

STRUMENTI
PER LA DIDATTICA E LA RICERCA

– 177 –

Le biomasse lignocellulosiche

a cura di

Enrico Bonari
Giampiero Maracchi

Firenze University Press
2016

Le biomasse lignocellulosiche / a cura di Enrico Bonari,
Giampiero Maracchi. – Firenze : Firenze University Press, 2016.
(Strumenti per la didattica e la ricerca ; 177)

<http://digital.casalini.it/9788866559856>

ISBN 978-88-6655-984-9 (print)
ISBN 978-88-6655-985-6 (online)

Progetto grafico di Alberto Pizarro Fernández, Pagina Maestra snc

Editorial Board:

Nicoletta Nasso o Di Nasso
Simona Bosco
Federico Dragoni
Marco Mancini
Anna Dalla Marta
Simone Orlandini
Neri Roncucci

Maria Valentina Lasorella
Valentina Giulietti
Cristiano Tozzini
Giorgio Ragolini
Ricardo Villani
Federico Triana



Fondazione
Clima e
Sostenibilità



ENTE
CASSA DI RISPARMIO
DI FIRENZE



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DISPAA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLE
PRODUZIONE AGRICOLE E
DELL'AMBIENTE



Accademia dei Georgofili



Certificazione scientifica delle Opere

Tutti i volumi pubblicati sono soggetti ad un processo di referaggio esterno di cui sono responsabili il Consiglio editoriale della FUP e i Consigli scientifici delle singole collane. Le opere pubblicate nel catalogo della FUP sono valutate e approvate dal Consiglio editoriale della casa editrice. Per una descrizione più analitica del processo di referaggio si rimanda ai documenti ufficiali pubblicati sul catalogo on-line della casa editrice (www.fupress.com).

Consiglio editoriale Firenze University Press

G. Nigro (Coordinatore), M.T. Bartoli, M. Boddi, R. Casalbuoni, C. Ciappei, R. Del Punta, A. Dolfi, V. Fargion, S. Ferrone, M. Garzaniti, P. Guarnieri, A. Mariani, M. Marini, A. Novelli, M.C. Torricelli, M. Verga, A. Zorzi.

© 2016 Firenze University Press
Università degli Studi di Firenze
Firenze University Press
via Cittadella, 7, 50144 Firenze, Italy
www.fupress.com
Printed in Italy

Indice

Introduzione	9
<i>Enrico Bonari</i>	
Premessa	15
<i>Giampiero Maracchi</i>	
CAPITOLO 1	
Le politiche nazionali ed europee sulle agroenergie	19
1. Le politiche climatiche ed energetiche dell'Unione Europea	19
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	
2. La politica europea sulle rinnovabili	23
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	
3. La produzione di energia dall'agricoltura	25
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	
4. La politica incentivante europea per le bioenergie	27
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	
5. Le bioenergie: situazione internazionale	29
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	
6. La produzione di energia dall'agricoltura in Italia: lo schema incentivante per l'energia elettrica	36
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	
7. La produzione di energia dall'agricoltura in Italia: lo schema incentivante per l'energia termica	43
<i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	

6 Le biomasse lignocellulosiche

8. I fondi strutturali ed il ruolo del PSR 2007-2013 <i>Simona Bosco, Federico Dragoni</i>	44
---	----

CAPITOLO 2

La produzione di energia dall'agricoltura	49
---	----

1. Descrizione delle filiere bioenergetiche <i>Nicoletta Nassi o di Nasso, Simona Bosco</i>	49
--	----

2. Cenni sulle tecnologie di conversione <i>Marco Mancini, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini</i>	58
--	----

3. I biocombustibili di seconda generazione: la produzione di bioetanolo da biomasse lignocellulosiche <i>Nicoletta Nassi o di Nasso</i>	69
---	----

CAPITOLO 3

Le colture dedicate	75
---------------------	----

1. Aspetti generali <i>Cristiano Tozzini</i>	75
---	----

2. Canna comune (<i>Arundo donax</i> L.) <i>Neri Roncucci, Nicoletta Nassi o Di Nasso</i>	79
---	----

3. Miscanto (<i>Miscanthus × giganteus</i> Greef et Deuter) <i>Neri Roncucci, Nicoletta Nassi o Di Nasso</i>	90
--	----

4. Cardo (<i>Cynara cardunculus</i> L.) <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Maria Valentina Lasorella</i>	101
--	-----

5. Panico (<i>Panicum virgatum</i> L.) <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Maria Valentina Lasorella -</i>	111
---	-----

6. Sorgho (<i>Sorghum bicolor</i> L.) <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Maria Valentina Lasorella</i>	122
--	-----

7. Pioppo (<i>Populus</i> spp.) <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Valentina Giulietti, Simona Bosco</i>	135
--	-----

8. Eucalipto (<i>Eucalyptus</i> spp.) <i>Valentina Giulietti</i>	154
--	-----

9. Robinia (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.) <i>Valentina Giulietti</i>	163
--	-----

10. Salice (<i>Salix spp.</i>) <i>Valentina Giuliotti</i>	170
11. Disponibilità potenziali ed effettive dei residui colturali <i>Marco Mancini, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini</i>	177
CAPITOLO 4	
Vocazionalità delle aree applicata alle colture da energia	185
1. Aspetti generali <i>Giorgio Ragagnini, Ricardo Villani, Federico Triana</i>	185
2. Metodologie e approcci impiegati negli studi di vocazionalità <i>Giorgio Ragagnini, Ricardo Villani, Federico Triana</i>	186
3. Caso studio Regione Toscana <i>Giorgio Ragagnini, Ricardo Villani, Federico Triana</i>	192
CAPITOLO 5	
La sostenibilità delle colture dedicate ad uso energetico	197
1. Aspetti generali <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Neri Roncucci</i>	197
2. I bilanci agroambientali <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Neri Roncucci</i>	199
3. Le colture dedicate e la biodiversità <i>Neri Roncucci, Nicoletta Nassi o Di Nasso</i>	210
4. Considerazioni economiche <i>Nicoletta Nassi o Di Nasso, Neri Roncucci</i>	215
5. Water footprint <i>Anna Dalla Marta, Marco Mancini, Simone Orlandini</i>	219
BIBLIOGRAFIA	223
RINGRAZIAMENTI	243
EDITORIAL BOARD	245

Enrico Bonari

Introduzione

È ormai noto che le riflessioni in atto sulla possibile valorizzazione energetica delle biomasse lignocellulosiche di varia origine – e in particolare sulla produzione di biomasse da colture dedicate a destinazione energetica (energia termica e/o elettrica) – prendono lo spunto da alcuni ‘elementi’ essenziali che hanno caratterizzato da vari anni l’evoluzione recente dell’agricoltura; nel nostro paese come in tutta l’UE e in gran parte del mondo occidentale.

Da un lato, infatti, essa è stata sempre più spesso chiamata ad acquisire un ruolo più ‘multifunzionale’ nella gestione del territorio rurale, anche attraverso una ulteriore attenta revisione dei sistemi colturali tradizionali, verso un sempre minore impiego di input chimici ed energetici, per una maggiore attenzione alle specificità locali nelle produzioni agro-alimentari e, infine, anche nella direzione di una maggiore valorizzazione degli usi ‘non alimentari’ delle produzioni agricole.

Dall’altro lato, inoltre, il sempre crescente bisogno di energia (possibilmente ‘pulita’) della nostra società, la ulteriore presa di coscienza del fenomeno dei cambiamenti climatici e la necessità di ridurre le emissioni di gas-serra, assieme al perdurante aumento del prezzo del petrolio, suggeriscono senz’altro un maggiore impiego delle fonti rinnovabili di energia e, in questo contesto, anche del complesso delle diverse tipologie di biomasse di origine agricola e agroforestale. Le filiere agroenergetiche possono quindi rappresentare l’anello di congiunzione tra una logica di sviluppo sostenibile del processo produttivo agricolo (finalizzata anche al contenimento delle importazioni di energia e, contestualmente, alla riduzione delle emissioni climalteranti) e la necessità di dare uno sbocco adeguato alla difficile situazione congiunturale del mondo agricolo ed agroindustriale, chiamato da un lato ad intraprendere radicali innovazioni di processo e di prodotto e, dall’altro, anche a sfruttare meglio le relative opportunità di indirizzo

nella nuova Politica Agricola Comunitaria (PAC). A livello europeo appare infatti evidente come, spesso, un ruolo di rilievo nella 'rigenerazione multifunzionale' delle imprese agricole potrebbe essere svolto anche dalla coltivazione *ad hoc* di colture dedicate per la produzione di biomassa a destinazione energetica.

Del resto, proprio sul finire del secolo da poco concluso (PNERB 1999), il mondo scientifico nazionale aveva già abbondantemente convenuto sull'opportunità di studiare, sia a livello nazionale che locale, nuove organizzazioni produttive (vere e proprie nuove filiere) basate sia sulla valorizzazione in chiave energetica dei diversi residui agricoli, forestali ed agroindustriali, sia, in aggiunta, sulla attenta produzione di biomassa da colture dedicate (per metà biocarburanti e per metà biomasse lignocellulosiche); ma nel nostro paese un effettivo incremento di interesse alle problematiche delle 'agroenergie' è stato registrato soltanto a metà di questo decennio, dopo l'ultima riforma della Politica Agricola Comunitaria ed a seguito dei provvedimenti legislativi e regolamentari in tal senso presi a livello nazionale e regionale a sostegno delle agroenergie. Lo stesso nostro mondo agricolo sembra finalmente aver recepito le opportunità offerte dalle differenti possibilità di produrre e vendere energia (calore e/o energia elettrica) e, ormai consapevole della sua 'multifunzionalità' nella gestione del territorio rurale, sta intravedendo, nella coltivazione delle specie destinate alla produzione di energia, una alternativa (sicuramente non esclusiva) alle crescenti difficoltà economiche imposte da un mercato sempre più globalizzato e da una Politica Agricola Comunitaria che sta riducendo gli aiuti comunitari e, di conseguenza, i redditi degli agricoltori.

Non è nostro compito trattare in questa sede della valorizzazione dei residui agroforestali ed agroindustriali – che pur merita una riflessione a parte, soprattutto per le opportunità di carattere agroambientale che la caratterizzano – per cui, al riguardo, ci limiteremo ad alcune sintetiche considerazioni 'agro-ecologiche', di possibile interesse rispetto alle colture da biomasse solide destinabili alle diverse utilizzazioni energetiche nelle aree agricole del nostro paese. Ed anche per quanto attiene alle colture agrarie (cereali, oleaginose, barbabietola ecc.) oggi destinabili alla produzione nazionale di biocarburanti liquidi (biodiesel ed etanolo), non c'è molto da aggiungere alle conoscenze già in nostro possesso rispetto alle stesse destinate al consumo alimentare: sul piano agronomico-produttivo queste sono assai ben conosciute e anche sul piano della logistica, dello stoccaggio e della movimentazione del prodotto non sembrano evidenziarsi difficoltà aggiuntive; ed è anche relativamente facile stimarne le rese medie conseguibili nei differenti ambienti agropedoclimatici del nostro paese. Al riguardo, semmai, si ritiene ancora necessario ottimizzare meglio la scelta delle varietà e/o degli ibridi più adatti all'impiego *no food* e cercare di ridurre ulteriormente i costi di produzione dell'unità di prodotto.

Di contro, nel contesto delle colture da biomassa ‘lignocellulosica’, sia che si tratti di specie erbacee (annuali e poliennali) o di specie legnose, la situazione complessiva è invece assai differente: da un lato, queste coltivazioni sono in genere assai meno conosciute dagli agricoltori (dall’impianto delle colture, alla loro conduzione, alla raccolta ed allo stoccaggio) ed anche le attività di ricerca e di sperimentazione applicata loro riservate negli ambienti mediterranei sono ancora decisamente meno ‘mature’ e significative.

Inoltre, dall’altro lato, non possiamo non prendere atto del fatto che molti degli impianti industriali già funzionanti (peraltro spesso di dimensioni di almeno 10-20 MW elettrici ciascuno – per la cui alimentazione occorrono almeno 100-200.000 t/anno di prodotto con non più del 35-40% di umidità – che appaiono eccessive rispetto alle disponibilità locali) sono stati progettati e costruiti con criteri che costringono già adesso le centrali ad approvvigionarsi di biomasse agro-forestali anche a notevoli distanze dall’impianto (e fin’anche all’estero); e che sovente non si prestano ad una alimentazione con biomasse di caratteristiche qualitative differenti e/o variate nel corso della stagione. Tutto ciò da luogo ad una logistica assai complicata e poco accettata dalle popolazioni, con alti costi di trasporto e di stoccaggio della materia prima e dubbia validità ecologico-ambientale in termini di bilancio energetico e della CO₂.

Preso atto di quanto sopra, vorremmo in questa sede richiamare alcuni degli aspetti principali delle esigenze, delle tecniche colturali e delle effettive opportunità offerte dalle ‘colture dedicate’ che ci sono sembrati spesso sottovalutati nell’ambito delle ipotesi di valorizzazione delle ‘agroenergie’ nel nostro paese; ma ciò non prima di aver puntualizzato alcune considerazioni introduttive per noi prioritarie:

- occorre sempre aver presente che nel nostro paese la produzione di energia dalle colture dedicate, se da un lato non potrà che risultare di entità marginale rispetto ai fabbisogni energetici nazionali, dall’altro lato, è anche indubbio che essa possa offrire agli agricoltori italiani alcune alternative produttive di discreto interesse economico;
- l’organizzazione di un percorso virtuoso di produzione di energia dalle biomasse deve comunque tener conto delle specifiche ‘vocazionalità’ delle aree agricole e forestali interessate e delle loro attuali caratteristiche produttive;
- a livello locale occorre privilegiare il ruolo ‘complementare’ delle colture dedicate rispetto alla valorizzazione delle biomasse residuali (agricole, forestali, reflui zootecnici, agroindustriali ecc); disponibili a livello aziendale e sul territorio;
- per quanto possibile, occorre attivare filiere ‘corte’, di pressoché esclusivo dominio agricolo e destinate (anche in forma integrata tra più filiere) alla produzione di biocarburanti e biocombustibili prevalentemente destinati all’‘autoconsumo’ agricolo nel limitrofo territorio rurale.

La effettiva conoscenza delle caratteristiche bio-agronomiche e produttive delle potenziali colture dedicate da biomassa e la contemporanea rinuncia a rincorrere sempre (per tutte le colture ed in tutti i sistemi colturali) la massima produzione quantitativa – a vantaggio dell'adozione di un livello di impiego dei mezzi tecnici più contenuto (lavorazioni, concimazioni, fitofarmaci e irrigazione) che tenda invece ad ottimizzare il reddito lordo ed il 'rendimento' energetico delle colture – risultano elementi fondamentali per rendere 'ecologicamente' più accettabile l'intero processo di introduzione delle agroenergie nelle nostre attività agricole e, inoltre, per favorire, anche sotto il profilo agronomico-produttivo, ambientale ed economico, una adeguata valorizzazione delle superfici a seminativo sempre più a rischio di abbandono.

Dal lavoro di ricerca condotto in questi ultimi anni sulla maggior parte delle colture dedicate di possibile interesse negli ambienti mediterranei scaturiscono alcune considerazioni che riteniamo opportuno anticipare rispetto alla trattazione degli argomenti contenuti nel volume e che lasciamo volentieri alle riflessioni di chi deve, a vario livello, gestire le scelte sia a livello aziendale che politico e, quindi, a chi è chiamato soprattutto a definire gli indirizzi economici del comparto.

- Se, da un lato, è ovvio che dobbiamo ammettere che la 'bioenergia' non può che rappresentare quote modeste del soddisfacimento dei fabbisogni energetici del nostro paese (ormai vicini ai 200 Mtep), è anche indispensabile prendere atto una volta per tutte che l'agricoltura italiana ha 'bisogno' di attivare queste filiere – ed il *no food* in generale – per arricchire le possibilità di scelta degli imprenditori agricoli in termini di ordinamenti colturali; e per evitare che, soprattutto nelle aree meno facili, il rischio di un crescente abbandono dei terreni coltivati divenga un problema di per se stesso non sostenibile nella gestione dello spazio rurale.
- In questa logica, però, dobbiamo anche evitare eccessivi entusiasmi e facili generalizzazioni: occorre definire con la massima razionalità quali possono essere i territori di maggiore interesse per la 'bioenergia', avendo cura di prestare la massima attenzione alle diverse caratteristiche agropedoclimatiche delle varie zone, alle tipologie agrarie storicamente determinatesi e, quindi, alla soluzione degli eventuali problemi di integrazione delle colture da energia con le caratteristiche (anche paesaggistiche) dei sistemi colturali in atto; e stabilire così le effettive dimensioni da dare al 'distretto agroenergetico' effettivamente sostenibile.
- Le filiere della bioenergia non possono che essere prevalentemente 'locali', in grado di integrare adeguatamente le diverse possibili produzioni di biomasse per biocombustibili (fuidi e solidi) da colture dedicate, con le disponibilità di biomasse residuali di origine forestale, agricola ed agro-alimentare; le filiere devono essere il più possibile 'corte', con

impianti di piccole/medie dimensioni, tecnologicamente adatti alla microgenerazione diffusa, basati su tecnologie semplici da gestire a livello poco più che aziendale ed in grado di produrre energia (termica ed elettrica) in massima parte utilizzata sul posto.

- Tutti gli 'attori' economici che si incontrano lungo le 'filiera' della 'bio-energia' (agricoltori produttori, raccoglitori, trasportatori e trasformatori, regioni, province ed altri enti territoriali, enti pubblici e privati, ricercatori e divulgatori ecc.) devono dare vita e mantenere attivo un 'tavolo' di concertazione per verificare congiuntamente i problemi aperti e confrontare i rispettivi legittimi interessi e trovare di volta in volta la soluzione migliore per il più tempestivo possibile raggiungimento degli obiettivi concordati.

Giampiero
Maracchi

Premessa

Il mondo dalla metà degli anni 2000 è entrato in una profonda crisi. Una crisi che si articola in tanti aspetti diversi: dal cambiamento del clima agli impatti della società industriale sull'ambiente, dalla deindustrializzazione dell'occidente alla caduta dei redditi delle famiglie, dalla abdicazione della politica a favore dell'economia alla caduta dei valori morali, dal consumismo sfrenato alla crescita a dismisura dei centri urbani, dalla migrazione di milioni di persone al crescere del terrorismo.

L'insieme di queste crisi mette in evidenza come il modello che fu messo a punto nell'Ottocento e successivamente portato a compimento nel Novecento non è più attuale e richiede quindi una riflessione pari a quella che venne fatta nel periodo dell'illuminismo e portò in occidente alla società attuale.

Una società dipendente dal petrolio: nel 2015 a livello mondiale ne consumiamo il doppio del 1980. Le emissioni dell'ultimo secolo ed il conseguente effetto serra hanno modificato pesantemente la circolazione generale dell'atmosfera ed incrementato i fenomeni estremi quali le piogge intense, la siccità, le tempeste di vento, il numero degli uragani e dei tornado e la loro intensità.

La globalizzazione, con l'avvento alla ribalta della economia mondiale di nuovi grandi paesi come Cina, India e Brasile, ha trasferito buona parte della capacità manifatturiera dei paesi di antica industrializzazione a queste nuove aree dove il costo della mano d'opera è assai inferiore e dove le regole che stanno dietro al lavoro sono molto più permissive di quelle dell'occidente. Ciò ha ridotto le opportunità di lavoro, trasformando paesi un tempo fortemente attivi in paesi con gravi problemi di bilancio e di occupazione ma anche con la perdita progressiva di capacità produttive.

In sostanza l'unico settore che in questi anni è cresciuto è il commercio, attività senz'altro utile ma, quando diventa esclusiva, rappresentante una grave perdita in termini di cultura imprenditoriale e di capacità di fare.

L'espansione dei mezzi di trasporto ha accresciuto sempre di più l'impiego di combustibili fossili, in particolare del petrolio: nel 2020 si stima che il 40% delle emissioni di gas ad effetto serra sarà dovuto ai trasporti, in particolare incrementati dal commercio internazionale anche di prodotti come quelli agricoli freschi che potrebbero essere coltivati localmente.

La necessità sempre maggiore di petrolio è anche alla radice di numerose attività belliche, in particolare nel medio oriente, con conseguenze pesanti non solo dal punto di vista dei rischi a cui vengono esposti tanti giovani alle armi ma anche dal punto di vista dell'impatto sulla economia dei paesi più pesantemente coinvolti.

Il sempre crescente intervento degli Stati nei diversi settori della vita economica, della salute e dell'ambiente ha fatto crescere il debito pubblico al di là della sostenibilità, ipotecando spesso l'avvenire delle giovani generazioni e favorendo le crisi dell'ultimo decennio.

