostra invece che l'incidenza del trasporto (sulle distanze interessanti per un razionale piano di sfruttamento) si limita a pochi punti percentuali del bilancio della CO₂. Nel caso della provincia di Cremona, ad esempio, i costi di trasporto incidono meno del 3% sul bilancio economico del sistema nel suo complesso e lo stesso vale per i costi di trasporto in termini di emissioni o di energia. La conformazione pianeggiante di Cremona, così come la fitta rete stradale, contribuiscono a contenere i costi di trasporto.

Tuttavia, simili risultati sono stati ottenuti anche per la provincia di Como e per quella di Piacenza, sempre in seguito alla definizione della localizzazione ottimale degli impianti di conversione; in entrambi i casi i costi di trasporto incidono poco sul bilancio complessivo (rispettivamente il 4% e il 12%; Fiorese *et al.*, 2006).

Un aspetto di particolare rilevanza che non è stato incluso nel dettaglio nella tesi riguarda il valore di mercato e il costo di produzione delle biomasse da colture energetiche e di raccolta delle biomasse residuali. L'analisi economica delle colture energetiche è stata svolta in Fiorese *et al.* (2007) e mostra come sia un aspetto delicato poiché, in assenza di incentivi, nessuna coltura è redditizia per l'imprenditore agricolo. Se si aggiungono all'analisi economica anche i costi della produzione e i ricavi della vendita di energia (anche in questo caso con gli incentivi) la redditività economica diventa positiva. Questo è mostrato nel caso di studio della provincia di Cremona (capitolo 6), in cui viene svolto un bilancio economico della filiera delle biomasse per l'energia. Uno sviluppo del lavoro potrebbe quindi prevedere l'integrazione dell'analisi economica dettagliata della produzione di biomasse in colture energetiche (come quella in Fiorese *et al.*, 2006 per le colture del capitolo 4) nell'analisi della filiera completa delle biomasse per l'energia (capitolo 6). Per quanto riguarda le biomasse residuali, sarebbe interessante definire delle curve di costo per l'approvvigionamento di biomassa, per sapere a diversi livelli di costo quanta biomassa è effettivamente disponibile. Ci sono biomasse che possono essere raccolte a costi (sia economici sia ambientali) inferiori: ad esempio, sono disponibili a basso costo i residui agricoli provenienti da quelle colture in cui l'interramento è sconsigliato (frumento), i sottoprodotti forestali vicino alle strade in aree a bassa pendenza, i sottoprodotti di industrie che altrimenti dovrebbero smaltire, anche pagando, i propri scarti. Sono invece più costose quantità maggiori dei residui agricoli (poiché una parte dovrebbe essere lasciata al suolo per la sua protezione), residui forestali provenienti da aree difficilmente accessibili, sottoprodotti industriali da industrie che già riutilizzano i propri scarti.

Oltre alla produzione di energia, interessa conoscere il potenziale di mitigazione dei cambiamenti climatici delle biomasse. Assumendo che la combustione delle biomasse negli impianti di trasformazione liberi esattamente la stessa quantità di carbonio assorbita durante l'accrescimento, le emissioni nette a valle della trasformazione energetica sono date proprio dalle operazioni agricole e logistiche (ad es., macchinari agricoli, fertilizzanti, trasporto). La somma delle emissioni dovute a questi termini è solo una piccola frazione della quantità di emissioni di gas serra che si avrebbero producendo la stessa energia da gas naturale, petrolio o carbone e che vengono evitate dall'utilizzo delle biomasse. Questo risultato è stato ottenuto sia per le colture energetiche (capitolo 4), per cui è stata svolta una dettagliata analisi delle emissioni associate alle attività agricole e al trasporto, sia per la filiera energetica completa, dalla raccolta alla produzione di energia (capitolo 6).

Gli utilizzi delle biomasse che sono stati fino ad ora considerati sono la combustione per la produzione di energia elettrica e/o termica, in centrali elettriche, centrali di teleriscaldamento o in caldaie domestiche. Le biomasse possono però servire anche per la produzione di biocombustibili da utilizzare poi nel settore dei trasporti. La decarbonizzazione dell'energia elettrica o termica è, in un certo senso, più semplice della decarbonizzazione dell'energia utilizzata nel settore dei trasporti: gli impianti per la produzione di energia sono sufficientemente grandi per sostenere i costi di innovazione delle tecnologie e, soprattutto, costituiscono una fonte concentrata di emissioni di GHG. Scartando l'alternativa dell'idrogeno come vettore di energia da utilizzare nel breve periodo anche nel settore dei trasporti (bisognerà aspettare ancora trenta anni), l'unica fonte rinnovabile di energia che trova applicazioni nel settore è la