I parametri di sostenibilità ambientale mettono sempre più in evidenza come la soglia di attenzione nell'uso delle risorse rinnovabili del pianeta sia già stata sorpassata da oltre venti anni. La messa a punto dell'indice HDI (*Human Development Index*) delle Nazioni Unite, che dovrebbe in prospettiva sostituire il PIL, in confronto con l'impronta ecologica dello sviluppo evidenzia come ad un iniziale aumento dell'impatto dell'uomo sull'ambiente corrisponda una rapida crescita del benessere; ma dopo questa prima fase aumentano molto gli impatti sull'ambiente senza che vi sia più un significativo aumento del benessere.

La concentrazione della popolazione, una volta distribuita su tutto il territorio nazionale, in grandi centri urbani che raggiungono dimensioni addirittura di decine di milioni di abitanti, crea non solo difficoltà di gestione da tutti i punti di vista ma obbliga anche gli abitanti ad assumere criteri completamente nuovi e spesso alienanti per impostare la vita di tutti i giorni.

Il crearsi di queste megalopoli ha aumentato la necessità di spostamenti al loro interno su lunghi tragitti tutti i giorni incrementando l'uso dell'energia e creando problemi enormi di inquinamento atmosferico. Del pari, la concentrazione di abitanti per unità di superficie ha creato enormi problemi di smaltimento di rifiuti spesso, anche in questo caso con ingenti quantità di energia coinvolte.

Questo per citare solo alcuni dei problemi che la società postindustriale deve affrontare in tempi relativamente brevi se vuole dare un futuro accettabile alle nuove generazioni.

In questo contesto l'agricoltura, che nella sua formulazione più avanzata è stata la base per la rivoluzione industriale attraverso l'aumento della produzione pro capite che ha liberato mano d'opera, nel secondo dopoguerra è stata considerata nell'immaginario collettivo una attività di secondo piano, spesso identificata come un residuo di un passato fatto di miseria e di privazioni. Questo sentimento in sostanza negativo, alla luce delle crisi

brevemente accennate, si va modificando tanto che le nuove generazioni stanno guardando con un certo interesse nuovamente a questa attività.

L'agricoltura e la selvicoltura infatti, se esercitate con adeguati criteri che tengano conto delle possibili emissioni delle tecnologie agricole, sono le uniche attività umane che si basano su un processo, la fotosintesi, che è *carbon free*. Infatti tanta anidride carbonica viene assorbita dalle piante e tanta verrà riemessa quando la sostanza organica verrà bruciata. Anche per questo le società del passato non hanno svolto alcun ruolo dal punto di vista del cambiamento del clima. Dunque, l'agricoltura e la selvicoltura sono una delle possibili risposte al cambiamento del clima ma anche una risposta a molte di quelle crisi a cui abbiamo accennato. È evidente che in questo caso ci dobbiamo aspettare una rivoluzione pari a quella che si determinò con la sostituzione della civiltà industriale ed urbana a quella agricola e rurale. Probabilmente se questo passaggio dovesse accadere non sarà indolore e certamente non privo di difficoltà enormi per verificarsi.

In questo contesto il ruolo della energia è sempre più rilevante in quanto la nostra civiltà si basa ormai su un ampio uso della energia per tutte le attività umane. È necessario però passare da una società petrolio-dipendente ad una società che si basi su risorse energetiche rinnovabili. Da questo punto di vista l'agricoltura e complessivamente gli spazi rurali possono dare un contributo importante attraverso l'utilizzo di svariate forme di energie alternative, dalle biomasse ai biocarburanti, dal solare all'eolico, dalla produzione di metano connessa agli allevamenti bovini al minidroelettrico nelle zone montane. L'insieme di queste sorgenti di energia insieme ad una riduzione dei consumi anche attraverso le nuove tecnologie rappresentano un contributo importante alle disponibilità nazionali.

Per questa ragione abbiamo voluto raccogliere una serie di interventi qualificati su questi argomenti grazie all'Ente Cassa di Risparmio di Firenze che ha voluto appoggiare questa iniziativa.

Le politiche nazionali ed europee sulle agroenergie

I. Le politiche climatiche ed energetiche dell'Unione Europea

Simona Bosco, Federico Dragoni

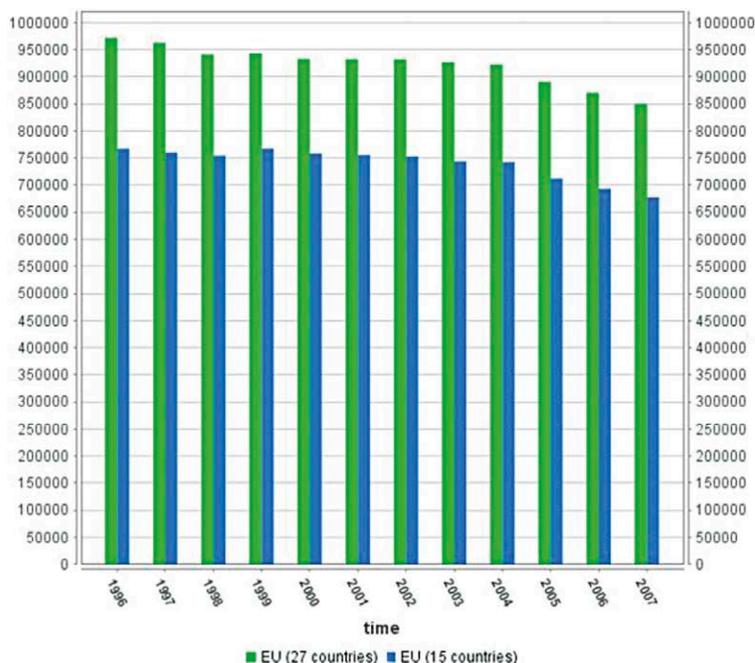
Le incertezze legate all'economia mondiale, in modo particolare riguardo all'approvvigionamento di energia, assieme ai rischi connessi con i cambiamenti climatici causati dalle emissioni di gas serra, hanno messo seriamente in discussione la sostenibilità dell'attuale sistema energetico mondiale. La domanda di energia a livello globale è, secondo i dati dell'International Energy Agency (IEA), in forte crescita, pur avendo subito nel 2009 un brusco rallentamento in seguito alla crisi finanziaria. Secondo gli scenari di riferimento analizzati dall'IEA i paesi emergenti contribuiranno in futuro al 75% di questo aumento, con la Cina in prima linea.

A fronte dell'aumento della domanda a livello mondiale, secondo i dati Eurostat, in Europa nel 2009 l'energia prodotta ha rappresentato appena il 46% di quella complessivamente consumata e presenta un trend in diminuzione (fig. 1). L'Unione Europea importa ogni anno oltre il 50% dell'energia che consuma, impegnando circa il 2,5% del Pil annuale per l'importazione di petrolio e gas; l'approvvigionamento energetico ha acquisito quindi in Europa sempre maggior rilievo, in parallelo con la necessità di ridurre l'impatto ambientale della produzione e del consumo di energia.

È ormai opinione condivisa, sia a livello scientifico che politico, che gli interventi da adottare per affrontare tali problemi riguardino prioritariamente la diffusione di tecnologie e comportamenti sempre più virtuosi per la produzione e l'uso razionale dell'energia. La necessità di migliorare il network di distribuzione, l'efficienza nella produzione e le performance ambientali dell'intero settore, ha portato negli ultimi anni la Commissione Europea ad accelerare l'approvazione di nuove politiche energetiche e climatiche. Gli interventi sulla promozione di energie rinnovabili nell'Unione

vedono il loro inizio nel 1997 con la pubblicazione del Libro Bianco, soprattutto per la necessità di abbassare la quota di carbone utilizzato nella produzione di energia elettrica e ridurre l'importazione di combustibili fossili da paesi extra europei politicamente instabili.

Figura 1 – Produzione primaria di energia in Europa in migliaia di tonnellate equivalenti di petrolio (1.000 Tep). [Fonte: Eurostat 2010]

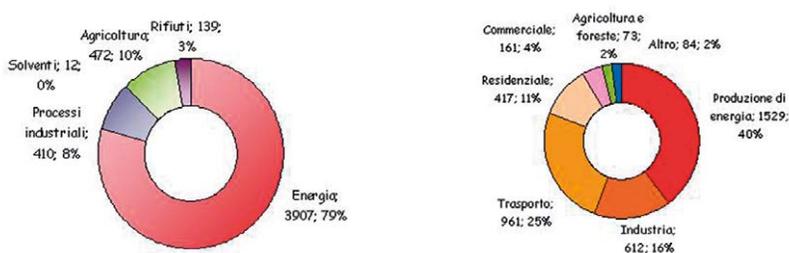


Ma è a partire dalla comunicazione *Una Politica Energetica per l'Europa* nel 2007 che, analizzando il quadro della produzione energetica nel continente, viene introdotto il pacchetto integrato di misure che istituiscono l'attuale politica energetica europea. Inoltre, nello stesso anno, con la comunicazione *Limiting Global Climate Change to 2 degree Celsius: the way ahead for 2020 and beyond* era stata riconosciuta l'urgenza della problematica climatica, anche a seguito della pubblicazione del Rapporto Stern che illustrava i benefici economici di un'azione immediata contro il cambiamento climatico.

L'Europa ha così deciso di farsi promotrice a livello mondiale della lotta alle emissioni di gas serra, accettando la sfida di imporsi obiettivi unilaterali in vista della scadenza del primo periodo d'impegno previsto dal protocollo di Kyoto (2008-2012). In seguito all'adesione all'Accordo di Copenhagen, approvato nel dicembre 2009 dagli Stati nella Conferenza delle Parti dell'UNFCCC in merito agli obiettivi per il periodo post-Kyoto

(2013-2017), il Consiglio Europeo ha definito anche una scadenza a lungo termine per un'economia a bassa intensità di carbonio. A questo scopo, nel marzo 2011, è stata presentata la *Roadmap verso un'economia low carbon al 2050*, nella quale è stato proposto un taglio dei gas serra dell'80-95% al 2050. Anche per questo le politiche climatiche, energetiche ed economiche dell'Unione Europea stanno convergendo verso obiettivi comuni. Del resto la produzione di energia, alla base della crescita economica del continente, è responsabile da sola dell'immissione in atmosfera di circa l'80% dei gas serra prodotti in Europa (fig. 2).

Figura 2 – a) Quota di emissioni di gas serra in Europa in Tg CO₂-equivalenti per settore di emissione. B) Quota delle emissioni da consumo di energia tra i vari settori. [Fonte: EEA 2010]



Per una migliore integrazione delle politiche energetiche e climatiche nel dicembre 2008 è stato approvato il 'Pacchetto Clima Energia', in seguito adottato dal Consiglio Europeo nell'aprile 2009; esso prevede l'emanazione di una serie di direttive e regolamenti nel campo delle energie rinnovabili e della mitigazione di cambiamenti climatici a supporto di tre obiettivi da perseguire entro il 2020:

- la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra del 20% rispetto ai valori del 1990;
- arrivare al 20% di energie rinnovabili sul totale dell'energia consumata;
- incremento del 20% dell'efficienza energetica.

I tre obiettivi intendono dare risposta a tre diverse e ugualmente importanti necessità:

- la sostenibilità, per lottare attivamente contro il cambiamento climatico, promuovendo le fonti di energia rinnovabili e l'efficienza energetica;
- la sicurezza dell'approvvigionamento, diversificando le fonti energetiche e coordinando meglio l'offerta e la domanda interne di energia dell'UE nel contesto internazionale;
- la competitività, per migliorare l'efficacia della rete europea tramite la realizzazione del mercato interno dell'energia.

Altri impegni inclusi in questo accordo prevedono la ripartizione di questi obiettivi dalla scala europea a quella nazionale (*burden sharing*), l'estensione del mercato europeo delle quote di emissioni di gas serra (*Emissions Trading Scheme*, ETS) a nuovi settori e la riduzione delle emissioni nei trasporti, sia per chilometro percorso che nell'intero ciclo di vita dei carburanti, fossili e rinnovabili. La particolare attenzione rivolta ai trasporti è dovuta anche al forte aumento dei consumi di combustibile fossile, e di conseguenza di emissioni di gas serra, in questo settore a livello europeo, in contro tendenza rispetto agli altri settori economici che presentano un trend in diminuzione.

A testimonianza della crescente importanza di una politica energetica europea il 4 febbraio 2011 si è tenuto a Bruxelles il primo Consiglio Europeo sull'Energia. In questa occasione sono state evidenziate numerose azioni da portare avanti per il raggiungimento di questi obiettivi:

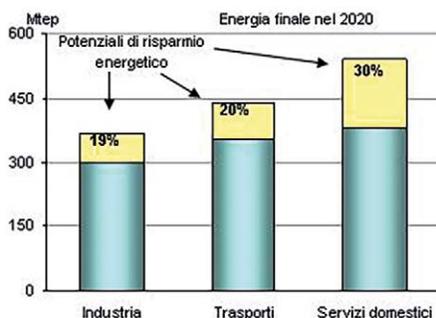
- mercato interno dell'energia (elettricità e gas naturale) funzionante, interconnesso e integrato entro il 2014;
- investimenti strutturali per migliorare la rete di distribuzione ed evitare la dipendenza di singoli paesi da una sola fonte di approvvigionamento (*Energy Island*);
- miglioramento dell'efficienza energetica per ridurre consumi ed emissioni;
- promozione degli investimenti nel settore delle energie rinnovabili e delle tecnologie a basse emissioni di CO₂ sicure e sostenibili.

L'incontro ha messo in luce che l'obiettivo più difficile da raggiungere dei tre espressi nel Pacchetto Clima Energia è quello della riduzione dei consumi energetici. Grazie al risparmio energetico, e quindi alla prevista riduzione dei consumi energetici del 20% rispetto alle proiezioni al 2020, la richiesta di energia primaria a livello europeo dovrebbe restare sostanzialmente immutata rispetto ad oggi, stabilizzandosi attorno a 1800 Mtep. A questo proposito l'aumento dell'efficienza energetica, unica reale soluzione, arriverà solamente al 10% anziché al 20% entro il 2020 se il trend attuale rimanesse costante. È quindi necessario uno sforzo ulteriore per poter utilizzare il potenziale di *energy saving* specialmente nell'edilizia, nei trasporti e nei processi di produzione (fig. 3).

Per il raggiungimento di questi obiettivi, sono state formulate varie proposte, prima fra tutte la revisione della direttiva in materia di rendimento energetico nell'edilizia e di etichetta energetica, di progettazione ecocompatibile; l'incentivazione della cogenerazione e, infine, la possibilità di adottare una 'tassa ambientale'. Nel maggio del 2013 il Consiglio Europeo si è di nuovo riunito, riesaminando a distanza di due anni l'obiettivo di efficienza energetica, sollecitando diversificazione degli approvvigionamenti e investimenti nella rete energetica, riaffermando gli obiettivi di effi-

cienza energetica, completamento del mercato interno dell'energia entro il 2014 e di sviluppo delle interconnessioni entro il 2015. Nel breve termine, il Consiglio si è proposto infine di far fronte all'aumento dei prezzi dell'energia, con l'intenzione di presentare entro fine 2013 un'analisi della composizione dei prezzi e dei costi dell'energia negli Stati membri, da discutere in seno al Consiglio successivo (febbraio 2014) su competitività e politiche industriali.

Figura 3 – Potenziale di risparmio energetico dovuto all'aumento dell'efficienza energetica dei diversi settori.



2. La politica europea sulle rinnovabili

Simona Bosco, Federico Dragoni

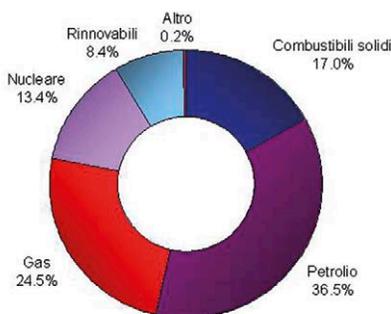
Le principali Direttive che hanno gettato le premesse per l'attuale politica energetica a favore delle rinnovabili sono state:

- Dir. 96/92/CE per la liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica e del gas, che ha fornito norme di concorrenza comuni tra gli Stati membri ed ha portato alla nascita dei Certificati Verdi;
- Dir. 98/30/CE inerente la creazione di un mercato unico dell'energia elettrica, con norme uniche per la generazione, la trasmissione ed il dispacciamento dell'elettricità;
- Dir. 2001/77/CE sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da rinnovabili all'interno del mercato europeo dell'elettricità;
- Dir. 2003/30/CE sulla promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti, che ne incoraggia la diffusione fissando quote minime di mercato espresse sulla base del contenuto energetico, progressivamente crescenti dal 2005 (2%) al 2010 (5,75%).

La prima direttiva emanata come conseguenza dell'adozione del Pacchetto Clima Energia e di approccio integrato tra politiche energetiche e

climatiche riguarda proprio la produzione di energia rinnovabile. Il 23 aprile 2009 è stata promulgata la cosiddetta *Renewable Energy Directive* (RED), ossia la Direttiva 2009/28/CE «sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE». Le Direttive precedenti prevedevano obiettivi (quali il 21% di rinnovabili nell'energia elettrica ed il 5,75% di biocombustibili nei carburanti) non legalmente vincolanti, che solo i paesi più virtuosi sono riusciti a rispettare. La RED prevede invece obiettivi obbligatori per tutti i paesi, da raggiungere attraverso Piani d'Azione Nazionali (PAN), e contempla la produzione sia di energia elettrica che di energia termica e per autotrazione. Secondo dati Eurostat, al 2010 il consumo lordo di energia nell'Europa a 27 era costituito solo per l'8,4% da energie rinnovabili, mentre più dell'80% proveniva da combustibili fossili. La quota di energie rinnovabili, in termini di consumo primario di energia, era costituita per la maggior parte da energia da biomasse (66,1%) e in secondo luogo da energia idroelettrica (21,2%) ed eolica (6,9%) (fig. 4).

Figura 4 – Consumo lordo di energia Europa a 27 per fonte energetica. [Dati Euroserver 2010]



Nella RED l'obiettivo europeo relativo alla quota di energia rinnovabile sull'energia totale consumata, pari al 20% nel 2020, è stato ripartito tra gli Stati membri dell'EU-27 come mostrato in tabella 1. In aggiunta, un rapporto della Commissione Europea del 25 febbraio 2010 ha sollecitato l'adozione di alcuni criteri di sostenibilità ambientale che gli Stati membri devono fare propri, quali: l'interdizione per la produzione di biomasse ad uso energetico delle aree ad elevata biodiversità ed elevato grado di stoccaggio del carbonio, come le foreste; l'adozione di un metodo comune di computazione delle emissioni di gas serra; il controllo dell'origine della biomassa; la differenziazione dei regimi d'incentivazione nazionali in favore di quelle tecnologie che si dimostrino lcalmente più efficienti.

Tabella 1 – Ripartizione dell'obiettivo sulle energie rinnovabili tra gli stati dell'EU-27.

Nazione	% energia rinnovabile nel 2005	Obiettivo % energia rinnovabile al 2020
Belgio	2,2	13
Bulgaria	9,4	16
Repubblica ceca	6,1	13
Danimarca	17	30
Germania	5,8	18
Estonia	18	25
Irlanda	3,1	16
Grecia	6,9	18
Spagna	8,7	20
Francia	10,3	23
Italia	5,2	17
Cipro	2,9	13
Lettonia	32,6	40
Lituania	15	23
Lussemburgo	0,9	11
Ungheria	4,3	13
Malta	0	10
Paesi Bassi	2,4	14
Austria	23,3	34
Polonia	7,2	15
Portogallo	20,5	31
Romania	17,8	24
Slovenia	16	25
Slovacchia	6,7	14
Finlandia	28,5	38
Svezia	39,8	49
Regno unito	1,3	15
EU-27	8,5	20

3. La produzione di energia dall'agricoltura

Simona Bosco, Federico Dragoni

Nella risposta alle sfide poste dal panorama energetico ed ambientale, le biomasse dovrebbero avere un ruolo sempre maggiore: secondo studi dell'EEA mentre nel 2006 l'UE si approvvigionava con biomassa per circa il 4% della domanda di energia primaria, pari a circa 82 Mtep, si calcola che il raggiungimento degli obiettivi europei per il 2020 comporterà una richiesta di bioenergie per circa 236 Mtep, che costituiranno il 13% dell'energia primaria totale. Contraddicendo queste previsioni, secondo i dati del 2010

le biomasse hanno fornito energia pari a circa 109 Mtep, ovvero una quota molto al di sotto delle previsioni del Piano d'Azione per la Biomassa del 2005 che stimavano una produzione al 2010 di 149 Mtep. Le biomasse dovranno quindi fornire una parte sempre maggiore dell'energia utilizzata per l'elettricità, gli usi termici ed i trasporti, ferme restando le condizioni di sostenibilità degli approvvigionamenti previste dalla politica comunitaria in materia.