biomassa. I combustibili più noti derivati dalle biomasse sono sicuramente l'etanolo e il biodiesel, con rese energetiche modeste e, secondo alcuni, addirittura negative (ad es., si veda la *review* di Farrell *et al.*, 2006). In questo lavoro, si è ipotizzato di produrre biocombustibili sintetici (Fischer-Tropsch) partendo da co-gassificazione di biomasse e carbone; l'utilizzo del carbone permette di avere un impianto di grandi dimensioni con economie di scala e, quindi, rese energetiche superiori (capitolo 7). In questi impianti, inoltre, l'utilizzo delle biomasse contribuisce a mitigare gli impatti ambientali del carbone utilizzato nella produzione di energia. Come è stato discusso nel capitolo 2, il carbone continuerà ad aumentare il proprio contributo all'energia primaria utilizzata a livello globale e, in particolare, sarà sempre più usato nella produzione di energia elettrica. Le biomasse possono allora essere utilizzate insieme al carbone per diminuire le emissioni di anidride carbonica in atmosfera, in impianti che prevedono anche la cattura e il sequestro del carbonio nel sottosuolo. L'altra particolarità del sistema energetico analizzato è l'utilizzo di biomasse provenienti da praterie ad elevata biodiversità (sedici specie) e bassi input colturali (nessun apporto di azoto, grazie alla presenza di specie azotofissatrici, né irrigazione; Tilman *et al.*, 2006). Queste praterie svolgono due ruoli principali: prima di tutto costituiscono la fonte di biomassa in ingresso all'impianto considerato; in secondo luogo, contribuiscono al recupero di suoli agricoli degradati dalle pratiche agricole intensive che ne hanno fortemente diminuito il contenuto di carbonio nel suolo. Andando, quindi, a recuperare questi terreni si contribuisce anche all'arricchimento del suolo in carbonio che, di conseguenza, viene sottratto all'atmosfera. In sostanza, le biomasse non sono semplicemente neutre rispetto al carbonio (cioè tanto ne emettono nella trasformazione in energia, quanto ne hanno assorbito durante la crescita attraverso la fotosintesi), ma sono addirittura negative (cioè sottraggono carbonio all'atmosfera immagazzinandolo nel suolo). Di conseguenza, un mix in ingresso all'impianto costituito per un terzo da biomassa e per il restante da carbone, permette di produrre energia elettrica e biocombustibili con emissioni di carbonio in atmosfera pari a zero, anche grazie alla cattura e stoccaggio del carbonio.

Le peculiarità e l'innovatività dell'approccio utilizzato in questa tesi per studiare i sistemi energetici alimentati a biomasse, insieme ad alcuni punti che costituiranno lavoro futuro, possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

1. Un approccio al problema orientato alla pianificazione dell'utilizzo delle biomasse che sia sostenibile nel tempo (gli impianti di trasformazione operano su scale temporali di 20-30 anni), ma anche nello spazio (le biomasse sono utilizzate nello stesso ambito territoriale in cui sono state raccolte), e infine compatibile con l'ambiente naturale (boschi) e semi-naturale (terreni agricoli). Questo approccio serve a garantire che le biomasse siano effettivamente utilizzate come risorsa rinnovabile, cioè con tassi di utilizzo inferiori a quelli di rigenerazione. Serve, inoltre, a garantire che le biomasse contribuiscano allo sviluppo locale e ad evitare, ad esempio, che le biomasse in ingresso all'impianto provengano da lunghe distanze o, addirittura, da paesi extra-europei.
2. La conoscenza della disponibilità di biomasse da colture energetiche e da residui/sottoprodotti a scala locale, date le caratteristiche del territorio in esame. La stima delle biomasse è infatti alla base dell'analisi di tutti i sistemi per la produzione di energia da biomasse presentati. Sapere che tipo di biomasse sono a disposizione, in quali quantità e da dove provengono è molto importante per poter poi procedere alla pianificazione dell'utilizzo energetico della risorsa stessa. È infatti importante comprendere quali siano le potenzialità delle biomasse per l'energia e se queste possano significativamente incidere sul bilancio energetico di un territorio in modo