Uno scenario sufficientemente conservativo, e come tale ritenuto auspicabile, prevede che le biomasse importate dall'UE contribuiscano al massimo per il 15%, portando la richiesta interna di bioenergia a poco meno di 200 Mtep. Rispetto alle diverse possibili fonti di approvvigionamento, mentre la potenzialità di utilizzo delle produzioni forestali e quella delle biomasse da rifiuto sono da ritenersi relativamente stabili nel tempo, la potenzialità produttiva dell'agricoltura è più incerta e maggiormente soggetta a variabilità; per il 2020 il piano prevedeva un potenziale eco-sostenibile per le sole biomasse da fonte agricola di circa 96 Mtep, per poco meno del 50% del totale da biomassa, contro circa il 30% da rifiuti ed il 20% di biomasse forestali.

L'UE è interessata della produzione di energia rinnovabile di provenienza agricola, sia per il contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra che questa può fornire, sia per il sostegno che dato può dare e che già dà all'agricoltura, mettendola in grado di fornire beni e servizi utili e remunerativi che le consentano di poter competere sul piano economico. Non a caso, il già citato Piano d'Azione per la Biomassa riportava, tra i vantaggi attesi già nel 2010, l'occupazione diretta di 250-300.000 nuovi addetti in Europa e poneva particolare accento sull'equilibrio tra gli aspetti energetici, ambientali, economici e sociali cui la politica incentivante può e deve aspirare. Sebbene le valutazioni d'impatto delle energie rinnovabili abbiano in seguito fornito stime meno ottimistiche sulle ricadute occupazionali, va detto che la creazione di un mercato energetico aperto, l'incentivazione diversificata delle energie rinnovabili e, soprattutto, il sostegno affinché le imprese del comparto agricolo accedano a queste misure, sono sicuramente azioni in grado di dare un contributo positivo.

Più recentemente, l'attenzione della comunità scientifica e dell'opinione pubblica si è concentrata sull'uso del suolo da parte delle colture da energia, e in particolare sulla possibilità che colture *food* vengano destinate massicciamente per le produzioni energetiche, o che in generale la richiesta di biocombustibili alteri il rapporto tra domanda e offerta di *commodities* alimentari e dei terreni necessari per la loro produzione a vantaggio del nuovo *competitor*, costituito per l'appunto dalle bioenergie. Inoltre, è sempre più emersa la necessità di considerare il cambiamento d'uso del suolo come fattore in grado di peggiorare il bilancio delle emissioni di gas serra: vale a dire che ci sono superfici in grado di 'liberare' molto più carbonio cambiando destinazione d'uso di quanto non sarebbe il beneficio ambien-

tale tratto dalla ipotetica conversione di queste superfici alle bioenergie. Queste considerazioni valgono anche per i cambiamenti di uso del suolo indiretti, ossia provocati dal mercato dei biocombustibili, senza che questo sia direttamente coinvolto nella sostituzione dei vecchi usi del suolo con i nuovi, e valgono in particolare per quei paesi esportatori verso l'UE che sono meno in grado di tutelarsi autonomamente verso cambiamenti avversi dell'uso del suolo.

Per queste ragioni, l'orientamento della politica europea d'incentivazione delle rinnovabili ha subito recenti modifiche, con la volontà di premiare le bioenergie in grado di gravare di meno sulla risorsa suolo e ponendo limiti allo sviluppo di quelle in aperta concorrenza con il settore alimentare.

4. La politica incentivante europea per le bioenergie

Simona Bosco, Federico Dragoni

La politica comunitaria prevede molteplici strumenti con funzione di stimolo della produzione di biomasse agricole ad uso energetico: alcuni intervengono direttamente sugli agricoltori o in generale sugli imprenditori agevolando gli investimenti nel settore; altri, che definiscono l'odierno quadro di mercato e incoraggiano la diffusione delle fonti rinnovabili garantendo senso economico e remuneratività agli investimenti. L'Unione Europea ha scelto di incentivare le agroenergie all'interno dell'intero settore delle energie rinnovabili, nell'ambito del quale esse devono quindi dimostrare la loro competitività. Il primo strumento incentivante per importanza è quindi la già descritta politica energetica e ambientale europea, con la quale si sono voluti integrare tra di loro gli sforzi nei diversi settori, contribuendo al superamento ormai definitivo delle classiche modalità di sovvenzione all'agricoltura.

Come già detto, la RED definisce i più recenti obiettivi e le misure nazionali per l'uso dell'energia da fonti rinnovabili. Per quel che concerne la produzione di energia da biomasse, è stato fissato il target per il 2020 del 10% di energia rinnovabile rispetto al totale impiegato nei carburanti per autotrazione, di cui la gran parte dovrebbe essere coperta dai biocarburanti, pur prendendo atto delle particolari controversie riguardo agli impatti ambientali conseguenti alla loro produzione (biocarburanti di 1° generazione) sia comunitaria che, soprattutto, in paesi terzi.

Al riguardo, l'Europa si è dotata di criteri di sostenibilità per la valutazione delle diverse filiere e materie prime, sia di produzione interna che importate, e per ogni filiera dovrà essere dimostrata l'effettiva riduzione delle emissioni rispetto al corrispondente combustibile fossile e garantita l'efficienza energetica minima del processo di produzione. Di conseguenza sono incentivate le produzioni di quei biocombustibili solidi che evidenziano un beneficio di riduzione delle emissioni di CO₂ crescente nel tempo e pari ad almeno 35% a partire dal 2009, 50% per il 2017 e 60% per i nuovi

impianti nel 2018 (Direttiva 28/2009/CE); per i biocarburanti liquidi è stata proposta da subito per i nuovi impianti la soglia del 60%. Inoltre, la Direttiva incoraggia le autorità nazionali a sviluppare piani d'azione specifici per le biomasse, tenendole in particolare considerazione nei Piani di Sviluppo Rurale (PSR) e garantendo la proporzionalità degli incentivi nazionali rispetto all'efficienza di conversione e a criteri di compatibilità ambientale degli impianti. Per quanto riguarda i biocarburanti, è stato incluso il fattore ILUC (*Indirect Land-Use Change*) nelle dichiarazioni dei fornitori e degli Stati membri sulla riduzione di emissioni di gas serra determinata dai biocarburanti stessi, con lo scopo di controllare la perdita di carbonio dai suoli causata indirettamente dalle coltivazioni ad uso energetico. Inoltre, è stata limitata al livello di consumo di questi anni, ossia al 5%, la quantità di bioliquidi derivati da colture alimentari che possono rientrare nell'obiettivo del 10% di energia rinnovabile impiegata nei trasporti entro il 2020, ponendo così un tetto a questo tipo di produzioni. Parallelamente, verranno avvantaggiati con maggiori incentivi quei biocarburanti che hanno impatto ridotto o basso sull'uso del suolo, e quindi in particolare biocarburanti avanzati (seconda generazione e oltre) che provengono da alghe, rifiuti e sottoprodotti.

Per quanto riguarda invece la Politica Agricola Comune, il primo incentivo a favore delle agroenergie si può considerare presente già nel Reg. CE 1782/2003, con il quale il disaccoppiamento ha svincolato il sostegno al reddito degli agricoltori dalla produzione agricola. In questo modo, gli agricoltori sono stati lasciati liberi di rispondere al mercato e, in linea di principio, anche alla domanda di agroenergie. Nei primi anni di attuazione del principio del disaccoppiamento sono comunque rimasti alcuni incentivi 'accoppiati', e quindi vincolati a specifiche produzioni, e tra questi è stato istituito il regime speciale di aiuto alle colture energetiche; la riforma del 2003 prevedeva anche che le superfici destinate al ritiro obbligatorio dalla produzione, cioè al set-aside, potessero essere impiegate per tali produzioni.

Con la revisione della PAC del 2008 il disaccoppiamento è stato rafforzato e l'obbligo di set-aside è stato soppresso; inoltre, a partire dal 2010, anche il regime di incentivazione speciale per le agroenergie è stato cancellato (Reg. CE 73/2009). Quello che apparentemente può sembrare un ripensamento dell'Unione Europea viene giustificato dalla volontà di concentrare l'incentivazione sulla domanda di energia rinnovabile, e quindi di biomassa, soprattutto attraverso le direttive di politica energetica e ambientale, con ciò ritenendo che, grazie al notevole impulso avuto dal mercato internazionale dei biocarburanti e alla spinta alla domanda interna impressa con gli obblighi di miscelazione e con il sostegno ai Certificati Verdi per le energie rinnovabili, altri tipi di aiuto che non fossero quelli allo sviluppo rurale (Reg. CE 1698/2005, 74/2009) non risultassero motivati. Sono scomparsi quindi gli incentivi alla produzione, provenienti dal Fondo europeo

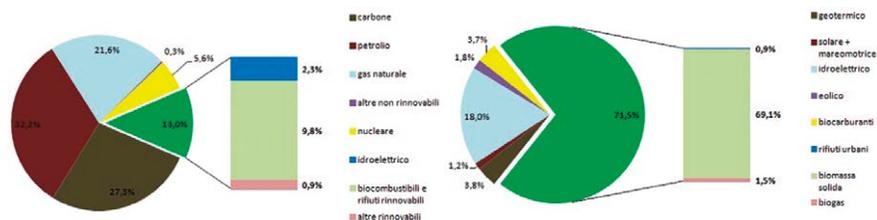
agricolo di garanzia (FEAGA) che finanziava il primo pilastro della PAC, mentre sono stati potenziati i compiti del secondo pilastro, tra cui lo stimolo degli investimenti in agroenergie.

5. Le bioenergie: situazione internazionale

Simona Bosco, Federico Dragoni

Analizzando i più recenti dati disponibili dell'IEA sull'offerta mondiale di energia primaria, riferiti all'anno 2010, si evidenzia che le fonti rinnovabili hanno consentito di produrre nel complesso 1657 Mtep di energia primaria, contro 1.492 Mtep primaria nel 2007, di cui la quota più grande deriva dall'impiego di biomassa solida, liquida e biogas, che in tutto è pari al 9,7%, e raggiunge il 9,8% includendo la frazione rinnovabile dei rifiuti, e costituisce poco più di tre quarti del totale da rinnovabili (fig. 5). La biomassa solida dà il contributo maggiore, costituendo circa il 92% dell'energia totale da biomasse.

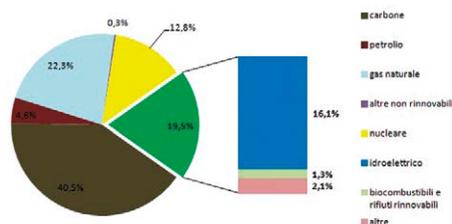
Figura 5 -: a) Offerta di energia primaria totale mondiale nel 2010: quote per fonte (dati IEA – Renewables Information 2009). b) Offerta mondiale di energia primaria da fonti rinnovabili nel 2010: quote per fonte. [Dati IEA – Renewables Information 2012].



Quindi, nel mondo, le biomasse soddisfano quasi il 10% degli usi energetici primari, ma mentre i paesi in via di sviluppo mediamente ne ricavano il 38% dell'energia utilizzata, per spingersi in certi casi fino a circa il 90%, i Paesi sviluppati si fermano di media al 3% (dati 2007). Alcuni esempi emblematici sono: gli Stati Uniti con il 3,2%; l'Europa con il 3,5%, con punte del 18% in Finlandia, 17% in Svezia, 13% in Austria, ma percentuali molto inferiori nel resto dell'Unione (ad esempio il 2,2% in Italia). Tutto questo per evidenziare che c'è un netto divario tra paesi sviluppati, con consumi energetici complessivi elevati, e paesi meno sviluppati, che riescono a soddisfare buona parte dei loro bassi fabbisogni con biomasse sfruttate attraverso tecnologie in gran parte inadeguate. Gran parte della bioenergia da essi consumata viene infatti dalla combustione semplice di legno e residui vegetali e animali. Infatti, solo una ridotta parte dell'energia elettrica mondiale viene prodotta attraverso le cosiddette 'rinnovabili combustibili', tra cui la biomassa solida, che nel 2010 hanno inciso solo per l'1,3%.

Da questo quadro generale si ha una misura quindi di come gran parte delle biomasse da energia ad oggi impiegate, in particolare quelle di provenienza agricola e forestale, sia destinata alle applicazioni termiche tradizionali. L'incidenza delle rinnovabili è quindi maggiore nel comparto elettrico rispetto all'intera produzione energetica primaria (19,4% contro 13,0%), ma il contributo delle biomasse agroforestali in proporzione è assai più scarso, mentre il ruolo principale è detenuto dal comparto idroelettrico. Nella figura 6 si può vedere come cambi la composizione del pacchetto energetico rinnovabile mondiale prendendo in esame la sola produzione di energia elettrica.

Figura 6 – Produzione di energia elettrica mondiale nel 2010: quote per fonte. [Dati IEA – Renewables Information 2012]



A seguire saranno analizzati i diversi comparti di utilizzo delle biomasse da energia maggiormente sviluppati a livello internazionale.

I biocarburanti liquidi

A livello mondiale, l'applicazione delle bioenergie che ha sicuramente incontrato maggiore interesse industriale è quella dei biocarburanti per autotrazione; parte le origini storiche della pionieristica era pre-petrolio, i biocarburanti hanno conosciuto qualche applicazione negli anni Venti e Trenta, soprattutto per ragioni belliche, per poi sostanzialmente scomparire dalla scena mondiale fino alle crisi petrolifere degli anni Settanta. In pochi casi gli 'shock' petroliferi che si sono succeduti hanno trovato paesi con un'industria dei biocarburanti già sviluppata e/o in grado di essere facilmente potenziata: il Brasile è forse l'unico che dagli anni Trenta mantiene e incoraggia l'industria nazionale dell'alcool e che ai tempi delle prime crisi del petrolio intendeva alleviare il fortissimo debito nazionale ed espandere la sua agricoltura attraverso un programma specifico di sviluppo del bioetanolo per autotrazione. Assieme all'enorme vocazione per la coltura della canna da zucchero, è questa la ragione per cui il Brasile si è ritrovato con il 60% del fabbisogno di benzina coperto dalla produzione interna di bioetanolo già a metà degli anni Ottanta.

I biocarburanti liquidi hanno avuto un incremento di produzione medio annuo dell'11% circa dal 1990 al 2010 (dati IEA) e l'etanolo rimane an-

cora il biocarburante quantitativamente più importante; la sua produzione mondiale è triplicata dal 2000 al 2007, ma era già consistente, ammontando la sua produzione a circa 15.000 milioni di litri nel 1990 e a poco di più nel 2000. La produzione di biodiesel era invece inesistente o quasi negli anni Novanta (meno di 1.000 milioni di litri) ed è cresciuta di dieci volte dal 2000 al 2007. Il Brasile e gli Stati Uniti hanno prodotto nel 2006 gran parte del bioetanolo per autotrazione mondiale (89%); la produzione globale da allora è sempre in crescita. La rimanente produzione mondiale è quasi interamente europea, dove Germania, Francia, Svezia, Gran Bretagna, Spagna sono i maggiori produttori; poco inferiore la produzione cinese, destinata però soprattutto ad usi industriali. Nel 2009 in Europa il consumo di biocarburanti è cresciuto del 18,4% in termini di energia primaria rispetto all'anno precedente e la crescita più vigorosa è stata assicurata proprio dal bioetanolo (+29,6%); le stime dei consumi comprendono sia la produzione entro i confini comunitari che le importazioni da paesi terzi.

Quanto al biodiesel, la quasi totalità di questo è invece effettivamente impiegata come carburante ed è con la recente affermazione del mercato dei *biofuel* che la sua produzione si è concretizzata nei grandi quantitativi odierni. Il prodotto europeo è circa i tre quarti di quello mondiale, con Germania, Francia e Italia nel ruolo di principali produttori e produzioni minori in altri Stati UE (principalmente Repubblica Ceca, Spagna, Polonia, Gran Bretagna); nel 2009 in Europa il biodiesel costituiva l'80% dei biocarburanti europei in percentuale sul contenuto energetico, con un incremento dei consumi del 20% sull'anno precedente. Al riguardo si deve osservare però come per i biocarburanti non siano stati raggiunti i previsti obiettivi europei di miscelazione con i carburanti tradizionali né per il 2005, né per il 2010. Per quest'ultimo anno la media UE si è fermata al 4,8%, contro il 5,75% richiesto dalla normativa comunitaria, per un totale di circa 16 Mtep in termini di energia primaria. In Italia l'esplosione dei consumi ha portato nel 2009 il tasso di miscelazione al 3,9%, percentuale più che raddoppiata rispetto all'anno precedente. Le recenti novità nelle direttive europee circa la percentuale consentita di miscelazione di biocarburanti di prima generazione, limitata al 5%, ha ulteriormente modificato questo scenario, favorendo per il futuro la produzione di bioetanolo da processi più avanzati, come quelli di seconda generazione.

Come l'Unione Europea si è data degli obiettivi di miscelazione, così anche altri paesi del mondo hanno intrapreso simili iniziative, in modo da creare attraverso la loro domanda interna lo stimolo per la produzione agricola, industriale, e quindi anche per l'export. La legge *Renewable Fuels Standard* imporrà nei soli Stati Uniti l'utilizzo di 28.400 milioni di litri di biocarburanti per il 2012; in Brasile si punta a ripetere il successo avuto con il programma *Proálcool* dedicato all'etanolo espandendo anche la produzione di biodiesel, cominciando dal mercato interno e prevedendo per esso il 2% di miscelazione entro il 2008 ed il 5% entro il 2013. Si prevede e si è già

verificata una grande crescita della produzione di oleaginose non solo in Brasile, ma anche in Malesia e Indonesia, con quest'ultima in particolare che anche in futuro sarà il primo produttore di olio di palma ed il secondo produttore di biodiesel nel mondo (FAO 2008). Il trend è in crescita per i biocarburanti anche in Colombia, Venezuela, Thailandia, Filippine, dove si punta a rendere obbligatoria la miscela E10 (etanolo al 10% miscelato alla benzina). Si registrano notevoli sforzi produttivi in Africa, compiuti spesso da compagnie straniere e quindi rivolti soprattutto all'esportazione. In Africa e in India si punta grandemente sull'utilizzo della jatropha (*Jatropha curcas* L.), una euforbiacea non alimentare adatta a valorizzare terreni marginali. Al momento è difficile fare proiezioni sulla produzione futura, si assume però che la produzione di biodiesel proveniente dall'Africa provverrà pressoché integralmente da questa coltura.

E in futuro? Se da un lato si prevede che la crescita continuerà, d'altro canto c'è anche chi prevede che i biocarburanti manterranno comunque quote basse del pacchetto energetico dei trasporti mondiali, comprese tra il 3 ed il 6% nel 2030.

Il biogas

È in particolare in Europa che le autorità politiche hanno creduto molto nello sviluppo del settore del biogas, forte della capillarità della rete di distribuzione del gas naturale, di una certa diffusione in alcuni paesi (principalmente Germania e Italia) di automezzi alimentati a metano, e della dipendenza dagli approvvigionamenti di questo gas, di cui la produzione di origine biogenica può costituire un'alternativa. Anche la produzione di biogas ha avuto notevole impulso negli ultimi decenni, se si pensa che a livello mondiale dal 1990 al 2010 è stato registrato un incremento medio di produzione annuale del 14,6% (dati IEA).

La maggior parte dei paesi europei ha messo a punto dei piani specifici per la produzione di energia da biogas all'interno dei propri Piani Nazionali per le rinnovabili, previsti dalla Dir. 2009/28/CE. Le vie principali per la produzione di biogas sono due: il recupero dei gas da discariche e dagli impianti di depurazione delle acque reflue, e la metanizzazione delle biomasse in impianti dedicati.

I dati disponibili più recenti, riferiti al 2011, indicano che a livello europeo la produzione di biogas dalle discariche ammonta a circa il 31% della produzione energetica da biogas, contro circa il 12% proveniente dalla depurazione delle acque reflue ed il rimanente 57% prodotto invece da appositi impianti di digestione anaerobica. Questi includono sia digestori agricoli, alimentati con liquami, residui colturali e colture dedicate, sia impianti industriali e di trattamento anaerobico della frazione organica dei rifiuti (FORSU). Tra il 2010 e il 2011 la produzione di energia elettrica da biogas in Europa è cresciuta notevolmente rispetto all'anno precedente

(+18,2%), ed anche lo sfruttamento del calore prodotto e ceduto a reti di teleriscaldamento è aumentato (+16%). L'energia primaria totale prodotta nell'UE è stata di circa 10 Mtep nel 2011, e circa 36 TWh di energia elettrica sono stati generati dalla combustione del biogas, che resta la via principale di utilizzazione di questa risorsa. Ad ogni modo, anche in questo caso, gli obiettivi fissati nel Libro Bianco della Commissione Europea per le energie rinnovabili sono lontani dall'essere raggiunti: per il 2010 erano previsti 15 Mtep di energia primaria prodotta da biogas e nel 2009 ne risultavano solamente 8,7.

Un altro tipo di utilizzazione del biogas è l'*upgrading* a biometano, ossia la purificazione fino a raggiungere una composizione comparabile a quella del gas naturale commerciale, il che ne consente tecnicamente l'immissione nelle stesse reti. L'immissione in rete di biometano è da poco tempo possibile in alcuni Paesi europei (Svezia, Germania, Svizzera, Paesi Bassi) e sta crescendo velocemente; in Italia l'immissione in rete del biometano dovrebbe riconoscere un primo via libera con l'atteso decreto attuativo della Dir 2009/73/CE. Secondo i dati dell'agenzia tedesca per l'energia DENA, gli impianti che producono biometano in Europa sono 180 al luglio del 2012, di cui 137 connessi alla rete del gas naturale mentre presso i rimanenti il metano viene utilizzato in loco, in gran parte come carburante per autotrazione.

La Germania è certamente il leader europeo nel settore del biogas, dal momento che è responsabile da sola di circa il 50% dell'energia primaria da biogas prodotta in tutta l'Unione. Ai quasi 5000 impianti di digestione anaerobica presenti nel Paese fino al 2009, se ne sono aggiunti poco più di 1000 l'anno, per arrivare a circa 7200 impianti attivi nel 2011. La Germania ha puntato particolarmente sugli impianti dedicati (agricoli in particolare), che producono l'85% dell'energia da biogas, mentre le soluzioni di recupero del gas da depuratori e discariche sono proporzionalmente minoritarie.

Esempi diversi sono quelli del Regno Unito, della Francia e dell'Italia. Il Regno Unito è secondo in Europa per produzione di biogas ed ha puntato moltissimo sul recupero di gas di discarica, in cui fa meglio di ogni altro paese, ma non ha minimamente incentivato la digestione anaerobica in impianti dedicati. La Francia ha incentivato poco la produzione di biogas e viene definita come un Paese con un potenziale di sfruttamento ancora elevatissimo, mentre l'Italia ha sicuramente fatto di più per quanto riguarda gli impianti dedicati ma la prevalente parte del biogas prodotto rimane quello di recupero dalle discariche, mentre l'immissione in rete di biometano è tutt'oggi inesistente. Nel complesso, l'Italia risulta il terzo paese produttore europeo con 475 impianti attivi al 2011, di cui 225 impianti agricoli con una potenza installata complessiva di circa 130 MWe. A partire dall'ultimo anno lo schema incentivante è stato rivisitato e le tariffe ridotte, privilegiando gli impianti di piccola dimensione e quelli basati su sottoprodotti e scarti a discapito delle biomasse da colture dedicate (*vedi* par. 6).

Sono molto interessanti anche i casi dell'Austria, dei Paesi Bassi e della Repubblica Ceca, che hanno produzioni complessive più contenute ma con un'incidenza degli impianti dedicati a livelli 'tedeschi'. Al 2010, gli olandesi erano quelli che avevano puntato di più sulla cogenerazione, mostrando percentuali ben più alte rispetto agli altri paesi europei di elettricità da biogas prodotta in impianti CHP (*Combined Heat and Power*) effettuando il recupero del calore.

Il biogas è anche una produzione di estremo interesse per i paesi in via di sviluppo, dove esiste un grande potenziale per lo smaltimento sostenibile di rifiuti e la depurazione dei reflui, anche a livello domestico o di piccole comunità, producendo elettricità e calore utili nei contesti più disagiati e migliorando le condizioni di vita dal punto di vista igienico-sanitario. Le tecnologie di digestione anaerobica delle biomasse stanno guadagnando interesse anche negli Stati Uniti, dove al momento la valorizzazione del biogas da discariche e impianti di depurazione delle acque è prevalente, ma anche le tecnologie di produzione dedicate si stanno gradualmente affermando, facendo segnare l'arrivo di produttori specializzati, in particolare dalla Germania.

I biocombustibili solidi

La biomassa solida, di provenienza agricola e forestale, costituisce di gran lunga la forma di agroenergia con il maggiore potenziale. A livello europeo, nel 2011 lo sfruttamento delle biomasse solide ha raggiunto i 78,8 Mtep di energia primaria prodotta, che diventano più di 80 considerando anche la biomassa importata ed esportata. Il massimo però è stato raggiunto nell'anno precedente, rispetto al quale si è verificato un calo del 3% dovuto ad un inverno relativamente mite in Europa. Si comprende quindi come buona parte dell'energia da biomasse solide sia impiegata stagionalmente per usi termici. La generazione di elettricità da biocombustibili solidi è invece in costante crescita. La produzione di energia elettrica da biomasse lignocellulosiche è infatti cresciuta dal 2001 al 2011 con una media del 13,3% annuo, passando da 20,8 a 72,8 TWh prodotti. Da notare però come rispetto al totale dell'energia primaria ottenuta, la generazione elettrica sia ancora ben poca cosa, ammontando a circa 6,25 Mtep sui 78,8 Mtep totali di cui sopra, di cui circa il 60% in cogenerazione. Nel 2010, le centrali a biomassa attive in Europa erano circa 800 centrali, per una potenza installata complessiva di 7,2 GW.

I principali paesi produttori nel continente sono Germania, Svezia, Finlandia, Francia, Polonia. La Francia nel 2010 è il primo paese europeo in termini di energia primaria e deve questo suo risultato principalmente alle notevoli dimensioni geografiche e all'efficacia del suo programma *Biomasse Chaleur Industrie Agriculture et Tertiaire* (BCIAT), con il quale si è voluto incentivare e diffondere soprattutto l'utilizzazione termica delle biomasse;

quanto alla generazione elettrica però, questa è molto poco sviluppata. Nel 2011 il primo paese UE sia per energia primaria che per energia elettrica da biomasse solide è stato la Germania, che sta accrescendo l'utilizzazione delle biomasse ad un ritmo sostenuto. I paesi scandinavi invece negli ultimi anni sono stati caratterizzati da un'offerta di energia da biomasse solide piuttosto stabile: in crescita in Svezia, grazie alla realizzazione di apposite centrali, ma in calo in Finlandia, per via della diminuzione di attività dell'industria cartaria determinata dalla crisi economico-finanziaria in atto. Paesi scandinavi e Polonia hanno puntato più di altri sulla cogenerazione, ottenendo da impianti CHP la quasi totalità dell'elettricità generata da biomasse.

Per quanto riguarda il mercato delle biomasse solide, questo è molto più disomogeneo rispetto a quello dei biocarburanti liquidi e a livello internazionale è soprattutto il mercato della biomassa densificata sotto forma di pellet ad avere la maggiore importanza negli scambi, sia per l'utilizzazione domestica che per gli usi industriali e per la co-combustione nelle centrali a carbone (Junginger *et al.* 2008). Appare interessante che il pellet costituisca la biomassa maggiormente utilizzata in co-combustione, con una netta preferenza per il pellet bianco, di grande qualità perché molto povero in cenere; si stima che circa il 60% della domanda internazionale di pellet sia generata dall'impiego di questo in co-combustione nelle centrali a carbone del Nord Europa, il 25% è usato per il teleriscaldamento e solo il 15% per il riscaldamento domestico.

Alcune importanti caratteristiche delle biomasse solide da mettere in rilievo come *commodities* commerciate internazionalmente:

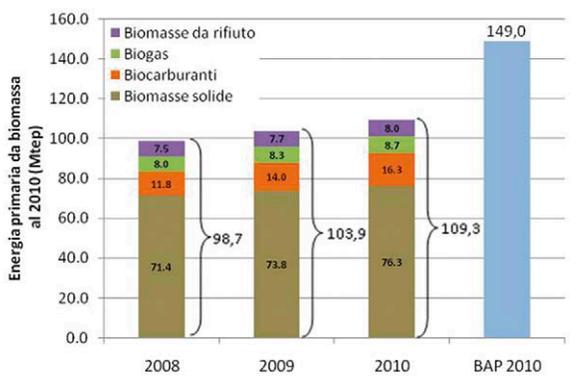
- il mercato delle biomasse è sia diretto, che indiretto; vale a dire che molte biomasse sono scambiate come merci la cui finalità d'uso è diversa da quella energetica, per poi di fatto venir convertite in tutto o in parte in energia, ponendo significativi problemi di stima dei flussi;
- l'estrema eterogeneità delle materie prime di provenienza rende caratteristiche e costi di produzione piuttosto variabili; le biomasse solide sono per loro natura più difficilmente standardizzabili, ma oggi esistono comunque delle norme tecniche a livello europeo;
- la densità energetica delle biomasse solide è inferiore rispetto a quella dei biocarburanti, l'incidenza dei costi di trasporto è quindi piuttosto elevata.

I paesi tradizionalmente più importanti sul mercato sono la Germania, il Canada, la Svezia, gli Stati Uniti, l'Austria e l'Italia, tutti paesi tradizionalmente ben controllati dal punto di vista delle certificazioni ambientali, ma anche altri stanno aumentando considerevolmente le loro produzioni (Russia e paesi ex URSS, Brasile, Sud Africa). Il pellet di legno per via ceneri delle sue vantaggiose caratteristiche qualitative è e sarà prevedibil-

mente a lungo il principale biocombustibile solido, tuttavia la domanda internazionale è tale da far ritenere che le materie prime di scarto e quelle di origine forestale non saranno sufficienti da sole, e che bensì in potrebbero affermarsi in tempi relativamente brevi sistemi per la produzione di pellet da biomasse di origine agricola (agropellet), finora rimasti in secondo piano. Si stima comunque che la produzione sostenibile di biocombustibili solidi di origine forestale possa aumentare ancora di circa il 50% in Europa.

In figura 7 è riportato il trend di sviluppo della produzione di energia da biomasse in Europa per i diversi comparti esistenti e il confronto con lo scenario per il 2010 ipotizzato dal *Biomass Action Plan* nel 2005.

Figura 7 – Confronto tra l'attuale tendenza di utilizzo delle biomasse e lo scenario del *Biomass Action Plan* (in Mtep).



6. La produzione di energia dall'agricoltura in Italia: lo schema incentivante per l'energia elettrica

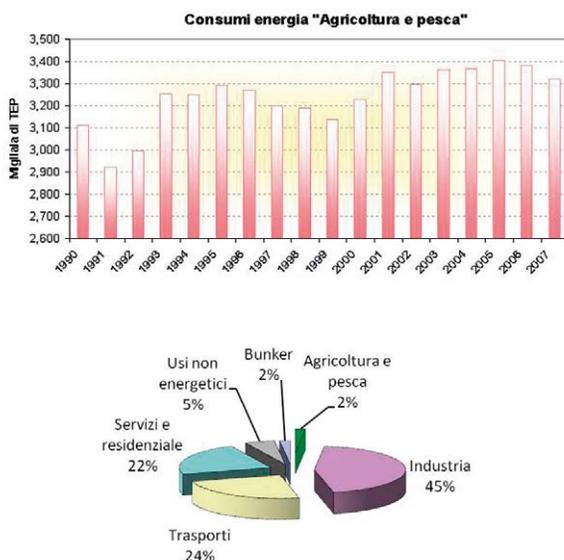
Simona Bosco, Federico Dragoni

Il sistema agricolo italiano consuma un'aliquota molto ridotta di energia, termica ed elettrica, rispetto al valore complessivo nazionale, con valori percentuali sostanzialmente stabili negli ultimi anni, non superiori al 2-3 % sul totale (fig. 8).

A fronte di consumi energetici così contenuti, l'agricoltura italiana offre comunque numerose possibilità di diversificazione delle fonti energetiche e non dobbiamo dimenticare che la produzione di agroenergia contribuisce anche alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. Infatti, se è vero che l'agricoltura è anche fonte diretta di emissioni di gas climalteranti, in particolare metano e protossido di azoto, anche se con una responsabilità inferiore rispetto ad altri settori (nel 2009 ammontava solo al 6,9% sul totale nazionale, dati ISPRA), è anche vero che l'agricoltura può contribuire agli assorbimenti di anidride carbonica

dall'atmosfera attraverso l'incremento dello stock di carbonio nella biomassa annualmente prodotta e nei suoli agrari, con ciò giocando quindi un ruolo importante nelle strategie di mitigazione. L'impresa agroenergetica si sta così affermando, beneficiando innanzitutto dell'evoluzione della nozione di impresa agricola, determinante sviluppo avutosi con il D. Lgs 228/2001, che modificando l'art. 2135 del Codice Civile ha affermato il ruolo multifunzionale dell'agricoltura e ridefinito la figura degli imprenditori del settore.

Figura 8 a) Andamento dei consumi energetici in agricoltura 1990-2007 (Migliaia Tep). b) Consumi di energia sul totale nazionale.



La normativa nazionale ha sostanzialmente accolto nel tempo l'evoluzione della politica climatica ed energetica europea, promuovendo la produzione di energie dalle varie fonti rinnovabili, comprese quelle di provenienza agricola. In particolare, il Piano d'Azione Nazionale per le rinnovabili ha definito gli obiettivi italiani da raggiungere, in modo da concorrere alla realizzazione dell'obiettivo del 17% di energia primaria totale da rinnovabili assegnato al nostro Paese in sede europea. In seguito, un decreto dell'8 marzo del 2013 dei Ministeri di Sviluppo Economico e Ambiente ha definito la Strategia Energetica Nazionale (SEN), puntando a superare gli obiettivi del PAN. Per le rinnovabili si prevede di raggiungere 25 Mtep, pari al 20% dei consumi energetici finali nel 2020, di cui il 36-38% nel comparto elettrico (contro 26% del PAN), il 20% nel comparto termico (17% nel PAN) ed il 10% nei trasporti (invariato).

Più nello specifico, è principalmente con il susseguirsi delle Leggi Finanziarie, dal 2006 ad oggi, che la normativa nazionale ha dato le principali disposizioni in materia di agroenergie. La Finanziaria del 2006 ha disposto sostanzialmente che la produzione di energia elettrica, termica, di carburanti e di prodotti chimici, sia da considerarsi attività connessa purché la trasformazione sia effettuata da imprenditori agricoli e interessi prodotti agricoli o loro derivati provenienti prevalentemente dal fondo. La chiarezza normativa è da ritenersi un 'incentivo' fondamentale, e in tal senso questa legge ha fornito un importante contributo, per quanto alcune incertezze siano a lungo rimaste riguardo alla possibilità di utilizzare alcuni sottoprodotti. Le definizioni di quel che può essere considerato rifiuto piuttosto che residuo sono state chiarite in seguito, con le modifiche al D. Lgs 152/2006 (Testo Unico Ambientale), con cui il legislatore si è dimostrato più favorevole all'utilizzo energetico. È vero anche che le Regioni hanno acquisito ampia autonomia legislativa in materia di ambiente e energia, e quindi anche relativamente alla valorizzazione energetica dei residui.

Successivamente, la legge n. 159 del 2007 ha introdotto lo specifico regime di agevolazione alla produzione di energia elettrica derivante da impianti alimentati con biomasse di origine agricola. Questa legge, la precedente Finanziaria 2007 e quella successiva del 2008 hanno definito un sistema incentivante rimasto fino ad oggi invariato in una sua importante caratteristica, vale a dire la distinzione tra gli impianti di potenza uguale o superiore ad 1 MW e quelli di potenza inferiore. In origine, gli impianti di potenza non superiore ad 1 MW potevano beneficiare di due modalità di incentivazione alternative tra di loro, ossia il riconoscimento dei Certificati Verdi o quello di una tariffa onnicomprensiva di entità variabile a seconda della fonte rinnovabile impiegata; nel corso del 2012 sono state apportate alcune importanti modifiche a questo sistema. Molto importante anche l'incentivo offerto dallo scambio sul posto, reso possibile agli impianti alimentati da ogni tipo di fonte rinnovabile con potenza fino a 200 kW. Lo scambio sul posto è un servizio erogato dal GSE su istanza degli interessati, che consente la compensazione tra il valore dell'energia elettrica prodotta e immessa in rete e quello dell'energia elettrica prelevata e consumata in un periodo differente da quello in cui avviene la produzione. Il vecchio limite di potenza installata per il quale lo scambio sul posto era consentito (20 kW) limitava di fatto il servizio ad impianti fotovoltaici domestici.

È Il DM del 18 dicembre 2008 dal titolo *Incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili* che inizialmente ha reso operativi i meccanismi di incentivazione descritti. All'interno di questo quadro normativo, gli impianti alimentati da biomasse definite 'da filiera' potevano beneficiare di una tariffa onnicomprensiva di 30 €cent/kWh per gli impianti di potenza minore di 1 MW, o in alternativa di un coefficiente moltiplicativo dei certificati verdi pari a 1,8. Si definivano 'da filiera' le biomasse ed il biogas derivanti da prodotti agricoli, di allevamento e forestali, inclusi

i sottoprodotti, ottenuti nell'ambito di intese di filiera o contratti quadro oppure di filiere corte, entro un raggio di approvvigionamento di 70 km.

Successivamente, la proposta di assegnazione di incentivi più elevati alle biomasse provenienti entro 70 km dall'impianto è apparsa in contrasto con alcuni principi promossi dalla Commissione Europea, come quelli riguardanti la libera concorrenza e circolazione delle merci. Peraltro, il limite di una distanza di approvvigionamento non risultava essere una condizione necessaria e sufficiente a garantire sostenibilità ambientale in fase di reperimento della biomassa. Per tali motivi, tali criteri di incentivazione sono stati in parte modificati con l'art. 42 della legge 23 luglio 2009, n. 99. In particolare, per quanto riguarda l'incentivazione della produzione elettrica da biomassa, è stato quasi completamente cancellato il concetto di biomassa 'da filiera' nella determinazione della tariffa onnicomprensiva per impianti di potenza inferiore ad 1 MW, rimasto valido in pochi ambiti della normativa per le rinnovabili.

Quanto ai Certificati Verdi, di durata quindicennale, si riferiscono singolarmente ad 1 MWh di energia e sono pagati dal GSE corrispondendo il prodotto del valore unitario dei certificati formato sul mercato di scambio, per la produzione netta di energia incentivabile, per il coefficiente moltiplicativo variabile a seconda della fonte interessata. I Certificati Verdi sono non cumulabili con altri incentivi pubblici di natura nazionale, regionale, locale o comunitaria; con eccezione degli impianti alimentati da biomasse di filiera, per i quali è ammessa la cumulabilità con altri incentivi fino ad un massimo del 40% del costo dell'investimento. Con il DM del 6 luglio 2012, in attuazione del D. Lgs 28/2011 di recepimento della Dir. 28/2009/CE, per il regime dei Certificati Verdi è stato fissato un termine nel 2016; si tratta quindi di un regime in via di superamento.

La tariffa onnicomprensiva è l'alternativa possibile per gli impianti a fonte rinnovabile di potenza elettrica media nominale $\leq 1\text{MW}$ ($\leq 200\text{ kW}$ per gli impianti eolici). L'incentivo, riconosciuto dallo Stato al gestore dell'impianto che fa richiesta di tariffa onnicomprensiva, viene determinato moltiplicando il valore specifico della tariffa, espresso in €/cent/kWh, per l'energia immessa nel sistema elettrico. La tariffa è costante per tutto il periodo di incentivazione ed è chiamata 'onnicomprensiva' perché il suo valore è determinato dall'insieme di due voci:

- l'incentivo propriamente detto (inteso come la somma corrisposta per ogni kWh elettrico rinnovabile immesso in rete);
- il prezzo di mercato per la vendita dell'energia elettrica.

La tariffa viene erogata per un periodo di 15 anni, il suo valore specifico è variabile a seconda della fonte rinnovabile utilizzata. Il biogas e le biomasse, compresi gli oli vegetali puri tracciabili, beneficiavano di un valore di tariffa onnicomprensiva pari a 28 €/cent/kWh per impianti di potenza

inferiore ad 1 MW. Per gli oli vegetali puri inoltre è previsto un sistema di tracciabilità attraverso il sistema di gestione e di controllo ai sensi del Reg. CE n. 73/2009. Inoltre:

- i gas di discarica, i gas residuati dai processi di depurazione e i biocombustibili liquidi (ad esclusione degli oli vegetali puri tracciabili di cui al punto precedente) ricevevano un valore di tariffa onnicomprensiva inferiore, pari a 18 €cent/kWh;
- era innalzato da 1,1 a 1,3 il coefficiente moltiplicativo dei certificati verdi per i rifiuti biodegradabili e per le biomasse diverse da quelle prodotte da attività agricola, zootecnica e forestale da filiera.

Il DM del 6 luglio 2012 sulle rinnovabili, che ha accompagnato quello del 5 luglio 2012 sul Quinto Conto Energia che è limitato al fotovoltaico, oltre a determinare la cessazione del regime dei Certificati Verdi, ha stabilito la durata media dell'impianto come ulteriore criterio determinante durata e valore dell'incentivo corrisposto; per gli impianti a biomasse la durata riconosciuta è di 20 anni per tutte le diverse filiere e tecnologie. Il decreto prevede inoltre che la produzione di energia rinnovabile sia incentivata in base a specifiche caratteristiche degli impianti e delle biomasse impiegate, con la logica di riconoscere maggiore valore ai sottoprodotti e di premiare la complementarietà delle produzioni agroenergetiche, piuttosto che le coltivazioni a unica o principale destinazione energetica. I valori della tariffa onnicomprensiva riguardanti la produzione da biomassa entrati in vigore con il DM del 31 luglio 2009 sono stati quindi sostituiti da quelli del DM del 6 luglio 2012. Lo schema incentivante come originariamente definito, senza le modificazioni determinate dal DM del 6 luglio 2012, è descritto in tabella 2.