- sostenibile economicamente e rinnovabile nel tempo.
3. Lo studio della disponibilità è condotto a scala il più possibile locale per avere un quadro complessivo della distribuzione delle biomasse disponibili sul territorio. Questo approccio è stato utilizzato in tutti i casi di studio affrontati: la potenzialità delle colture energetiche (capitolo 4) e delle biomasse residuali (capitolo 5) in Emilia-Romagna e nell'Illinois (capitolo 7). Inoltre, per la provincia di Cremona (capitolo 6) il territorio è alla base dell'analisi delle filiere energetiche non solo per la disponibilità di biomassa a livello locale, ma anche per quanto riguarda il trasporto, che si ipotizza sulla rete stradale reale. Tutte queste informazioni sono importanti per le successive fasi di sviluppo di un piano energetico dell'utilizzo delle biomasse. Il metodo permette infatti di individuare le aree a maggiore o minore vocazione alla coltivazione delle biomasse, alla raccolta delle biomasse residuali e, di conseguenza, alla costruzione di impianto di trasformazione.
 4. Il lavoro svolto è propedeutico ad una analisi più dettagliata di possibili impianti di conversione, quali possono essere veri e propri studi di fattibilità. Andando maggiormente nel dettaglio dovrebbero essere incluse il dimensionamento dell'impianto; l'analisi sulla effettiva localizzazione dell'impianto, a partire ad esempio dalle aree urbane a destinazione industriale dei Piani di coordinamento provinciale territoriale; l'effettivo punto di raccolta delle biomasse dalle parcelle agricole o forestali, alle industrie del legno; tutte le operazioni che devono essere messe in atto per preparare le biomasse all'ingresso all'impianto (ad es., essiccazione, sminuzzamento, analisi chimico-fisica).
 5. Il confronto di diverse filiere di conversione delle biomasse in energia per quanto riguarda la configurazione del sistema. A sottolineare la grande varietà di biomasse e di tecnologie di conversione, nella tesi sono state studiate e confrontate diverse filiere per l'energia nella provincia di Cremona (capitolo 6) e anche, anche se in modo più *naïve*, nella regione Emilia-Romagna (capitolo 4). Il modello di localizzazione ottimale del capitolo 6 è stato formulato anche per comprendere quale possa essere la configurazione migliore di un sistema energetico a biomasse e, quindi, se sono migliori tante piccole caldaie domestiche o pochi (al limite uno solo) impianti di capacità maggiore.
 6. Il confronto di diverse filiere delle biomasse sulla base di tre obiettivi che valutano la quantità di energia prodotta, la quantità delle emissioni di CO₂ evitate e il ritorno economico atteso (capitolo 6). L'obiettivo energetico stima la quantità di energia che si può estrarre dal sistema; all'energia prodotta nella centrale si sottrae l'energia utilizzata per il trasporto e per la crescita delle piantagioni arboree di SRF. L'obiettivo ambientale valuta la quantità di emissioni di CO₂ evitate rispetto alla produzione della stessa quantità di energia attraverso tecnologie convenzionali che utilizzano combustibili fossili; alle emissioni evitate sono sottratte le emissioni legate al trasporto della biomassa e alla produzione della SRF. L'obiettivo economico stima il valore attuale netto dell'investimento, a partire dagli investimenti iniziali, i costi di gestione e manutenzione, i ricavi della vendita di energia prodotta e dei certificati verdi. I tre obiettivi sono valutati attraverso il problema di localizzazione ottima e, quindi, variano al variare della localizzazione delle centrali (da questo dipendono i costi di trasporto), e dal numero delle centrali e dalla capacità di ciascuna (da cui dipendono il rendimento e i costi di investimento e di gestione).
 7. L'utilizzo proposto delle biomasse per l'energia è stato studiato in prima approssimazione anche dal punto di vista dell'interazione con il settore agricolo alimentare tradizionale. In particolare, non si dovrebbero verificare significative

ricadute negative sul mercato alimentare. Infatti, abbiamo considerato di utilizzare i terreni agricoli marginali o set-aside per le colture energetiche. Nel momento in cui, invece, si dovesse creare un mercato delle biomasse a livello locale, le aziende agricole inizieranno a convertire la propria produzione da alimentare a bio-energetica. È evidente che maggiore è lo sforzo preliminare di pianificazione, maggiori saranno i vantaggi che deriveranno dallo sviluppo di una filiera delle biomasse per l'energia. In generale, le azioni da noi proposte porteranno benefici al settore agricolo. In ogni caso, lo sviluppo di un mercato sia delle colture energetiche alternative alle colture tradizionali (che ad oggi sopravvivono grazie agli incentivi) sia dell'utilizzo di residui agricoli, dovrebbe aumentare il reddito delle imprese agricole, renderle meno dipendenti dai sussidi e diversificarne l'economia, come auspicato a livello comunitario e nazionale. Questo aspetto delle bioenergia dovrebbe essere comunque approfondito in ulteriori analisi non solo di carattere locale, ma anche di carattere nazionale, poiché la politica agricola riguarda tutta l'Italia.

8. Il sistema energetico analizzato nel capitolo 7 considera colture energetiche innovative che sono caratterizzate da elevata biodiversità e da bassi input culturali. Queste colture sono studiate proprio con l'obiettivo di cercare di risolvere, o quantomeno alleviare, alcuni degli aspetti negativi delle biomasse per l'energia, come ad esempio la diffusione delle monocolture.

8.1 Bibliografia

Apat - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, 2005. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2002, National Inventory Report, Rapporto 47, Roma.

Dubuisson X., I. Sintzoff, 1998. Energy and CO₂ balances in different power generation routes using wood fuel from short rotation coppice, *Biomass & Bioenergy* 15: 379-390.

Farrell A.E., R.J. Plevin, B.T. Turner, A.D. Jones, M.O'Hare, D.M. Kammen, 2006. Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals, *Science* 311: 506-508.

Fiorese G., G. Guariso, A. Lazzarin, R. Razzano (2007). Energia e nuove colture agricole. Potenzialità delle biomasse a scala regionale, ed. Polipress, Milano.

Fiorese G., M. Gatto, G. Guariso (2006). Biomass for energy in mountain and farming districts of Northern Italy: Optimal plant technology and location design, *Proceedings of the World Renewable Energy Congress IX*, eds. Ali A.M. Sayigh, Elsevier.

Matthews R.W., N.D. Mortimer, 2000. Estimation of carbon dioxide and energy budgets of wood-fired electricity generation systems in Britain. In: K.A. Robertson e B. Schlamadinger (eds.) *Bioenergy for mitigation of CO₂ emissions*, IEA Bioenergy Task 25, 59-78.