Tabella 2 – Disponibilità dei diversi incentivi nel precedente schema d'incentivazione italiano per l'elettricità prodotta da biomasse ed altre fonti rinnovabili. SP: Scambio sul posto; TO: Tariffa onnicomprensiva; CE: Conto Energia; CV: Certificati Verdi.

	SP	TO	CE	CV
Biomasse < 200 kW				
Biomasse 0,2-1 MW				
Biomasse >1 MW				
Solare fotovoltaico < 200 kW				
Solare fotovoltaico > 200 kW				
Altre rinnovabili (eolico, idroelettrico, geotermico) < 200 kW				
Altre rinnovabili (eolico, idroelettrico, geotermico) 0,2-1 MW				
Altre rinnovabili (eolico, idroelettrico, geotermico) >1 MW				

In base al nuovo regime, l'accesso ai meccanismi di incentivazione dell'energia elettrica rinnovabile prodotta nei diversi impianti può avvenire attraverso:

- tariffa onnicomprensiva, con cessione dell'energia elettrica al GSE che provvede a remunerarla con calcolata come somma di tariffa incentivante base più l'ammontare di premi previsti dalla normativa;
- incentivo, erogato dal GSE e calcolato come differenza tra il ricavo complessivo, dato dalla somma di tariffa incentivante base e premi, ed il prezzo zonale orario dell'energia;
- aste al ribasso.

La tariffa onnicomprensiva è destinata unicamente agli impianti con potenza elettrica installata minore o uguale di 1 MW; le aste al ribasso sono l'unica possibilità invece per gli impianti di potenza superiore ai 5 MW. Hanno invece possibilità di fruire dell'incentivo calcolato come differenza tra ricavo complessivo e prezzo zonale orario dell'energia solo l'impianti al di sotto dei 5 MW, compresi gli impianti di potenza minore o uguale di 1MW nel caso intendano privilegiare l'autoconsumo elettrico, anche se è la tariffa onnicomprensiva la modalità privilegiata per gli impianti di piccola taglia (tab. 3).

Tabella 3 – Disponibilità dei diversi incentivi per la produzione di elettricità da biomasse nello schema d'incentivazione italiano previsto dal DM del 6 luglio 2012. TO: Tariffa onnicomprensiva; I: Incentivo; A: Aste al ribasso.

	TO	I	A
Biomasse ≤ 1 MW			a
Biomasse 1-5 MW			
Biomasse >5 MW			

La normativa 2012 sulle rinnovabili prevede inoltre un meccanismo incentivante aggiuntivo basato sui citati premi, una gamma articolata di pagamenti aggiuntivi per le diverse tipologie di fonti e tecnologie. Ad esempio, per le bioenergie sono previsti 30 €/MWh per la riduzione delle emissioni in atmosfera, 20€/MWh per le biomasse da filiera, 40 €/MWh per la cogenerazione. In generale, le diverse misure dello schema incentivante privilegiano chiaramente impianti di piccola taglia ed alimentati da sottoprodotti, in risposta agli orientamenti più recenti del legislatore europeo e nazionale. Il Decreto infatti discrimina le diverse biomasse nel suo art. 8, comma 4, individuando le seguenti quattro tipologie:

- prodotti di origine biologica (tipo A);
- sottoprodotti di origine biologica (tipo B);

42 Le biomasse lignocellulosiche

- rifiuti, di diversa tipologia, sulla base della quantificazione della frazione organica e del trattamento di separazione subito (tipi C e D).

Per quanto riguarda gli impianti agricoli, escludendo quindi i tipi C e D, nell'alimentazione con biomasse di tipo A ricadono i prodotti agricoli destinati o destinabili al consumo umano, le specie dedicate da energia erbacee o arboree, i prodotti derivanti dalla gestione del bosco e dalla silvicoltura non classificati come rifiuti o sottoprodotti e tutto ciò che non è compreso nella tabella 1-A dell'Allegato 1 del Decreto, che invece è definito sottoprodotto e rientra nel tipo B. Tariffe di base e premi sono differenziati generalmente in modo da dare un vantaggio alla tipologia B rispetto alla A. In tabella 4 sono elencate le specie dedicate da energia individuate come tali dal Decreto.

Inoltre, la piccola taglia è favorita dall'accesso diretto agli incentivi (impianti a biogas di potenza $\leq 100\text{kW}$ e altri impianti a biomasse con potenza $\leq 200\text{kW}$), mentre le potenze più elevate (comprese tra queste soglie ed i 5 MW) accedono agli incentivi mediante iscrizione al registro. La normativa è valida a partire dal gennaio 2013 e distingue i nuovi impianti realizzati da questa data, dagli impianti pre-esistenti in rifacimento e in potenziamento, in modo da garantire una transizione il più possibile graduale dal vecchio al nuovo schema.

Tabella 4 – Elenco delle biomasse da colture dedicate di cui all'articolo 8, comma 6, lettera b) del DM del 6 luglio 2012, Allegato 1, Tabella 1-B.

Specie erbacee annuali		Specie erbacee poliennali	
Canapa da fibra	<i>Cannabis spp.</i>	Cactus	<i>Cactaceae spp.</i>
Canapa del Bengala	<i>Crotalaria juncea L.</i>	Canna comune	<i>Arundo donax L.</i>
Chenopodio	<i>Chenopodium spp.</i>	Canna d'Egitto	<i>Saccharum spontaneum L.</i>
Erba medica	<i>Medicago sativa L.</i>	Cannuccia di palude	<i>Phragmites australis L.</i>
Facelia	<i>Phacelia spp.</i>	Cardo	<i>Cynara cardunculus L.</i>
Kenaf	<i>Hibiscus cannabinus L.</i>	Cardo mariano	<i>Silybum marianum L.</i>
Loiessa	<i>Lolium spp.</i>	Disa o saracchio	<i>Ampelodesmus mauritanicus L.</i>
Rapa invernale	<i>Brassica rapa L.</i>	Fico d'India	<i>Opuntia ficus-indica L.</i>
Ricino	<i>Ricinus communis L.</i>	Ginestra	<i>Spartium junceum L.</i>
Senape abissina	<i>Brassica carinata L.</i>	Igniscum	<i>Fallopia sachalinensis L.</i>
Sorgo	<i>Sorghum spp.</i>	Miscanto	<i>Miscanthus spp.</i>
Tabacco	<i>Nicotiana tabacum L.</i>	Panico	<i>Panicum virgatum L.</i>
Trifoglio	<i>Trifolium spp.</i>	Penniseto	<i>Pennisetum spp.</i>

Specie arboree		Saggina spagnola	<i>Phalaris arundinacea</i> L.
Acacia	<i>Acacia spp.</i>	Sulla	<i>Hedysarum coronarium</i> L.
Eucalipto	<i>Eucalyptus spp.</i>	Topinambur	<i>Helianthus tuberosus</i> L.
Olmo siberiano	<i>Ulmus pumila</i> L.	Vetiver	<i>Chrysopogon zizanioides</i> L.
Ontano	<i>Alnus spp.</i>		
Paulonia	<i>Paulownia spp.</i>		
Pioppo	<i>Populus spp.</i>		
Platano	<i>Platanus spp.</i>		
Robinia	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.		
Salice	<i>Salix spp.</i>		

7. La produzione di energia dall'agricoltura in Italia: lo schema incentivante per l'energia termica

Simona Bosco, Federico Dragoni

Una delle critiche più spesso rivolte al vecchio schema incentivante per le energie rinnovabili, e in particolare per quelle che prevedono una conversione termica dell'energia, è quella di avere premiato molto la generazione di elettricità e poco il recupero del calore prodotto con essa, o comunque di non aver facilitato lo sviluppo di rinnovabili termiche, lasciando in questo ambito campo libero alle risorse energetiche tradizionali.

Lo schema incentivante successivo alle modifiche del 2012 ha cercato di correggere parte delle storture preesistenti, ad esempio premiando il recupero del calore in cogenerazione. Un primo stimolo è però arrivato dai Certificati Bianchi, ossia i Titoli di Efficienza Energetica (TEE) che certificano i risparmi energetici ottenuti attraverso determinati interventi, nati con il DM del 20 luglio 2004. Il funzionamento dei TEE si basa sull'obbligo di legge di conseguire un certo obiettivo di risparmio energetico annuo da parte delle aziende distributrici di energia (con più di 50.000 clienti finali), che possono quindi assolvere a tale obbligo realizzando energetici di efficientamento in grado di fare loro diritto a questi titoli, emessi dal Gestore dei Mercati Energetici (GME) e scambiati sul mercato dello stesso GME o in accordi bilaterali tra compagnie. Tuttavia, il mercato dei Certificati Bianchi rimane non accessibile alla grande maggioranza dei cittadini e delle realtà produttive e riguarda poco lo sviluppo delle rinnovabili agricole, sebbene un DM del 28 dicembre del 2012 introduca nuovi soggetti ammessi alla presentazione di progetti per il rilascio di TEE.

L'incentivo che ha avuto da subito un maggiore impatto su una più vasta platea di soggetti è invece la detrazione fiscale del 55%, ossia uno scon-

to da applicare alle imposte (IRPEF, IRES) dovute dal contribuente pari al 55% delle spese sostenute in interventi destinati ad aumentare l'efficienza energetica degli edifici. Dell'incentivo potevano fruire i proprietari di immobili che convertissero vecchi impianti a nuove tecnologie più efficienti, tra cui le caldaie a biomassa; gli interventi dovevano necessariamente costituire sostituzioni, non risultando ammessi all'incentivo le nuove installazioni e le integrazioni.

A questi due strumenti si aggiungono pochi ulteriori interventi, quali crediti d'imposta per la diffusione di calore attraverso reti di teleriscaldamento alimentate da biomassa (Leggi Finanziarie 2001 e 2009), trasferiti sul prezzo di cessione del calore all'utente finale. Tale situazione si è protratta fino all'entrata in vigore del succitato DM del 28 dicembre 2012, quindi fino a inizio 2013. Tale decreto, oltre a stabilire nuovi obiettivi nazionali di risparmio energetico e a rivedere la disciplina dei TEE, ripropone la detrazione fiscale del 55% estendendola anche a soggetti che, poiché non soggetti a IRPEF o IRES, ne erano esclusi: è il caso ad esempio delle pubbliche amministrazioni. Limitatamente agli edifici pubblici, questi incentivi sono cumulabili con incentivi in conto capitale. I nuovi incentivi sono destinati sia ad interventi di efficienza energetica in senso stretto, che a investimenti nella produzione di energia termica rinnovabile; ancora compresi quindi gli impianti di generazione del calore alimentati a biomassa.

8. I fondi strutturali ed il ruolo del PSR 2007-2013

Simona Bosco, Federico Dragoni

Le autorità nazionali e quelle regionali seguono ed accompagnano la politica incentivante europea in materia di bioenergie, contestualizzandola e dandone applicazione nei diversi aspetti: mentre le misure di mercato dell'energia sono gestite a livello nazionale, i finanziamenti provenienti da fondi strutturali europei veicolati a livello regionale. La ripartizione delle competenze tra Stato e Regioni prevede, infatti, che la politica energetica è di competenza statale per quanto riguarda i principi generali del mercato, mentre la programmazione più specifica (a livello quindi di potenze installate, reti ecc.) è competenza regionale, così come regionale è la competenza in agricoltura. Molte delle Regioni italiane hanno colto l'opportunità offerte dalla PAC 2007-2013 inserendo nei loro Programmi di Sviluppo Rurale (PSR) alcuni provvedimenti in grado di stimolare gli investimenti nelle agroenergie. Le misure di che trattasi sono numerose in quasi tutte le regioni e le strategie di sviluppo sono state articolate secondo le biomasse disponibili e le filiere più promettenti in ogni territorio. Le tre principali filiere incentivate sono:

- filiera legno-energia;
- filiera olio vegetale;
- filiera produzione del biogas da biomasse di varia origine.

In generale è stata incoraggiata la costruzione di impianti per la produzione di energia termica e/o elettrica fino ad 1 MW di potenza a partire da biomasse legnose, arboree e arbustive, con specifici limiti di durata dell'impianto specificati in alcune regioni. Sono invece state considerate solo in alcune regioni le opportunità legate alle biomasse di specie annuali erbacee (mais, frumento, colza e girasole) in questo caso finalizzate alla produzione industriale di biocarburanti di 1° generazione (biodiesel e bioetanolo) per il trasporto. Oltre alla coltivazione di specie legnose da energia è stato dato notevole impulso anche alla produzione di biogas per la produzione di energia elettrica e/o termica (compresa cogenerazione). Nella tabella 5 sono sinteticamente evidenziate le bioenergie maggiormente incentivate nelle diverse regioni.

Tabella 5 – Biomasse e filiere agro energetiche principalmente incentivate nei Piani di Sviluppo Rurale regionali.

Regione	Tipologia di biomassa/filiera incentivata	Uso	Note
Val D'Aosta	Biomassa forestale	Impianti < 1 MW termici/elettrici	Cippato ad oggi
Piemonte	Biomassa arborea da combustione	Impianti < 1 MW termici ed elettrici	Attiva la filiera legno-energia; in attivazione la filiera del biogas
Lombardia	<ul style="list-style-type: none"> Biomassa arborea (fasce tampone e ritiro di seminativi +impianti arboricoltura) SRF solo certificata No a coltivazione siti natura 2000 	Impianti < 1 MW termici, cogenerazione, gassificazione, prod, Pellet	Per imboschimento obbligo di mantenimento per più di 15 anni
Trentino	Biomassa arborea	Impianti < 1 MW	Filiera biogas (già 1 impianto)
Alto Adige	Biomassa arborea, specialmente residui (72% prodotto nella provincia) e filiera biogas	Impianti < 1 MW	Per il biogas i beneficiari saranno solo enti pubblici
Veneto	<ul style="list-style-type: none"> Biomassa forestale e agricola 	Previsti 43 impianti da 1 MW	
Friuli Venezia Giulia	<ul style="list-style-type: none"> Biomassa forestale e agricola Imboschimento terreni agricoli (sup. min. 5000 mq), no impianti su prati e pascoli Impianti a ciclo lungo (ciclo di permanenza minimo di 15 anni) Impianti di specie a rapido accrescimento coltivati con ciclo di permanenza minimo di 8 anni Non è incentivata la <i>Short Rotation Forestry</i> (SRF) 	Impianti < 1 MW	Biomassa a meno di 100 km

46 Le biomasse lignocellulosiche

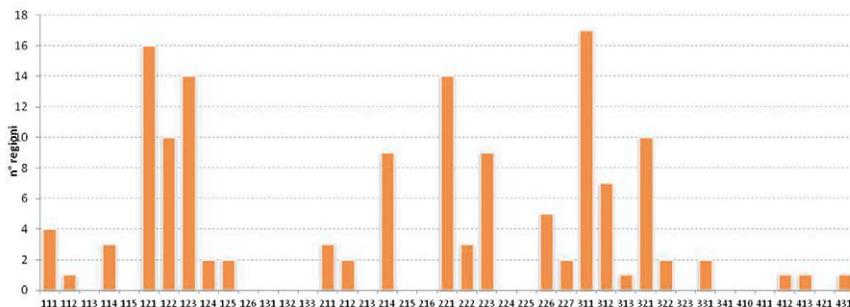
Regione	Tipologia di biomassa/filiera incentivata	Uso	Note
Emilia Romagna	<ul style="list-style-type: none"> • Mais e frumento per bioetanolo • Oleaginose (colza e girasole) per biodiesel • SRF, biomassa lignocellulosica (ad esempio cippato di legno) 	Impianti < 1 MW	Biomassa 2/3 prodotta in azienda
Liguria	<ul style="list-style-type: none"> • Biomassa forestale • Non è incentivata la biomassa agricola 	Impianti < 1 MW termica/elettrica	
Toscana	Biomassa agro-forestale legnosa, SRF	Impianti < 1 MW e. termica, frigorifera, elettrica	
Umbria	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse arboree, SRF (imboschimenti 1-20 ha) • Biomasse agricole date da residui di potature e colturali (no paglie) e colture energetiche (max 500 ha), comprensorio max 70-100 km • Biogas da digestione reflui suini. 	Impianti < 1 MW termici/elettrici	
Marche	Biomasse legnose inclusa la SRF e scarti di lavorazione, non in aree natura 2000	Impianti < 1 MW	
Lazio	<ul style="list-style-type: none"> • Biomassa arborea (anche SRF) e colture e rifiuti agro-industriali • Biomassa residua da allevamenti animali 	Impianti < 1-2 MW	
Abruzzo	Biomassa arborea/arbustiva, SRF	Impianti < 1 MW	
Molise	Biomassa arborea/arbustiva, esclusi tutti i materiali con ciclo di permanenza inferiore ai 5 anni	Impianti < 1 MW	
Campania	Biomasse agricole e forestali, SRF	Impianti < 1 MW	
Basilicata	Biomasse forestali e residui di lavorazione del legno, SRF	Impianti < 1 MW	Escluse le aree natura, aree protette e di alto valore naturalistico, Superficie > 5 ha

Regione	Tipologia di biomassa/filiera incentivata	Uso	Note
Calabria	Biomasse forestali (anche SRF); agricole (erbacee e arboree); reflui zootecnici; sottoprodotti della trasformazione; rifiuti solidi urbani, digestione anaerobica, fermentazione dei glucidi contenuti nei vegetali come l'alcool etilico (produzione di bioetanolo), o spremitura dei semi di oleaginosi come colza, girasole e soia (produzione di biodisel); gassificazione e combustione ordinaria	Impianti < 1 MW	Previste anche digestione anaerobica, fermentazione dei glucidi contenuti nei vegetali (bioetanolo), o spremitura dei semi di oleaginosi (biodisel)
Puglia	Biomassa arborea e arbustiva	Impianti < 1 MW	
Sicilia	Biomassa forestale (eucalipteto)	Impianti < 1 MW	
Sardegna	Biomassa forestale e agricola	Impianti < 1 MW	

Le misure utilizzate per gli interventi di sostegno adottati sono distribuite nei primi 3 assi nei quali sono strutturati i PSR regionali e le più utilizzate sono state: 121 – Ammodernamento aziende; 122 – Accrescimento del valore delle foreste; 123 – Accrescimento del valore dei prodotti agricoli e forestali; 214 – Pagamenti agro-ambientali; 221 – Primo imboschimento di superfici agricole; 223 – Primo imboschimento di superfici non agricole; 311 – Diversificazione in attività non agricole; 321 – Servizi essenziali per l'economia e la popolazione rurale.

Le principali misure effettivamente attivate nei Piani di Sviluppo Rurali regionali per lo sviluppo della produzione di energia da biomasse agricole o forestali sono riportate in figura 9.

Figura 9 – Numero di Regioni che hanno adottato le differenti misure per l'incentivazione delle agro-energie.



La produzione di energia dall'agricoltura

I. Descrizione delle filiere bioenergetiche

Nicoletta Nassi o di Nasso, Simona Bosco

I.1 La struttura della filiera bioenergetica

La produzione di energia da biomasse è una fonte di energia rinnovabile di grande interesse in quanto può fornire un contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra, favorire la preservazione delle fonti non rinnovabili, contribuire al mantenimento della sicurezza energetica e favorire lo sviluppo creando nuove opportunità di lavoro sia per il settore agricolo che per quello energetico. Con l'espressione di biomassa vegetale si fa riferimento all'immagazzinamento di parte dell'energia proveniente dalla radiazione solare attraverso la fotosintesi in molecole organiche. La successiva demolizione di tali molecole restituisce poi parte dell'energia fissata.

Passando dalla scala dei processi biochimici a quella delle filiere produttive, affinché ciò avvenga è necessario che sia attivata una filiera bioenergetica, composta dalle diverse fasi di produzione della biomassa, alla successiva fase di raccolta e stoccaggio, al trasporto e alla conversione in energia (fig. 1). Una generica filiera bioenergetica può essere caratterizzata da una struttura molto variabile, più o meno complessa, in funzione sia della biomassa disponibile che della tecnologia di conversione utilizzata.

Fase I – Produzione della biomassa

Dal punto di vista normativo, nel caso in cui si voglia impiegare questo tipo di materiale per la produzione di energia, ci si deve riferire alla

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio U.E. n. 2001/77/CE sulla promozione dell'energia elettrica prodotta da Fonti di Energia Rinnovabili (FER). Tale Direttiva definisce come biomassa qualunque materiale vegetale prodotto:

- da coltivazioni dedicate;
- da trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni agricole non dedicate;
- prodotto da interventi di gestione selvicolturale;
- da manutenzioni forestali e da potatura;
- prodotto della lavorazione meccanica del legno;
- residui della lavorazione meccanica dei prodotti agricoli.

Figura 1 – Schema generico di una filiera bioenergetica.



Una soluzione per l'approvvigionamento di biomassa a uso energetico è insita nella coltivazione dedicata di specie erbacee e legnose. Queste possono essere colture già presenti in un dato ambiente come colture *food* cui è modificata la propria destinazione d'uso verso la produzione di energia o colture, alternative a quelle alimentari, attualmente ancora poco diffuse, che hanno tuttavia un elevato potenziale produttivo di biomassa e che possono determinare consistenti benefici ambientali, contribuendo tra l'altro a ridurre l'erosione del suolo agricolo e il dilavamento dei nutrienti, preservando così la qualità delle acque superficiali e di falda. Il potenziale di queste colture è notevole, poiché offre l'opportunità di utilizzare in modo economico le aree di recente marginalizzazione provenienti dall'abbandono della destinazione agricola.

Le colture da biomassa lignocellulosica sono specie caratterizzate da un'elevata produzione di sostanza secca che possono essere distinte nelle due categorie seguenti.

1. *Short Rotation Forestry* (SFR), ossia piante arboree a rapido accrescimento che, impiantate con un elevato grado di densità e gestite con idonee tecniche colturali, vengono ceduate e raccolte con turni di taglio assai più frequenti rispetto alle più tradizionali utilizzazioni del prodotto legnoso. Dalle esperienze condotte finora in Italia emergono, come specie particolarmente adatte, il pioppo, l'eucalipto, la robinia ed il salice, specie caratterizzate da differenti capacità d'adattamento alle condizioni agropedoclimatiche, in particolar modo riguardo alla disponibilità idrica e alla sensibilità alle basse temperature invernali.
2. Colture erbacee poliennali o annuali, tra cui sono identificabili come specie particolarmente adatte all'areale mediterraneo il miscanto e la canna comune, soprattutto nelle aree centrali e settentrionali, e il sorgo da fibra. Presentano buone potenzialità anche il cardo (nelle aree centro-meridionali o in quelle dove la disponibilità idrica è limitata) e alcune graminacee che recentemente stanno riscuotendo particolare interesse a livello internazionale (ad esempio, *Panicum* spp., *Phalaris* spp.).

Le colture poliennali erbacee, quali la canna comune, il miscanto, il panico e il cardo e le legnose a rotazione breve, quali pioppo, salice, eucalipto, robinia, ginestra, possono essere messe a dimora tramite semi, talee o rizomi una sola volta all'inizio del ciclo produttivo, che può avere una lunghezza variabile dai 10 ai 15 anni. Queste ultime si caratterizzano soprattutto per la notevole capacità di ricrescere dopo il taglio annuale e per l'elevata produttività. Rispetto alle colture annuali sono inoltre meno esigenti in termini di lavorazioni del terreno e di interventi di coltivazione.

Complementare rispetto alla coltivazione di specie da biomassa è notoriamente la raccolta dei residui derivanti dai settori agricolo, agro-industriale e forestale, fra i quali rientrano, ad esempio, le potature degli alberi da frutto, le paglie dei cereali, i residui delle utilizzazioni forestali, i residui di prima e seconda lavorazione del legno, le vinacce, le sanse e tutti i residui delle industrie agroalimentari, i reflui zootecnici e i residui delle coltivazioni ortive.

Ad esempio, relativamente all'impiego dei reflui zootecnici e dei residui agroindustriali, a livello di Regione Toscana è stata recentemente realizzata una stima dei reflui potenzialmente disponibili sulla base della consistenza degli allevamenti di produzione zootecnica e sulla dimensione delle imprese di trasformazione alimentare che insistevano sul territorio regionale. I risultati riportano come i reflui zootecnici prodotti attualmente in Toscana potrebbero generare biogas per un valore energetico pari a 665.000 GJ che potrebbero salire a oltre 1.000.000 GJ se fossero integrati con quanto proveniente dal comparto agroindustriale relativamente al settore lattiero-caseario, del vino, dell'olio (22.000 t annue di sanse esauste) e della macellazione.

Il cippato forestale è prodotto principalmente da materiale che proviene da diradamenti, tagli fitosanitari, cedui a turno breve e residui di utilizzazione. I sistemi per ottenere il materiale forestale variano secondo le caratteristiche della stazione di raccolta, delle specie arboree e delle parti utilizzate (tronchi e rami in diverse proporzioni).

Fase 2 – Raccolta e stoccaggio delle biomasse

Mentre per le biomasse da energia già presenti nei tradizionali ordinamenti produttivi come colture a destinazione alimentare, gli aspetti della filiera legati alla raccolta e allo stoccaggio sono ormai consolidati, per le colture dedicate e la biomassa forestale, la realizzazione di tali operazioni è possibile solo attraverso percorsi tecnici non ancora completamente ottimizzati che richiederebbero ulteriori approfondimenti. Infatti, per queste tipologie di biomassa la raccolta e lo stoccaggio rappresentano sovente il punto critico dell'intera filiera poiché implicano un aumento dei costi economici ed energetici che, conseguentemente, determina una diminuzione della redditività dell'intero processo produttivo. La raccolta e lo stoccaggio rivestono quindi un ruolo fondamentale per il completamento della filiera produttiva. L'individuazione di linee d'intervento attraverso cui ottimizzare queste operazioni è di fondamentale importanza per i seguenti motivi:

- gli impianti di conversione energetica devono essere alimentati con continuità e perciò il prodotto deve essere disponibile durante tutto il corso dell'anno;
- lo sfasamento temporale fra la produzione agricola e l'utilizzo della biomassa obbliga alla dotazione di scorte sufficienti e quindi di aree di stoccaggio, possibilmente in prossimità degli impianti;
- la necessità di ottimizzare la meccanizzazione della trasformazione per arrivare a ottenere una standardizzazione della materia prima è indispensabile per rendere economicamente conveniente l'intera filiera produttiva ma soprattutto la fase di produzione;
- il prodotto deve presentare caratteristiche qualitative ottimali per essere trasformato, deve quindi essere sottoposto a lavorazioni preliminari per ottenere un prodotto direttamente utilizzabile negli impianti.

Nella raccolta delle essenze arboree coltivate in Short Rotation Forestry si possono adottare due tipi di cantiere di raccolta:

- abbattimento, cippatura e carico sono realizzati contemporaneamente;
- abbattimento e concentrazione delle piante intere, seguiti in un secondo tempo da cippatura e carico.

Per la biomassa forestale, un punto critico riguardo alla raccolta è rappresentato dalla difficoltà di convogliare tutto il materiale proveniente da una data area nei centri di raccolta, sia per le difficoltà di accedere a determinate zone con le macchine che per le elevate pendenze dei versanti.

Per quel che concerne le colture erbacee queste, sia specie annuali che poliennali, permettono di ottenere una biomassa di qualità inferiore sia per caratteristiche chimiche che fisiche. Per contro, i raccolti annuali presentano produzioni medie piuttosto elevate. I cantieri di raccolta messi a punto in questo caso sono:

- falciatura, trinciatura e carico;
- falciatura, imballatura e carico.

La biomassa trinciata si può ricondurre alla categoria del 'cippato', nonostante da un punto di vista merceologico il prodotto non corrisponda al cippato di legno. La biomassa imballata può essere movimentata e stoccata in questa forma, prima della riduzione di pezzatura necessaria per l'utilizzazione finale.

La raccolta di residui agricoli e colture dedicate può sia avvantaggiarsi dell'uso delle infrastrutture già esistenti per le colture tradizionali che, in taluni casi, richiedere l'acquisto di specifici macchinari. In questo secondo caso però i costi d'acquisto sono difficilmente ammortizzabili a causa del loro limitato periodo d'utilizzo durante l'anno. Per ovviare a questo inconveniente, che rappresenta un forte ostacolo alla diffusione delle filiere agro-energetiche sul nostro territorio, un'opportunità di sviluppo della filiera potrebbe essere legata al sostegno delle aziende che si occupano di contoterzismo agricolo o alle associazioni di agricoltori. Infatti, nella realtà toscana, caratterizzata da aziende di piccole dimensioni, solo strutture specializzate ed organizzate possono garantire un'adeguata capacità di raccolta e trasporto senza che i costi non vadano a pregiudicare la redditività della filiera.

All'interno della filiera delle biomasse lo stoccaggio è una fase indispensabile affinché l'approvvigionamento di biomassa sia continuo e idoneo alle esigenze dell'impianto di produzione dell'energia. È necessario quindi che fra i soggetti della filiera ci sia la possibilità di poter conservare a lungo quantità ingenti di prodotto, date le limitate possibilità di dilazionare nel tempo l'approvvigionamento. Per tale motivo la piattaforma produttiva delle biomasse lignocellulosiche deve essere attrezzata riguardo allo stoccaggio della biomassa, in spazi e sotto forme che possono essere anche molto diversi tra di loro. La molteplicità dei modelli possibili di filiera fa sì che a potersi dover occupare dello stoccaggio non sia solo il gestore dell'impianto o, se esistente, l'intermediario che commercializza il prodotto, ma anche il produttore, sia forestale che agricolo.

I principali prodotti delle biomasse lignocellulosiche destinabili allo stoccaggio sono:

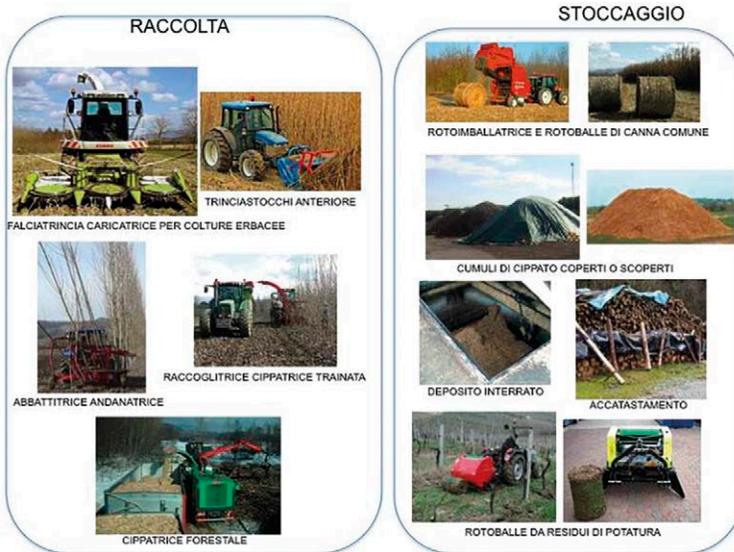
- piante intere, ottenute operando un taglio alla base e quindi stoccate per poi essere trasformate (ad esempio tramite cippatura) prima dell'utilizzo;
- legna da ardere, costituita da pezzi di 40-50 cm di lunghezza o anche maggiori, adatta per applicazioni domestiche;
- cippato, costituito da legno sminuzzato (chip) di dimensioni variabili;
- pezzato, ossia legno in pezzi di 15-25 cm di lunghezza;
- briquette, tronchetti di materiale legnoso pressato di circa 7-8 cm di diametro e 30 cm di lunghezza;
- pallet;
- balle.

Con esclusione della legna da ardere, tutti i principali prodotti delle biomasse lignocellulosiche necessitano di trasformazioni che le rendano adatte al trasporto, all'uso nei diversi impianti e all'automazione dei processi. La riduzione della pezzatura del materiale è fondamentale, ragione per la quale il cippato ha un ruolo centrale nelle filiere delle biomasse lignocellulosiche. Il cippato può costituire il prodotto finale destinato all'utilizzazione energetica, oppure successive trasformazioni possono portare a prodotti ulteriormente lavorati e più costosi, quali pellet e briquette. Queste ultime due tipologie di formato sono omogenee dal punto di vista delle dimensioni e sono caratterizzate da un basso tenore di umidità, qualità che le rendono particolarmente adatte alla conservazione. Per quel che riguarda il cippato, il pezzato e la biomassa in piante intere c'è ancora la necessità di approfondire le tecniche di conservazione, in funzione delle esigenze dei diversi operatori della filiera.

Per quanto riguarda le tecniche di stoccaggio adottate, queste dipendono molto dalla destinazione d'uso della biomassa disponibile. Nel caso in cui la biomassa infatti venga destinata a processi di trasformazione termochimica (combustione o gassificazione) essa viene cippata e poi stoccata o in cumuli coperti o scoperti o in depositi interrati, oppure si ricorre all'impiego di pellet o briquette che seppur più costose richiedono minor quantità di spazio e possiedono un contenuto di umidità già piuttosto basso. Sempre per questa tipologia di processi, nel caso dell'impiego di biomassa forestale e/o agricola di tipo residuale o di colture erbacee, lo stoccaggio può avvenire anche attraverso la costituzione di rotoballe che saranno utilizzate nell'impianto, previa cippatura. Per quanto riguarda la biomassa da destinare a processi di tipo microbiologico, come nel caso di biogas e bioetanolo, si ricorre invece all'uso di silos per la conservazione della biomassa.

La figura 2 riporta alcuni esempi su possibili itinerari tecnici idonei per la fase di raccolta e stoccaggio.

Figura 2 – Alcuni esempi di raccolta e stoccaggio della biomassa.



Fase 3 – Il trasporto delle biomasse

La raccolta delle biomasse avviene tipicamente in luoghi/località distanti dagli impianti per la conversione energetica: è quindi necessario trasportare questo materiale per distanze più o meno grandi per garantire il proseguimento del processo produttivo.

Questo passaggio deve essere tenuto in debita considerazione per gli aspetti prettamente economici. Infatti, a causa della minor densità energetica delle biomasse rispetto a quella dei combustibili fossili questa fase ha un'incidenza notevole sui costi di produzione e conseguentemente va a influenzare notevolmente lo sviluppo del settore e il raggio dell'area di raccolta delle biomasse rispetto all'impianto di conversione.

I fattori che condizionano maggiormente le modalità di organizzazione e i costi della fase di trasporto sono:

- la distanza tra il luogo di raccolta e quello di destinazione, che a sua volta dipende dalle infrastrutture disponibili;
- la velocità nei collegamenti, che è determinata dalla tortuosità del percorso, dalla disponibilità di vie stradali (autostrade, strade statali ecc.), dalla tipologia di mezzi necessari per lo spostamento, dalla programmazione dell'attività del personale e dei veicoli disponibili e dalla capacità dei veicoli;
- la densità della biomassa che a sua volta dipende sia dalla tipologia di biomassa che dalla modalità di stoccaggio adottata.

Per l'ottimizzazione dei costi di trasporto è quindi importante incrementare la densità energetica dei biocombustibili, per garantire maggiori capacità di carico dei veicoli e per ridurre allo stesso tempo i costi e gli impatti ambientali associati alla movimentazione e di grossi quantitativi di biomassa.

L'impatto ambientale in termini di qualità dell'aria, con emissioni tipiche del settore dei trasporti quali NO_x , SO_x , CO , O_3 , PM_{10} e di emissioni di gas ad effetto serra, CO_2 , CH_4 e N_2O , può infatti essere rilevante. La quantità e l'annesso impatto di queste emissioni è funzione in primo luogo della modalità di trasporto, ad esempio il trasporto imbarcazione navale determina un livello minore di emissioni inquinanti rispetto al trasporto su strada per unità di prodotto, grazie alla maggiore capacità di carico per singolo viaggio.

Dal punto di vista degli impatti sociali della fase di trasporto è doveroso evidenziare che la continua movimentazione di biomasse in una data zona di approvvigionamento potrebbe determinare una congestione del traffico ed un maggior inquinamento delle zone attraversate, con ripercussioni negative sulla percezione e conseguentemente sull'accettazione da parte dei cittadini di questa tipologia di energia rinnovabile. In questo senso, il trasporto su rotaie, dove possibile, potrebbe ovviare a questi inconvenienti rendendo più agevole lo sviluppo della filiera.

Fase 4 – La conversione energetica delle biomasse

La biomassa lignocellulosica raccolta, dopo essere stoccata e trasportata, viene conferita all'impianto dove viene convertita in energia attraverso uno dei processi disponibili, che possono essere classificati in tre grandi categorie: i processi fisico-chimici, i processi biologici e i processi termochimici (fig. 3). Queste tecnologie sono presentate brevemente in questo paragrafo; una descrizione più approfondita delle tecnologie di conversione è affrontata nel paragrafo successivo.

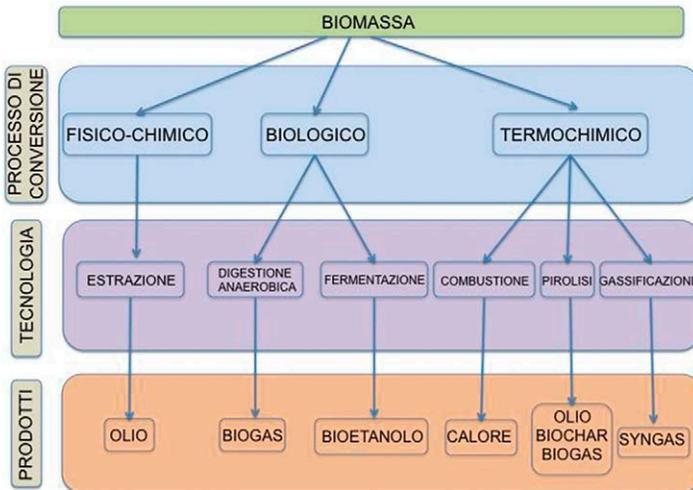
I processi fisico-chimici possono essere utilizzati non tanto sulle biomasse lignocellulosiche quanto piuttosto su biomasse provenienti da colture oleaginose per la produzione di biocarburanti quali il biodiesel, da impiegare prevalentemente per l'autotrazione.

I processi di conversione biologici sfruttano microrganismi (batteri, lieviti, funghi) che, attraverso trasformazioni di natura anerobica, convertono materiali di vario tipo quali: reflui zootecnici, scarti di lavorazione (vinacce, acque di vegetazione ecc.), reflui urbani e industriali, colture zuccherine e anche biomasse lignocellulosiche dedicate. Il principale processo in questa categoria fa riferimento alla digestione anaerobica. Questa conversione è effettuata da diversi microrganismi che, lavorando a catena, degradano il substrato in varie tappe, passando dalla formazione di carboidrati, idrogeno e acido acetico, per citarne alcuni, prima di giungere alla formazione

di metano e anidride carbonica, in altre parole biogas. Un altro importante tipo di trasformazione della biomassa operato da microrganismi anaerobi è la fermentazione alcolica. Questa avviene a partire dalla degradazione di una materia prima composta da zuccheri semplici o da carboidrati polimerici del tipo $(C_6H_{12}O_6)_n$, a seguito di conversione in glucosio tramite idrolisi. Attualmente il mondo della ricerca e quello dell'industria sta dedicando la propria attenzione ai cosiddetti biocarburanti di seconda generazione, derivanti da biomasse lignocellulosiche, approfonditi nel paragrafo 3.

L'ultima classe di processi di trasformazione a cui possono essere sottoposte le biomasse è quella delle trasformazioni termochimiche. Più nel dettaglio, i processi ad oggi maggiormente studiati sono la combustione diretta, la pirolisi e la gassificazione. Il primo processo è quello più tradizionale che per essere efficiente richiede una biomassa con un ridotto contenuto di acqua. In Italia, al momento, sono in funzione una quarantina di impianti di grosse dimensioni, con motore CHP (produzione contemporanea di elettricità e calore), con un'efficienza piuttosto bassa, nell'ordine del 20-25%; il vantaggio della combustione è l'elevato livello di maturità che caratterizza questa tecnologia.

Figura 3 – Processi di conversione energetica della biomassa.



La pirolisi, processo ancora sperimentale, sfrutta una conversione della biomassa, con umidità inferiore al 15%, effettuata in ambiente completamente privo di ossigeno e ad alte temperature (tra 200 e 700 °C); la tecnologia più promettente sembra essere la flash pirolisi, condotta a temperature sui 650 °C e tempi di permanenza della biomassa estremamente brevi (1-2 secondi) che consentono di ottenere un prodotto liquido detto bio-olio o

tar, utilizzabile, dopo processi di *upgrading*, come combustibile o come materia prima destinata a successivi processi chimici.

La gassificazione, come suggerisce il nome, consente la produzione di un gas sintetico o syngas, una miscela di gas quali azoto, metano, idrogeno, monossido di carbonio e altri, tramite ossidazione incompleta dei composti carboniosi portati a elevate temperature (circa 1000 °C) in carenza di ossigeno. Il syngas può essere utilizzato tal quale in caldaia, ricavandone idrogeno o combustibili sintetici (ad esempio processo Fischer-Tropsch).

2. Cenni sulle tecnologie di conversione

Marco Mancini, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini

2.1 I processi di conversione

I processi di conversione energetica delle biomasse sono principalmente tre:

- *Conversione biologica*: avviene attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi, funghi e altri microrganismi che si sviluppano nella biomassa tenuta in particolari condizioni. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità superiore al 30% e rapporto C/N < 30; i principali processi biologici sono la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica.
- *Conversione termochimica*: avviene attraverso l'azione del calore e la conseguente combustione della biomassa. Si applica generalmente su biomasse con tenore di umidità inferiore al 30% e rapporto C/N > 30.
- *Estrazione*: può essere un semplice processo fisico di pressione per l'estrazione di oli vegetali puri da semi oleosi ottenuti da colture dedicate; un successivo processo di esterificazione viene impiegato per la produzione di biodiesel.