Tilman D., J. Hill, C. Lehman, 2006. Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass, *Science* 314: 1598-1600.

UP - Unione Petrolifera, 2006. Relazione annuale 2006, Roma. [online] URL: www.unionepetrolifera.it

Appendice I

Processi termochimici

Combustione diretta e co-combustione

La combustione diretta è il modo più semplice per convertire in calore l'energia chimica contenuta nelle biomasse. La combustione può essere volta alla sola produzione di calore per riscaldamento o acqua calda sanitaria, ma è anche possibile utilizzare il calore ottenuto per la produzione di energia elettrica, tramite per esempio un impianto a turbina a vapore. La produzione di energia da biomasse, però, è caratterizzata da bassi rendimenti: una combustione a biomassa associata a un impianto a ciclo a vapore Rankine ha un rendimento elettrico netto dell'ordine del 25% per potenze intorno ai 10 MWe, per potenze inferiori i rendimenti sono ancora più bassi (McKendry, 2002a).

Un'alternativa alla combustione consiste nell'alimentare gli impianti tradizionali (a combustibile fossile) anche con una frazione di biomassa, in questo caso si parla di co-combustione. I rendimenti di combustione, che dipendono fortemente dal tipo di combustibile usato, sono sufficientemente elevati se si utilizzano prodotti ricchi di glucidi strutturati, come la lignina e la cellulosa, e con basso contenuto di acqua (preferibilmente inferiore al 35%). I prodotti che meglio rispondono a queste caratteristiche sono il legname di varia pezzatura, le paglie di cereali, i residui di legumi, di piante oleaginose (ricino, catramo, ecc.) e di piante da fibra (cotone, canapa, ecc.), tutti i residui di potature di varia origine, nonché i residui di lavorazione delle industrie agrarie.

Gassificazione

La gassificazione è un processo di parziale ossidazione di una sostanza solida (legno, scarti agricoli, ecc.) posta ad alta temperatura (intorno ai 900-1.000°C) in ambiente ipossico o anossico, tipicamente in un particolare reattore detto gasogeno. Il prodotto è un combustibile in forma gassosa detto gas di gasogeno (o *syngas*), caratterizzato da un basso potere calorifico inferiore, mediamente intorno ai 10.000 kJ Nm⁻³. Il gas di gasogeno è composto da una miscela di H₂, CO, CH₄, CO₂, vapore acqueo e N₂, frammisti a ceneri in sospensione e a tracce di idrocarburi (C₂H₆). Esistono diversi tipi di gassificatori: quelli ad aria, che producono un gas con PCI pari a 4.000 kJ Nm⁻³, quelli a vapor d'acqua con PCI pari a 10.000 kJ Nm⁻³ e quelli a ossigeno che arrivano a un PCI pari a 14.000 kJ Nm⁻³. Questo trattamento complesso è ancora affetto da alcune problematiche relative al basso pci del prodotto e alle molte impurità presenti sotto forma di polveri e catrami. Una diffusa applicazione del *syngas* è la co-combustione in tradizionali impianti a gas. I rendimenti complessivi dei processi di gassificazione si attestano attorno al 75-80% (McKendry, 2002c).

Pirolisi

La pirolisi è un processo di decomposizione termochimica dei materiali organici posti a elevata temperatura (400-1.000°C) in ambiente anossico o ipossico, in questo secondo caso il processo è simile alla gassificazione. Esistono tre metodi di pirolisi (convenzionale, lenta o veloce) che, in base ai parametri di reazione usati, forniscono prodotti in fase gassosa, liquida e solida in diverse proporzioni. Allo stato tecnologico attuale, tali prodotti sono affetti da impurità che possono inficiarne l'utilizzo in turbine a

gas o motori diesel. La scelta del materiale con cui alimentare il reattore è strettamente collegata al prodotto finale che si vuole ottenere, soprattutto per quanto riguarda la composizione del legno in termini di contenuto in lignina e cellulosa. In termini generali la lignina produce alcool metilico mentre la cellulosa produce acido acetico. Per ottenere questi due prodotti è necessario quindi impiegare legno proveniente da piante a foglie caduche. Per ottenere carbone di legna è invece preferibile impiegare legno proveniente da piante sempreverdi. Nel caso in cui si vada poi a effettuare la gassificazione, è possibile utilizzare qualunque tipo di biomassa. Tutto il materiale deve essere comunque sottoposto a un pretrattamento di essiccazione e sminuzzamento.

L'essiccazione è una fase sensibilmente influente sul rendimento del processo di pirolisi in quanto l'acqua contenuta nel materiale richiede un elevato calore di vaporizzazione, per questo motivo il tasso di umidità non deve superare il 20%. È possibile raggiungere questo valore con un processo di essiccazione naturale (lento, ma che non impiega energia), oppure mediante l'impiego di forni a temperatura di 100°C, che garantiscono l'evaporazione dell'acqua contenuta nel materiale evitando la possibile accensione dello stesso. Il processo di pirolisi si evolve in fasi distinte in base alla temperatura raggiunta. Fino a 400-500°C si ha la fase detta di carbonizzazione, dalla quale si origina carbone di legna, una miscela di gas (condensabili e non) e vari composti liquidi (catrami, oli ecc.). Il prodotto principale di questa fase è appunto il carbone (contenuto in C pari a 30-35% e potere calorifico pari a 25.100-29.300 kJ kg⁻¹) che corrisponde al 30-35% del materiale secco di partenza, mentre il gas è pari al 15-20% e i componenti liquidi sono circa il 25% (compreso l'acido pirolignoso). Da 600°C a 1.000°C si ha principalmente produzione di un gas composto da H₂, CO, CO₂ e vari idrocarburi, con potere calorifico pari a 12.500 kJ Nm⁻³.