2.2 I biocombustibili

I biocombustibili che si originano a partire dalle biomasse possono essere suddivisi in tre principali categorie in base al loro stato fisico: solido, liquido o gassoso.

- *Biocombustibili solidi*: costituiti principalmente da prodotti a matrice lignosa destinati alla combustione diretta (legna da ardere di varie pezzature, cippato ecc.) o previa trasformazione in forme densificate (pellet e bricchetti). Sono utilizzati principalmente come sostituti degli idrocarburi commerciali (gasolio, metano, GPL) soprattutto per la produzione di calore nei settori residenziale ed industriale, ed attraverso sistemi di

cogenerazione possono fornire calore ed elettricità. Sono caratterizzati dall'aver basso potere calorifico rispetto agli idrocarburi liquidi, gassosi ed anche solidi (carbone, lignite ecc.) e sono adatti alla loro sostituzione soprattutto nelle caldaie.

- *Biocombustibili liquidi*: prodotti derivanti per lo più da colture dedicate attraverso processi di estrazione (olio vegetale puro) ed esterificazione (biodiesel) degli oli vegetali o processi di fermentazione e distillazione di materiali zuccherini (bioetanolo). Sono di particolare interesse per la produzione di biocarburanti nel settore dei trasporti. Sono classificabili in due tipologie principali: 1) prodotti sostitutivi della benzina e 2) prodotti sostitutivi del gasolio. I primi sono costituiti da alcoli (principalmente etanolo) ottenuti, mediante processi di fermentazione e distillazione controllata, dalla conversione di prodotti agricoli. Per la produzione di etanolo viene oggi utilizzata principalmente canna da zucchero (Brasile) oppure mais (USA) ma è possibile l'utilizzo di altre colture quali il sorgo zuccherino o la barbabietola da zucchero. I prodotti sostitutivi del gasolio sono, invece, in maggioranza costituiti da oli vegetali che presentano caratteristiche di potere calorifico e viscosità paragonabili a quelli del gasolio e sono prodotti principalmente per spremitura di semi oleosi quali, ad esempio, colza, girasole, soia, lino oppure da piante tropicali (palma da olio, *jatropha curcas*). Per poter essere utilizzati nei moderni motori degli autoveicoli come sostituti del gasolio per autotrazione gli oli vegetali devono subire un processo chimico di transesterificazione, che converte gli oli vegetali in biodiesel per uso commerciale. Il biodiesel in genere viene addizionato al gasolio per autotrazione in diverse percentuali ma può essere utilizzato anche allo stato puro. Gli oli vegetali puri possono anche essere utilizzati in motori a combustione interna stazionari ai fini della generazione elettrica o della cogenerazione.
- *Biocombustibili gassosi*: prodotti derivanti da processi di fermentazione anaerobica di miscele di biomasse umide a componente organica quali reflui zootecnici, civili o agro-industriali spesso addizionate con produzioni agricole facilmente fermentescibili quali mais, barbabietola da zucchero ecc. Le colonie batteriche in mancanza di ossigeno producono gas a basso potere calorifico costituito al 45-55% da metano che può essere combusto direttamente in motori a combustione esterna o microturbine per fare cogenerazione oppure può essere filtrato e trattato (estrazione CO_2 , H_2O , particelle ecc.), quindi convertito in biometano ed immesso in rete.

Con il termine *biocarburante* si fa riferimento a tutti quei biocombustibili liquidi e gassosi (ad esempio bioetano, biodiesel, biometano) atti ad essere utilizzati per l'alimentazione di motori a combustione interna (ciclo Diesel e ciclo a Otto) o in turbine stazionarie. Il loro impiego è tradizional-

mente legato al settore dei trasporti in sostituzione dei combustibili fossili per autotrazione, anche se, nel corso degli ultimi anni, si è assistito ad una rapida evoluzione del loro campo di applicazione anche in direzione della generazione elettrica e termica ed in particolar modo della cogenerazione. A questo proposito l'olio vegetale puro (PVO) ed il biogas sono tra i biocarburanti che trovano applicazione prevalente nel settore della generazione e cogenerazione.

I biocombustibili solidi sono invece tradizionalmente legati al settore del riscaldamento e della generazione elettrica e diffusamente impiegati negli impianti di teleriscaldamento e cogenerazione.

2.3 Processi termochimici

2.3.1 La combustione del legno

La combustione della sostanza organica avviene essenzialmente attraverso il passaggio successivo di tre stadi che sono essiccazione, degradazione, combustione. Nel primo stadio l'acqua contenuta nel legno subisce il processo di evaporazione che ha un costo energetico che grava sulla resa energetica del processo stesso. Ne consegue che tanto maggiore è l'umidità di partenza e tanta maggiore è la quota di energia di processo utilizzata per far evaporare l'acqua.

Il secondo stadio prevede la degradazione termica, ossia i processi di pirolisi (o piroscissione) e gassificazione, cioè processi di decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuti mediante l'applicazione di calore e in completa assenza di ossigeno. In condizioni anaerobiche (totale assenza di ossigeno), il materiale subisce la scissione dei legami chimici originari con formazione di molecole più semplici.

Nell'ultima fase, invece, si ha l'ossidazione dei gas e delle molecole semplici ridotte, con liberazione di energia. A seconda della composizione chimica della matrice organica, della temperatura raggiunta e della quantità di ossigeno disponibile si possono avere differenti tipi di prodotti residuali quali cenere, carbone (biochar), catrame, oli, syngas, oltre alle emissioni quali CO, CO₂, H₂O, H₂, CH₄ polveri, composti organici volatili, ossidi di azoto e di zolfo ecc.

2.3.2 Le caldaie termiche a biomassa

Le caldaie termiche alimentate a biomassa lignocellulosica quale legno, cippato, pellet trinciati di residui delle coltivazioni (vite, olivo, paglie ecc.) producono, per combustione, calore che può riscaldare aria, acqua o entrambe attraverso appositi scambiatori.

Particolarmente importante è l'affinità fra caldaia e biocombustibile: infatti per le differenti tipologie di biocombustibile occorrono caldaie con

differenti sistemi di alimentazione e combustione e specifiche tarature del sistema. Non esistono caldaie polifaghe in assoluto, anche se normalmente i sistemi più grandi sono maggiormente versatili verso le variazioni di composizione del materiale di alimentazione grazie alla loro inerzia termica ed alla grandezza della camera di combustione che permette di essiccare rapidamente anche legnami a più elevato contenuto di umidità. Le caratteristiche del combustibile che maggiormente influenzano l'efficienza della caldaia sono rispettivamente: contenuto idrico, potere calorifico, pezzatura, ceneri del legname, ceneri residuali, fusibilità delle ceneri, contenuto di cloro e zolfo.

Le principali caratteristiche tecnologiche che distinguono le caldaie commerciali sono le seguenti.

- *Tipologia di caldaia*: le caldaie si dividono in due tipologie principali che sono a griglia fissa ed a griglia mobile. Le prime sono normalmente di piccola taglia e la griglia con il letto di braci è fissa. Le caldaie a griglia mobile sono di taglia più grande e gli elementi che costituiscono la griglia si muovono lungo un piano inclinato favorendo l'avanzamento di braci e cippato, evitando così la formazione di scorie di fusione o incrostazioni anche in presenza di materiale più umido.
- *Tecnologia di combustione*: nella quasi totalità delle moderne caldaie a biomassa è utilizzata la tecnologia denominata a fiamma inversa o fiamma rovesciata. In queste caldaie la fiamma si sviluppa dall'alto verso il basso normalmente grazie all'azione di un ventilatore posizionato a valle della griglia che genera una depressione. Questa tecnologia aumenta l'efficienza di combustione in maniera considerevole rispetto ad una comune stufa a legna, ma richiede una pulizia regolare della caldaia e per questo motivo le moderne caldaie a biomassa sono dotate di sistemi automatici di pulizia dello scambiatore. Alcune adottano ancora tecnologia a fiamma diretta in cui la fiamma è libera e si sviluppa verso l'alto.
- *Sistema di alimentazione*: è il sistema con cui il combustibile viene addotto alla camera di combustione. Possono esserci varie tecnologie fra cui a) sistema automatico con deposito o serbatoio e agitatore (cippato, pellet, trinciato) e coclea convogliatrice; b) sistema pneumatico idoneo soprattutto per pellet e nocciolino; sistema a caduta libera dal deposito, utilizzato soprattutto sulle piccole stufe alimentate a pellet o nocciolino; sistema manuale (legna o pellet).
- *Sistema di pulizia dello scambiatore*: automatico o manuale.

L'efficienza termica delle caldaie è molto elevata e nel migliore dei casi si avvicina al 90%, con un notevole progresso rispetto all'efficienza dei tradizionali camini che in molti casi avevano rendimenti attorno al 15%.

2.3.3 Cogeneratori alimentati a combustibili solidi

La produzione combinata di energia elettrica e calore (cogenerazione) a partire da biocombustibili solidi avviene attraverso due differenti sistemi cogenerativi dove essenzialmente la biomassa viene:

- direttamente combusta in una caldaia con produzione di calore e cessione dello stesso ad un vettore energetico che alimenta il ciclo termodinamico del sistema di produzione di energia elettrica; appartengono a questa categoria i cicli termodinamici utilizzando i seguenti fluidi:
 - vapore d'acqua (turbine a vapore);
 - fluido organico (turbine per cicli Rankine);
 - aria calda (turbine ad aria calda);
 - gas inerti quali elio ed azoto (motori Stirling);
- scomposta chimicamente in molecole volatili in appositi reattori termochimici (pirogassificatori) con produzione di gas a basso potere calorifico (syngas) i quali possono essere direttamente combusta in motori alternativi a combustione interna o turbine a gas previa filtrazione delle particelle incombuste (catrami, polveri ecc).

I sistemi del primo tipo sono caratterizzati dalla presenza di una caldaia, in genere ad elevata efficienza, ma sono condizionati dal basso rendimento elettrico del ciclo termodinamico che si attesta attorno al 20% per i cogeneratori di taglia più grande caratterizzati da maggiore efficienza.

I sistemi del secondo tipo sono in teoria in grado di raggiungere rendimenti elettrici dell'ordine del 30%, ma in realtà dipendono in maniera sostanziale dalla qualità del gas prodotto dal pirogassificatore che a sua volta è fortemente influenzato dalla composizione della biomassa in ingresso che deve essere costante ed omogenea nel tempo.

In entrambi i sistemi l'energia elettrica viene prodotta da alternatori accoppiati a motori alternativi oppure a turbine o microturbine a gas come avviene nei sistemi di cogenerazione di tipo commerciale alimentati a gas, biogas, oli vegetali ecc.

Poiché in Europa in genere gli incentivi economici per le fonti rinnovabili vengono concessi alla produzione di energia elettrica, i sistemi di cogenerazione vengono in genere dimensionati per massimizzare la produzione elettrica e quindi ottimizzare il ritorno sull'investimento. Per l'energia termica si parla quindi di recupero e valorizzazione. È infatti molto difficile individuare fabbisogni termici continui che possano sfruttare questa risorsa. L'impiego dell'energia termica aumenta l'efficienza dell'impianto con conseguenti benefici economici ed ambientali. Molto spesso l'utilizzazione è costituita sia per utenze industriali che residenziali dal riscaldamento invernale degli edifici che rappresentano un'utenza discontinua nel tempo. Alcuni impianti di teleriscaldamento, quale

quello che serve il comune di Calenzano, rappresentano un esempio di cogenerazione. In agricoltura sempre più si sta ragionando sull'impiego dell'energia termica su vari processi aziendali quali l'essiccazione, la produzione di frigoriferi per il raffreddamento e la conservazione, il riscaldamento di acqua impiegata per le pulizie di strumentazioni latte/casearie ecc. in modo da valorizzare questo vettore energetico anche nel periodo primaverile/estivo.

I sistemi di cogenerazione di grossa taglia (superiori a 500 kW_e) sono in genere progettati per funzionare almeno 7000 delle 8760 ore annue, con un utilizzo del tempo dell'ordine dell'80%. I cogeneratori di taglia più piccola, essendo caratterizzati da rendimenti elettrici più bassi e da costi di investimento più elevati in termini di €/kW_e installato, sono in genere progettati per un funzionamento discontinuo in quanto devono poter valorizzare anche l'energia termica. In genere sistemi di questo tipo possono funzionare per un numero di ore equivalenti compreso fra le 2000 e le 6000 annue a seconda delle tariffe elettriche e termiche dell'energia applicabili o del costo del combustibile utilizzato.

I sistemi cogenerativi sono di vario tipo: le tecnologie attualmente più utilizzate sono descritte di seguito.

Sistemi di cogenerazione a ciclo ORC

ORC è l'acronimo di Organic Rankine Cycle ovvero 'ciclo Rankine a fluido organico'. Il ciclo Rankine è un ciclo termodinamico che converte il calore in lavoro. Il calore viene fornito esternamente a un circuito chiuso, che in origine usava l'acqua come fluido di lavoro.

Sebbene il ciclo Rankine possa utilizzare anche l'acqua come fluido di lavoro, la sua applicazione più interessante si è sviluppata con l'utilizzo di appositi fluidi organici (normalmente un olio silconico) in quanto ciò consente di sfruttare anche basse differenze di temperatura a livelli di temperatura inferiori ai 100 °C ove l'acqua non vaporizzando non può essere utilizzata.

Per questi motivi gli ORC si sono rapidamente diffusi come 'recuperatori' di produzione elettrica in molte applicazioni dove è disponibile calore di scarto a bassa temperatura oppure dove c'è un elevato fabbisogno termico continuo, come ad esempio negli essiccatori di legname delle segherie.

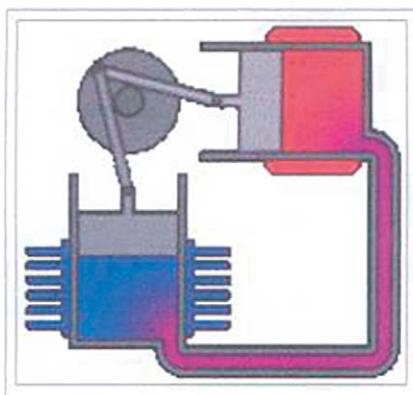
La trasformazione in energia meccanica avviene tramite espansione del vapore di fluido organico all'interno di una turbina, accoppiata ad un alternatore elettrico, e successiva condensazione dello stesso con conversione allo stato liquido in un condensatore ad aria oppure ad acqua.

Il recupero di calore utile dal condensatore per soddisfare il fabbisogno termico è possibile, ma in genere le temperature di recupero del calore sono basse (inferiori a 50 °C).

Il motore Stirling

Il motore Stirling, o motore alternativo a combustione esterna, funziona con un ciclo chiuso di espansione/compressione guidato dalla differenza di temperatura esistente tra una sorgente calda ed un punto freddo (fig. 4). Il ciclo chiuso normalmente utilizza come fluido di lavoro termodinamico un gas inerte quale l'aria, che però è stata sostituita nelle versioni moderne dei motori Stirling da elio oppure azoto che permettono di raggiungere efficienze maggiori. All'atto del raggiungimento di una opportuna differenza di temperatura fra sorgente calda e punto freddo si innesca una pulsazione ciclica che viene trasformata in moto alternato dei pistoni.

Figura 4 – Schema del motore Stirling. [Fonte: http://it.wikipedia.org/wiki/Motore_Stirling]



Può funzionare con qualsiasi tipo di sorgente di calore, ad esempio con calore solare concentrato oppure con calore fornito da una caldaia di combustione di biomassa legnosa, carbone, biogas, gas e/o combustibili liquidi. Ad oggi sono poche le applicazioni pratiche di questa tecnologia. Fra queste ritroviamo l'impianto realizzato a Castel d'Aiano (BO) dal Centro Innovazione per la Sostenibilità Ambientale (CISA) di Porretta Terme (BO).

Il sistema è costituito da un gassificatore di biomassa a tecnologia updraft da 200 kW_t e da un motore Stirling della Stirling Denmark da 35 kW_e e 140 kW_t. Il gassificatore updraft gassifica il cippato trasformandolo completamente in un gas sintetico (syngas) a basso potere calorifico (1,26 kWh/Nm³).

Il syngas, difatti, esce dal gassificatore updraft ad una elevata temperatura di circa 700 °C e viene, quindi, inviato alla camera di combustione esterna al motore Stirling dove viene completamente bruciato tramite un apposito bruciatore studiato per gas a basso potere calorifico. La temperatura di combustione del gas sintetico all'interno della camera di combustione è compresa nell'intervallo fra 800 °C e 1250 °C.

Il gassificatore presenta, inoltre, il non trascurabile vantaggio di poter gassificare direttamente biomassa legnosa con contenuto di umidità che può arrivare al 60% (tenore di umidità del cippato fresco di bosco) senza necessità di pre-essiccazione.

Sistemi di cogenerazione con turbine ad aria calda

La microturbina modificata con ciclo ad aria calda ed alimentazione a biomasse è una innovazione tecnologica apparsa sul mercato dei sistemi di cogenerazione di piccola taglia alimentati a biomassa legnosa solida da pochi anni, a seguito della realizzazione di un innovativo scambiatore di aria calda ad alta temperatura, realizzato per primo dalla società MetalRef Hi-Tech di Pescia (PT).

Si differenzia da una normale microturbina a gas metano per aver sostituito il bruciatore di metano con uno scambiatore di calore ad alta temperatura installato all'interno di una caldaia a biomassa lignocellulosica. Questa apparecchiatura è in grado di fornire all'aria l'energia necessaria per la fase di espansione e la conseguente generazione di energia elettrica all'alternatore.

L'impianto è costituito da una caldaia alimentata a biomassa lignocellulosica ed il processo di conversione energetica della biomassa è di tipo termochimico e sfrutta la combustione in eccesso d'aria della biomassa legnosa all'interno di una caldaia.

Il ciclo termodinamico ha inizio mediante la compressione dell'aria da parte della sezione di compressione della microturbina seguita dal forte riscaldamento dell'aria ottenuto mediante trasferimento di calore da parte di uno scambiatore fumi-aria ad alta temperatura installato all'interno della caldaia stessa che aumenta considerevolmente l'entalpia della stessa e da una successiva espansione dell'aria calda attraverso la microturbina che consente di generare energia elettrica all'alternatore accoppiato alla stessa.

Il calore dei fumi della caldaia, che ha elevata temperatura, può essere recuperato in appositi scambiatori per produrre aria e acqua calda.

Il sistema ha il vantaggio di funzionare bene anche in impianti di piccola taglia (circa 100 kW) con rese elettriche che si attestano attorno al 15% e con versatilità nella gestione dell'impianto.

Sistemi di cogenerazione con gassificatori

La gassificazione è una tecnologia di conversione termochimica mediante la quale un combustibile solido viene trasformato in un combustibile gassoso di sintesi, comunemente denominato 'syngas'. La gassificazione può essere applicata sia a combustibili fossili (ad esempio carbone) che a combustibili classificati come rinnovabili, quali la biomassa legnosa, che producono syngas con composizione diversa ma con problematiche tecnico-gestionali simili.

Il syngas è costituito da una miscela dei seguenti elementi e composti chimici: monossido di carbonio (CO), idrogeno molecolare (H₂), metano (CH₄), anidride carbonica (CO₂), vapore d'acqua (H₂O), azoto molecolare (N₂), tracce di idrocarburi (etilene, etano), contaminanti (ceneri, tar, char, oli).

Il syngas può essere prodotto mediante combustione parziale della biomassa (utilizzando aria o ossigeno) oppure mediante gassificazione pirolitica (utilizzando vapore). In generale si può dire che nella gassificazione sono presenti, secondo la tecnologia utilizzata, 4 fasi, di seguito elencate:

- essiccazione → eliminazione di acqua dalla biomassa;
- pirolisi → formazione gas di pirolisi, char e tar;
- ossidazione (incompleta) → fornisce calore per la fase di riduzione;
- riduzione (endotermica) → produzione syngas.

Il vantaggio della gassificazione è costituito dalla facilità di accensione, trasporto e completa combustione del gas di sintesi prodotto mentre lo svantaggio è costituito dal minor potere calorifico del gas prodotto rispetto a quello del materiale di partenza. In seguito ad un processo di raffreddamento e condensazione i composti organici condensabili formano una fase liquida scura (bio olio o tar). Fra i sottoprodotti possiamo ritrovare, anche, un residuo solido ricco in carbonio (biochar).

Il syngas prodotto necessita di purificazione prima dell'utilizzo; questa normalmente avviene con impiego di molteplici tecnologie quali filtri chimico-fisici ed elettrostatici e lavaggi in acqua.