Steam explosion

Lo steam explosion è un processo innovativo consiste in un pretrattamento dei substrati vegetali atto alla separazione delle tre componenti costitutive, ovvero emicellulosa, cellulosa e lignina. In questo modo è possibile utilizzare al meglio la totalità della materia prima disponibile nelle biomasse di origine vegetale. Il processo si basa sul rapido riscaldamento del materiale lignocellulosico tramite l'utilizzo di vapore saturo ad alta pressione in un reattore ad alimentazione continua o discontinua.

Processi biochimici

Digestione anaerobica

La digestione anaerobica è un processo basato sull'azione di batteri specializzati (saprofiti eterotrofi) che demoliscono le macromolecole organiche contenute nella biomassa, sia essa di tipo vegetale o derivante da sottoprodotti di origine animale. Tali batteri sono sempre presenti nella massa organica originale e si sviluppano in ambiente chiuso, grazie anche all'azione di enzimi, sintetizzati dall'organismo medesimo, che operano come catalizzatori biologici. La digestione anaerobica è condotta in appositi reattori (digestori anaerobici) progettati per evitare il contatto tra il reagente e l'ossigeno atmosferico. Il processo si svolge in tre fasi successive:

1. idrolisi delle macromolecole (cellulosa, proteine, lipidi, zuccheri e amminoacidi);
2. fase acidogena caratterizzata da formazione di acidi grassi (acido acetico);
3. fase metanigena, in cui gli acidi grassi si trasformano in metano.

I prodotti finali sono un gas combustibile, un fango ispessito e un residuo liquido chiarificato. Il prodotto principale è il cosiddetto biogas, una gas il cui potere calorifico medio è pari a $23.000 \text{ kJ Nm}^{-3}$, costituito da una miscela in percentuale variabile dei seguenti composti:

- 50-60% metano (CH_4);
- 30-35% anidride carbonica (CO_2);
- piccole percentuali di idrogeno (H_2), monossido di carbonio (CO) e idrocarburi saturi;
- tracce di acido solfidrico.

Questo gas viene essiccato e compresso per essere immagazzinato in appositi contenitori. Dato il suo elevato potere calorifico e la facilità di trasporto e di stoccaggio, il combustibile può essere utilizzato per alimentare motori endotermici o caldaie a gas per la produzione di calore ed eventualmente energia elettrica. Un'interessante peculiarità del processo è la produzione di fanghi stabilizzati che conservano intatti i principali elementi nutritivi (azoto, fosforo e potassio) della materia prima. In questo modo, tramite la mineralizzazione dell'azoto, si può ottenere un ottimo fertilizzante (ITABIA, 2005). Il liquido chiarificato (surnatante) può essere utilizzato per diluire la sostanza organica in ingresso al digestore, oppure anch'esso come liquido per la fertirrigazione o l'allestimento di zone di lagunaggio adibite a colture energetiche.

Inoltre, gli impianti di digestione anaerobica possono essere alimentati con materiale ad alto contenuto di umidità (residui di colture acquatiche o residui di colture ortive); si adattano bene, quindi, anche allo sfruttamento di reflui zootecnici o industriali (acque di vegetazione e simili), nonché di rifiuti alimentari e della frazione organica dei rifiuti solidi urbani.

Digestione aerobica

Nella digestione anaerobica il processo è basato sull'azione di microrganismi che, per la loro funzione metabolica, richiedono la presenza di ossigeno. Le sostanze organiche complesse contenute nella biomassa sono quindi demolite e convertite in sostanze più semplici. Il processo è fortemente esotermico e ha come prodotti CO_2 e H_2O ; il calore prodotto può essere trasferito all'esterno del reattore tramite scambiatori a fluido.

Fermentazione alcolica

Questo processo di tipo micro-aerofilo (basato sull'attività di batteri che prediligono basse concentrazioni di O_2) consiste nella trasformazione dei glucidi contenuti nelle biomasse vegetali in etanolo. Tale prodotto è utilizzabile direttamente come combustibile per i motori a combustione interna senza particolari difficoltà tecniche. In origine, il consumo di etanolo come carburante per i trasporti era fortemente osteggiato dall'ampia disponibilità di combustibili fossili a basso costo. In seguito però sono stati studiati diversi prodotti alternativi a benzina e gasolio, tra questi quelli che mostrano le migliori caratteristiche in termini di prestazioni, disponibilità e prezzo sono proprio l'etanolo e un suo derivato denominato ETBE (EtilTertioButilEtere), formato dalla combinazione di etanolo e un idrocarburo petrolifero (isobutene).

Produzione di metanolo

Il metanolo o alcool metilico (CH_3OH) è un combustibile che si ricava dalla trasformazione del gas di gasogeno, a sua volta ottenuto da un processo di gassificazione. Il vantaggio di questo vettore energetico è che, a differenza del gas di gasogeno, può essere agevolmente utilizzato come carburante per motori endotermici. Il

potere calorifico inferiore è dell'ordine di $21.000 \text{ kJ kg}^{-1}$, ma può essere ulteriormente elevato tramite raffinazione, ottenendo così una benzina sintetica dal potere calorifico prossimo a quello delle benzine tradizionali. In questo modo, si possono superare le inefficienze economiche connesse al trasporto e all'immagazzinamento di combustibile a basso contenuto energetico per unità di volume.

Estrazione di oli vegetali

Gli oli vegetali si ricavano dalle piante oleaginose (per esempio soia, colza, girasole). In Europa si trovano diffusamente piantagioni di colza (Germania, Francia, Gran Bretagna e Danimarca) e girasole (Francia, Spagna e Italia), mentre la soia è più diffusa in America (Stati Uniti, Brasile e Argentina). È possibile utilizzare gli oli vegetali direttamente come combustibili, senza particolari trattamenti in seguito all'estrazione, oppure sottoporli a un processo di esterificazione. Le principali caratteristiche di questi prodotti sono la disponibilità di tecnologie relativamente semplici di trasformazione e utilizzazione e la possibilità di utilizzare i sottoprodotti del processo di estrazione nell'industria farmaceutica (glicerina) o come mangimi per il bestiame (sotto forma di pannelli di materie proteiche).

Appendice II

L'agricoltura in Italia

Tavole statistiche Istat – Censimento Agricoltura 2000

<http://censagr.istat.it/dati.htm>

Tav. 1

Italia: Aziende agricole, superficie totale e superficie agricola utilizzata per regione / provincia autonoma, classe di superficie agricola utilizzata, forma di conduzione e titolo di possesso dei terreni. Anni 1990, 2000 e variazioni percentuali 2000-1990.

Superfici in ettari

REGIONI / PROVINCE AUTONOME CLASSI DI S.A.U. FORME DI CONDUZIONE TITOLO DI POSSESSO DEI TERRENI	AZIENDE AGRICOLE			SUPERFICIE TOTALE			SUPERFICIE AGRICOLA UTILIZZATA		
	2000	1990	Variazioni percentuali	2000	1990	Variazioni percentuali	2000	1990	Variazioni percentuali

Regioni / Province autonome									
Piemonte	120.796	194.078	-37,8	1.526.799,83	1.776.400,41	-14,1	1.068.298,73	1.120.249,73	-4,6
Valle d'Aosta	6.595	9.180	-28,2	190.833,83	201.331,61	-5,2	71.187,89	96.593,83	-26,3
Lombardia	74.501	132.160	-43,6	1.413.414,77	1.601.324,91	-11,7	1.035.791,51	1.104.277,96	-6,2
Trentino-Alto Adige	61.253	63.504	-3,5	1.079.651,91	1.102.341,04	-2,1	414.403,61	422.373,45	-1,9
<i>Bolzano – Bozen</i>	26.559	27.435	-3,2	609.994,31	620.373,48	-1,7	267.414,40	272.466,25	-1,9
<i>Trento</i>	34.694	36.069	-3,8	469.657,60	481.967,56	-2,6	146.989,21	149.907,20	-1,9
Veneto	191.085	224.913	-15,0	1.204.277,85	1.301.798,09	-7,5	852.743,88	881.267,49	-3,2
Friuli-Venezia Giulia	34.963	57.848	-39,6	418.686,04	490.329,34	-14,6	238.806,97	256.854,77	-7,0
Liguria	43.739	72.479	-39,7	179.010,14	331.899,08	-46,1	62.605,33	92.482,67	-32,3
Emilia-Romagna	107.787	150.736	-28,5	1.465.277,56	1.711.888,94	-14,4	1.114.287,92	1.232.219,57	-9,6
Toscana	139.872	149.741	-6,6	1.627.461,27	1.776.563,48	-8,4	857.698,79	927.568,41	-7,5
Umbria	57.153	58.551	-2,4	642.492,25	685.060,10	-6,2	367.141,42	396.185,38	-7,3
Marche	66.283	80.832	-18,0	707.471,80	793.919,44	-10,9	503.976,58	549.142,77	-8,2
Lazio	214.665	238.269	-9,9	1.070.474,32	1.245.877,87	-14,1	724.324,80	834.150,62	-13,2
Abruzzo	82.833	106.780	-22,4	659.911,03	804.442,97	-18,0	428.802,12	521.083,22	-17,7
Molise	33.973	41.415	-18,0	296.177,39	344.127,39	-13,9	214.941,49	250.693,19	-14,3
Campania	248.931	274.862	-9,4	894.154,32	992.079,87	-9,9	599.953,98	662.209,40	-9,4
Puglia	352.510	350.604	0,5	1.397.369,64	1.593.711,82	-12,3	1.258.933,69	1.453.864,57	-13,4

REGIONI / PROVINCE AUTONOME CLASSI DI S.A.U. FORME DI CONDUZIONE TITOLO DI POSSESSO DEI TERRENI	AZIENDE AGRICOLE			SUPERFICIE TOTALE			SUPERFICIE AGRICOLA UTILIZZATA		
	2000	1990	Variazioni percentuali	2000	1990	Variazioni percentuali	2000	1990	Variazioni percentuali
Basilicata	81.922	83.355	-1,7	716.837,62	844.699,12	-15,1	537.694,58	624.133,91	-13,8
Calabria	196.191	211.962	-7,4	899.382,16	1.139.987,03	-21,1	556.502,75	663.418,07	-16,1
Sicilia	365.346	404.204	-9,6	1.504.240,28	1.913.841,54	-21,4	1.281.654,84	1.598.901,04	-19,8
Sardegna	112.692	117.871	-4,4	1.713.170,33	2.050.731,45	-16,5	1.022.901,26	1.358.228,60	-24,7
Totale	2.593.090	3.023.344	-14,2	19.607.094,34	22.702.355,50	-13,6	13.212.652,14	15.045.898,65	-12,2

Tav. 2

Italia: Ripartizione delle superfici aziendali per regione / provincia autonoma, classe di superficie agricola utilizzata e forma di conduzione. Anno 2000. Superfici in ettari

REGIONI / PROVINCE AUTONOME CLASSI DI S.A.U. FORME DI CONDUZIONE	SUPERFICIE AGRICOLA UTILIZZATA				COLTURE BOSCHIVE (b)	ALTRA SUPERFICIE	SUPERFICIE TOTALE
	Seminativi (a)	Coltivazioni legnose agrarie	Prati permanenti e pascoli	Totale			
<i>Regioni / Province autonome</i>							
Piemonte	577.277,70	96.739,27	394.281,76	1.068.298,73	313.120,57	145.380,53	1.526.799,83
Valle d'Aosta	319,13	1.245,48	69.623,28	71.187,89	43.858,57	75.787,37	190.833,83
Lombardia	727.351,85	32.413,67	276.025,99	1.035.791,51	235.290,81	142.332,45	1.413.414,77
Trentino-Alto Adige	8.125,10	46.006,12	360.272,39	414.403,61	600.804,87	64.443,43	1.079.651,91
<i>Bolzano - Bozen</i>	3.999,97	23.261,07	240.153,36	267.414,40	292.056,01	50.523,90	609.994,31
<i>Trento</i>	4.125,13	22.745,05	120.119,03	146.989,21	308.748,86	13.919,53	469.657,60
Veneto	582.819,24	108.238,65	161.685,99	852.743,88	209.991,80	141.542,17	1.204.277,85
Friuli-Venezia Giulia	175.532,31	22.753,84	40.520,82	238.806,97	110.589,08	69.289,99	418.686,04
Liguria	10.501,53	18.349,19	33.754,61	62.605,33	90.310,59	26.094,22	179.010,14
Emilia-Romagna	850.702,38	151.055,37	112.530,17	1.114.287,92	210.596,63	140.393,01	1.465.277,56
Toscana	540.474,47	183.612,13	133.612,19	857.698,79	653.984,61	115.777,87	1.627.461,27
Umbria	234.544,53	49.515,97	83.080,92	367.141,42	236.640,03	38.710,80	642.492,25
Marche	400.276,11	38.409,43	65.291,04	503.976,58	137.750,80	65.744,42	707.471,80
Lazio	348.393,40	148.814,45	227.116,95	724.324,80	266.834,10	79.315,42	1.070.474,32
Abruzzo	182.876,70	82.740,99	163.184,43	428.802,12	167.973,12	63.135,79	659.911,03
Molise	155.648,69	21.406,57	37.886,23	214.941,49	55.851,05	25.384,85	296.177,39
Campania	308.776,42	177.934,37	113.243,19	599.953,98	215.839,58	78.360,76	894.154,32
Puglia	659.699,51	506.862,98	92.371,20	1.258.933,69	78.752,71	59.683,24	1.397.369,64
Basilicata	333.580,24	56.265,28	147.849,06	537.694,58	134.063,71	45.079,33	716.837,62
Calabria	181.244,11	235.679,25	139.579,39	556.502,75	276.250,69	66.628,72	899.382,16
Sicilia	647.857,19	398.109,67	235.687,98	1.281.654,84	122.819,81	99.765,63	1.504.240,28
Sardegna	414.220,77	81.840,91	526.839,58	1.022.901,26	549.487,84	140.781,23	1.713.170,33
Totale	7.340.221,38	2.457.993,59	3.414.437,17	13.212.652,14	4.710.810,97	1.683.631,23	19.607.094,34

Appendice III

Schema dell'impianto C-V-FT alimentato a carbone e dell'impianto CB-V-FT alimentato a carbone e biomassa

Schema dell’impianto C-FT-V alimentato a carbone, senza cattura e sequestro della CO₂ (CCS) nel sottosuolo per la produzione di energia elettrica e di combustibili sintetici Fischer-Tropsch (FTL)

only coal	ATMOSPHERE									
	Carbon flows in									
	Carbon vented from plant	584,83	t C/day							
	Carbon from combustion of FT-L	1811,92	t C/day							
	Carbon from coal upstream emissions	283,19	t C/day							
	Carbon from biomass upstream emissions	0,00	t C/day							
	Carbon emitted by soil	0,00	t C/day							
	Total carbon flow in	2679,95	t C/day							
	Carbon flows out									
	Carbon to biomass	0,00	t C/day							
Carbon to soil and roots	0,00	t C/day								
Total carbon flow out	0,00	t C/day								
Carbon balance										
carbon in - carbon out		2,679,95	t C/day							

POLYGENERATION FACILITY									
Capacity factor	80%	%							
hours/year	8.760	hr/yr							
sec/year	31.536.000	sec/yr							
Unconverted char	1,00%	%							
η _{LHV} of FT-L production	33,48%	%							
η _{LHV} of electricity production	13,88%	%							
η _{CCS}	87,90%	%							
Total feedstock (coal+biomass)	3086	MW							
of which biomass	0%	%							
of which coal	100%	%							
Electric power	428,44	MW							
Electricity produced	3753,18	GWh							
Carbon flows in									
Carbon from coal to plant	6.714,17	t C/day							
Carbon from biomass to plant	0,00	t C/day							
Total carbon flow in	6.714,17	t C/day							
Carbon flows out									
Carbon in FT-L	1.811,92	t C/day							
Carbon in char	67,14	t C/day							
Carbon to CCS	4.250,28	t C/day							
Carbon vented	584,83	t C/day							
Total carbon flow out	6.714,17	t C/day							

SOIL		
Carbon uptake by soil and roots	0,30	t C/dry biomass t C/ha/yr
Carbon emissions from soil	0	t C/ha
Carbon flows in		
Carbon sequestered in soil	0,00	t C/day
Carbon captured in CCS	4.250,28	t C/day
Carbon in char	67,14	t C/day
Carbon flows out		
Carbon emitted by soil	0	t C/day

BIOMASS	
LHV of dry matter	17,5 MJ / kg biom dry
moisture content	20% %
ash content	2,0% %
LHV	13,50 MJ / kg biom
Carbon content	0,47 kg C / kg biom dry
	0,38 kg C / kg biom
	27,83 kg C / GJ LHV
upstream biomass emissions	0,02 kg C / kg biom dry
	0,019 kg C / kg biom
	1,43 kg C / GJ LHV
Yield	7,91 t dry/ha
Cultivated area	0 ha
Biomass supply	0,00 t dry/day
	0,00 t/day
	0,00 MW
carbon from biomass flows in	
carbon in biomass	0,00 t C/day
carbon from biomass flows out	
net capture from atmosphere	0,00 t C/day
upstream biomass emissions	0,00 t C/day

FT-L	
LHV FT-L	43,40 MJ/kg
C content	0,88 kg C/kg fuel
	20,29 g C / MJ LHV
FT-L production	2.057,18 t/day
	1.033 MW
Carbon content of FT-L	
Carbon to FT-L	1.811,92 t C/day

COAL	
LHV dry	0,00 MJ/kg coal dry
moisture content	0,00 %
ash content	0,00 %
LHV	25,30 MJ/kg coal
Carbon content	0,63708 t C/t coal
	25,18 kg C / GJ LHV
Upstream coal emission	0,027 kg C / kg coal
	1,062 kg C / GJ LHV
Coal supply	10.538,9 t/day
	3.086,04 MW
Carbon from coal flows	
Carbon in coal	6.714,17 t C/day
Coal upstream emission	283,19 t C/day
Total carbon output	6.997,37 t C/day

coal & biomass

BIOMASS		17.5	MJ / kg biom dry
LHV of dry matter	moisture content	20%	%
ash content	LHV	13.50	MJ / kg biom
Carbon content		0.469638	kg C / kg biom dry
		0.38	kg C / kg biom
		27.83	kg C / GJ LHV
upstream biomass emissions		0.02	kg C / kg biom dry
		0.019296	kg C / kg biom
		1.43	kg C / GJ LHV
Yield		7.91	t dry/ha
Cultivated area		209,310	ha
Biomass supply		4,536	t dry/day
		5,670	t / day
		885.94	MW
carbon from biomass flows in	carbon in biomass	2,130.28	t C/day
carbon from biomass flows out	carbon in biomass to plant	2,130.28	t C/day
	upstream biomass emissions	109.41	t C/day

SOIL	
Carbon uptake by soil and roots	0.30 1.11 0
Carbon emissions from soil	
Carbon flows in	
Carbon sequestered in soil	635.84
Carbon captured in CCS	4,466.99
Carbon in char	49
Carbon flows out	
Carbon emitted by soil	0

COAL			
LHV dry	0.00	MJ/kg coal dry	
moisture content	0.00	%	
ash content	0.00	%	
LHV	25.30	MJ/kg coal	
Carbon content	0.63708488	t C/t coal	
	25.18	kg C / GJ LHV	
Upstream coal emission	0.027	kg C / kg coal	
	1.082	kg C / GJ LHV	
Coal supply	7.649.86	t/day	
	2.240.06	MW	
Carbon from coal flows			
Carbon in coal	4.873.61	t C/day	
Coal upstream emission	205.56	t C/day	
Total carbon output	5.079.17	t C/day	