A questo punto il syngas può essere impiegato in appositi motori endotermici, in motori a combustione esterna o con microturbine.

2.4 Processi biologici

2.4.1 La digestione anaerobica e la produzione di biogas

La digestione anaerobica per la produzione di biogas è un processo chimico-biologico in cui la sostanza organica viene trasformata in biogas ad opera di differenti ceppi di microrganismi tra cui i metanigeni, quando si trovano in ambiente anaerobico. Il processo è svolto da un consorzio batterico e nessun ceppo batterico da solo è in grado condurre autonomamente la completa degradazione anaerobica della sostanza organica. Ciascuna popolazione opera un livello di degradazione e produce come cataboliti degli intermedi di reazione che fungono da substrato per la popolazione successiva nella catena trofica. I primi ad operare sono i batteri idrolitici che spezzano le macromolecole biodegradabili in sostanze più semplici, seguono i batteri acidogeni, che utilizzano come substrato i composti organici semplici liberati dai batteri idrolitici e producono acidi organici a

catena corta. Intervengono poi i batteri acetogeni che producono acido acetico, acido formico, CO_2 e H_2 ; batteri omoacetogeni che sintetizzano acetato partendo da anidride carbonica e idrogeno; batteri metanigeni, distinti in due gruppi: i) quelli che producono metano ed anidride carbonica da acido acetico, detti acetoclastici; ii) quelli che producono metano partendo da anidride carbonica e idrogeno, detti idrogenotrofi.

Il processo di fermentazione anaerobica avviene in ambiente liquido e può essere quindi schematizzato nei seguenti quattro stadi.

- *Idrolisi*: degradazione delle macromolecole organiche in molecole semplici (fino a monomeri).
- *Fermentazione (acidogenesi)*: trasformazione delle molecole semplici in etanolo.
- *Acetogenesi*: trasformazione degli alcoli e degli acidi grassi volatili in acetati, idrogeno e anidride carbonica.
- *Metanogenesi*: trasformazione degli acetati, idrogeno e anidride carbonica in metano.
- *Riduzione dell'anidride carbonica*: secondo la reazione $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.
- *Decarbossilazione dell'acido acetico*: secondo la reazione $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{CO}_3$.

Nel processo di produzione del biogas possono essere distinte tre differenti fasi.

- *Fase aerobica*: i batteri utilizzano l'ossigeno disponibile (disciolto o dell'atmosfera interna al digestore) per crescere e moltiplicarsi; in questa fase l'energia liberata dalle intense attività microbiche innalza la temperatura della massa fino a 50-70 °C, il pH diviene leggermente acido fino a valori di 6, l'anidride carbonica presente aumenta, la sostanza organica inizia ad essere degradata, il carico organico carbonioso (COD) è elevato.
- *Fase anaerobica facoltativa*: quando l'ossigeno è finito i batteri utilizzano l'ossigeno legato alle molecole organiche; in questa fase si produce ulteriore anidride carbonica, una grande quantità di acidi organici e poca energia termica, il pH è compreso fra 5,5 e 6,5.
- *Fase anaerobica metanigena*: rappresenta lo stadio finale della degradazione della sostanza organica durante il quale i batteri convertono le molecole organiche in metano e anidride carbonica.

I fattori che intervengono nel processo di digestione anaerobica e che consentono di controllarne l'efficienza sono molteplici: composizione chimica della biomassa, omogeneizzazione della massa, carico, grado di umidità, disponibilità di sostanze nutritive, capacità tampone, grado di umidità, temperatura, tempo di ritenzione ecc.

Il biogas essendo insolubile nella biomassa si libera dal sistema, nella parte atmosferica del digestore e può essere raccolto.

2.4.2 Impianti per la produzione di biogas

Gli impianti per la produzione di biogas sono essenzialmente costituiti da:

- sistema di alimentazione, per convogliare la biomassa nel digestore (l'alimentazione può partire un serbatoio di pretrattamento al digestore);
- digestore (vasca o serbatoio chiusi ermeticamente per far svolgere la fermentazione anaerobica);
- sistema di riscaldamento e miscelatori per riscaldare ed omogeneizzare la massa all'interno del digestore;
- sistema di trattamento del biogas per la filtrazione, la deumidificazione, la desolfurazione e, nel caso di biometano, sistema per l'eliminazione dell'anidride carbonica *upgrading* (rimozione della CO₂);
- serbatoio di stoccaggio del digestato.

A seconda dei gruppi batterici impiegati possiamo distinguere i sistemi mesofili (ottimo di temperatura fra 30 e 40 °C) e termofili (ottimo di temperatura fra 40 e 55 °C).

Per quanto riguarda l'umidità della biomassa possiamo distinguere due tecniche di digestione anaerobica, la digestione a secco (*dry digestion*) quando il contenuto in sostanza secca della biomassa è superiore al 20% (letame, FORSU) e digestione a umido (*wet digestion*), che è la più diffusa, quando il contenuto in sostanza secca è inferiore al 10%.

I digestori possono essere monostadio o bistadio. Nel primo caso le differenti fasi in cui si sviluppa il processo di degradazione anaerobica avvengono all'interno dello stesso digestore, mentre nel secondo la fase di idrolisi e acido genesi avviene all'interno di un primo comparto, mentre la successiva fase di metanizzazione avviene in un secondo comparto.

La biomassa utilizzata può essere di differenti matrici (scarti dell'industria alimentare, deiezioni animali, FORSU, colture dedicate ecc.). Sostanzialmente la resa in biogas è condizionata dalla quantità e dalla tipologia di carboidrati, proteine e lipidi contenuti nelle matrici di partenza. Tradizionalmente in agricoltura questa era rappresentata dagli effluenti zootecnici, ma sempre più questi sono stati integrati con biomasse coltivate (mais ceroso, triticale, sorgo ecc.) che hanno consentito di aumentare l'efficienza dell'impianto.

Il biogas prodotto può poi essere impiegato, previo trattamento di filtrazione, deumidificazione, desolfurazione e deidrogenazione, per la cogenerazione termoelettrica attraverso l'impiego di differenti tecnologie quali turbine, motori endotermici o a combustione esterna.

Altresì può essere ulteriormente epurato dell'anidride carbonica fino a raggiungere concentrazioni del 96-98% ed essere immesso in rete come biometano.

Il digestato può poi essere impiegato come fertilizzante con il limite del contenuto di azoto che è sottoposto a direttiva di regolamentazione. Per questo spesso viene eseguito un trattamento di separazione solido-liquido che consente di diminuire i volumi di stoccaggio e di ottenere prodotti di più facile gestione. Il liquido viene impiegato per la fertilizzazione mentre il solido costituisce un ammendante organico appetibile nel mercato e che può quindi diminuire il carico di azoto aziendale.

3. I biocombustibili di seconda generazione: la produzione di bioetanolo da biomasse lignocellulosiche

Nicoletta Nassi o di Nasso

Il bioetanolo è ad oggi il più importante biocarburante impiegato nel trasporto a scala mondiale. In alcuni stati degli USA la miscelazione della benzina con etanolo avviene per legge in ragione del 10% (E10). In Brasile, dove l'utilizzo dell'etanolo per l'autotrazione ha una lunga tradizione, la miscelazione odierna è pari al 25% etanolo e 75% benzina (E25). Inoltre, da fine 2010, circa 12 milioni di autovetture e circa cinquecentomila motocicli brasiliani sono in grado di utilizzare bioetanolo puro (E100), grazie a motori *flex-fuel*. Gli utilizzi possibili, oltre a quello come carburante, sono legati alla produzione dell'antidetonante etilterbutiletere (ETBE) che ha sostituito il piombo tetraetile e di altri prodotti chimici.

La produzione di bioetanolo partendo da biomasse ad alto contenuto di zuccheri è ampiamente collaudata (bioetanolo di prima generazione); essa richiede quattro passaggi tecnologici comuni (fig. 5).

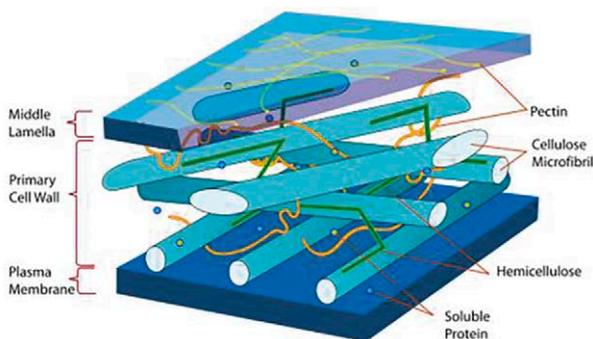
Figura 5 – Produzione di etanolo a partire da materiali zuccherini e amidacei.



Al momento il mondo della ricerca e dell'industria sta concentrando il suo interesse verso i cosiddetti biocarburanti di seconda generazione. Data la notevole volatilità del prezzo delle materie prime, le biomasse lignocellulosiche potrebbero infatti rivelarsi un materiale abbondante e poco costoso.

La composizione chimica dei materiali lignocellulosici è un fattore chiave nel determinare l'efficienza del processo di conversione in combustibile. Come suggerisce il nome, i principali componenti di tali materiali sono rappresentati da cellulosa, emicellulosa e lignina, rappresentanti complessivamente il 90% circa della sostanza secca, con la restante parte composta da estrattivi non azotati e ceneri (fig. 6).

Figura 6 – Composizione di una parete cellulare vegetale.



La cellulosa e l'emicellulosa, componenti principali (2/3) della parete delle cellule vegetali, sono polisaccaridi che possono essere idrolizzati in zuccheri semplici (glucosio, xilosio ecc.) e quindi fermentati in bioetanolo; di contro, la lignina è un polimero aromatico di complessa matrice, non convertibile in etanolo.

Ad oggi, la produzione, tramite microrganismi, di bioetanolo a partire da biomassa lignocellulosica è caratterizzata da tre fasi: pretrattamento, idrolisi e fermentazione (fig. 7). I metodi con cui vengono portati avanti i tre step sono variabili ed alcuni in corso di sperimentazione; i prerequisiti necessari per un corretto processo sono: l'efficiente depolimerizzazione della cellulosa e della emicellulosa in zuccheri solubili, l'efficiente fermentazione del mix di esosi e pentosi originatisi, la minimizzazione della richiesta energetica attraverso l'integrazione dei processi e l'impiego della lignina residua.

Il pretrattamento della biomassa, di durata variabile da qualche minuto a diverse ore, è preceduto da una riduzione della dimensione del materiale da trattare; l'obiettivo primario è quello di incrementarne la dimensione dei pori, di attaccare il reticolo cristallino della cellulosa e di indebolire il legame di questa con la lignina. La sua importanza è quindi evidente, in quanto un efficiente pretrattamento consente la sostanziale riduzione della quantità di enzimi utilizzati nelle successive fasi e pertanto minori costi.

Figura 7 – Processo di conversione della biomassa lignocellulosica in etanolo. [Fonte: Hahn-Hägerdal et al. 2006 modificato]

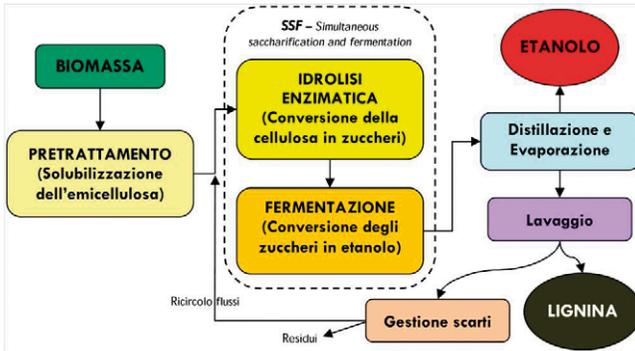
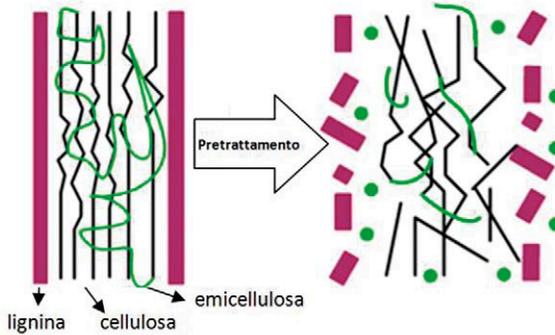


Figura 8 – Effetti del pretrattamento.



Molteplici sono i metodi sperimentati applicati in questo passaggio, modificabili anche in funzione del tipo biomassa impiegata. Si possono suddividere in funzione dei trattamenti effettuati.

- Fisici: prevedono la riduzione per via meccanica del materiale. La richiesta in termini energetici è elevata per legno di latifoglie (circa 130 kWh/t per ridurre le particelle a dimensioni di 1,6 mm), mentre relativamente bassa per materiali erbacei come stocchi di mais ecc. (circa 14 kWh/t per ridurre le particelle a dimensioni di 1,6 mm).
- Fisico-chimici: comprendono numerose tipologie. Tra le più promettenti abbiamo la *steam explosion* che prevede inizialmente un trattamento della biomassa macinata con vapore ad elevata pressione, cui segue un brusco calo di pressione che comporta fondamentalmente un'esplosione del materiale stesso.

Il trattamento della *steam explosion* garantisce una riduzione degli investimenti, un minore impatto ambientale ed un uso più efficiente dell'energia; basti pensare che per ottenere del materiale con le stesse dimensioni, il metodo meccanico richiede il 70% in più dell'energia. Inoltre, aggiunte di acido solforico o anidride carbonica si sono dimostrate in grado di ridurre i tempi di trattamento, le temperature necessarie e la produzione di composti inibenti.

Altri metodi promettenti sembrano essere quelli dell'esplosione sotto ammoniacca (NH_3 -*explosion*) e la cottura ad alte temperature con acidi deboli o diluiti.

- Chimici: comprendono la ozono lisi, reazione in grado di disgregare le emicellulose e parte della lignina e di incrementare la degradabilità della cellulosa; il principale limite è rappresentato dall'elevata quantità di ozono richiesta, aspetto che fa innalzare notevolmente i costi; i trattamenti alcalini (è un processo lungo in fatto di tempi ed economicamente dispendioso), i trattamenti acidi (costi relativamente alti e rischi di corrosione delle strutture).
- Biologici: prevedono l'utilizzo di microrganismi, essenzialmente funghi, in grado di degradare la lignina. Il vantaggio principale di questo tipo di trattamento è la bassa richiesta energetica; di contro la velocità del processo è estremamente ridotta.

A seguito del pretrattamento si origina una sospensione solida contenente lignina e cellulosa ed una fase liquida contenente zuccheri pentosi, derivati dalla emicellulosa, quali xilosio e arabinosio principalmente, e piccole molecole organiche, come acidi organici, furani, composti fenolici e inorganici.

Le successive reazioni vedono quindi l'idrolisi della cellulosa; questa può essere condotta per via chimica, con trattamento acido, o per via enzimatica a mezzo di enzimi specifici (endoglucanasi, esoglucanasi, β -glucosidasi o cellobiasi), la quale consente di ovviare alla formazione di composti inibenti. In effetti, l'idrolisi enzimatica è un processo estremamente selettivo; nonostante la bassa velocità del processo, i costi risultano ugualmente bassi, in virtù del pH subacido, temperature intorno ai 50 °C e assenza di problemi di corrosione.

Generalmente l'idrolisi enzimatica viene condotta in modo simultaneo alla fermentazione degli zuccheri liberati, al fine di evitare l'inibizione di processo delle molecole finali dell'idrolisi; tale passaggio viene definito *simultaneous saccharification fermentation* (SSF) e dura da 3 a 6 giorni circa.

Infine, al termine del processo si rende necessaria una fase di distillazione dell'etanolo prodotto (4-4,5%) che, a causa dell'elevata diluizione, sarebbe inutilizzabile. Sebbene il mondo della ricerca stia dando un grande contributo allo sviluppo di tecnologie sempre più avanzate, come la crea-

zione di batteri (*Escherichia coli*, *Klebsiella oxytoca*) e lieviti (*Saccharomyces cerevisiae*) geneticamente migliorati, ulteriori progressi devono compiersi soprattutto per ciò che riguarda le fasi di pretrattamento e di idrolisi della cellulosa, così come la necessità di disporre di enzimi a prezzi contenuti e di sviluppare microrganismi tolleranti a maggiori percentuali di etanolo.

Le colture dedicate

I. Aspetti generali

Cristiano Tozzini

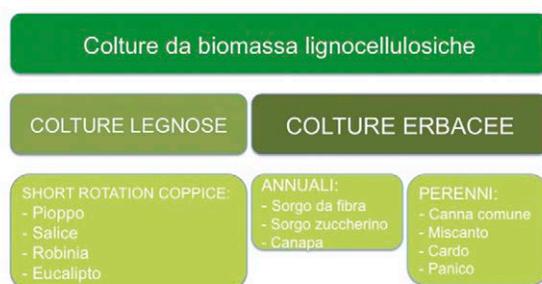
Dagli anni Ottanta alcuni progetti di ricerca europei segnarono l'inizio di una crescente attenzione verso lo studio del possibile utilizzo di biomassa prodotta da colture agrarie come combustibile per la produzione di energia rinnovabile. Da allora, l'interesse complessivo della società, anche a seguito delle rinnovate e sempre maggiori preoccupazioni circa l'auto-sufficienza del mondo occidentale in campo energetico, è cresciuto sia in ambito scientifico che industriale. Il potenziale contributo di queste colture è notevole, poiché offre l'opportunità di utilizzare in modo economico le aree di recente marginalizzazione provenienti dall'abbandono della destinazione agricola.

Le colture dedicate da biomassa lignocellulosica possono essere raggruppate in tre categorie principali dal punto di vista delle caratteristiche del prodotto (fig. 1).

- i. *Short Rotation Coppice* (SFC), ossia piante arboree a rapido accrescimento che, impiantate con un elevato grado di fittezza e gestite con idonee tecniche colturali, sono ceduate e raccolte con turni di taglio assai più frequenti rispetto alle più tradizionali utilizzazioni del prodotto legnoso. Dalle esperienze condotte finora in Italia, emergono come specie particolarmente adatte il pioppo, il salice e la robinia pur manifestando differenti capacità d'adattamento alle condizioni agropedoclimatiche, soprattutto in termini di disponibilità idriche e sensibilità alle basse temperature invernali.
- ii. Colture erbacee poliennali o annuali tra cui sono identificabili come specie particolarmente adatte alle nostre realtà la canna comune e il

miscanto, soprattutto per le aree del centro-nord. Presenta, inoltre, buone potenzialità anche il panico che recentemente sta riscuotendo particolare interesse a livello internazionale. Da segnalare sono anche il cardo la cui adattabilità ai climi caldo-aridi lo rende idoneo alla coltivazione nel sud d'Italia e il sorgo da fibra d'interesse in quanto valido sostituto *no food* del mais da insilato per l'alimentazione degli impianti di biogas.

Figura 1 – Classificazione delle specie da energia in funzione del tipo di biomassa.



Un quadro aggiornato sulla situazione italiana sulla diffusione di queste colture non è molto semplice da stilare, poiché il mercato delle biomasse è ad oggi molto frazionato. Inoltre, una quota difficilmente stimabile è quella destinata al riscaldamento domestico, quindi senza produzione di energia elettrica.

Fra i principali organismi che monitorano l'andamento del mercato in termini di diffusione e produzione dell'energia elettrica ci sono il Gestore dei Servizi Elettrici (GSE), che stila dei report per ogni fonte di energia rinnovabile, e l'Energy & Strategy Group del Politecnico di Milano che censisce gli operatori industriali e commerciale del settore. Inoltre, essendo un mercato molto recente ed in continua evoluzione, è difficile stimare, all'interno della quota ascrivibile alla produzione di energia da biomasse solide, il peso delle colture dedicate.

La coltura che, in questo momento, rappresenta più di altre il concetto di dedicata è senz'altro la SRF di pioppo che però è coltivata al 2011 su circa 10.000 ettari ben al di sotto i 200/250.000 ettari auspicati dal Programma Nazionale Energia Rinnovabile da Biomasse (PNERB) del 1999 per la stessa data. Facendo riferimento alla produzione di biogas, gli impianti che prevedono di alimentare il digestore con materiale lignocellulosico, si ricorre generalmente al mais e in misura crescente ma comunque più contenuta al sorgo zuccherino. Il recente utilizzo di ibridi appositamente studiati per

questa filiera, sia per quel che riguarda il mais che il sorgo, migliorerà il monitoraggio sulla reale diffusione.

L'interesse riservato in campo scientifico alle colture da biomassa a destinazione energetica, a livello nazionale, è oggi alto e coinvolge sia l'anima propriamente agronomica ma anche quella ingegneristica della tecnologia di trasformazione; ne sono la dimostrazione il crescente numero di ricercatori coinvolti su questa tematica e la presenza di centri di ricerca appositamente nati per studiare la problematica da tutti i punti di vista.

Attualmente sono presenti sul territorio nazionale numerosi centri di ricerca che coinvolgono istituzioni universitarie, fra i quali:

- CRB (Centro di ricerca sulle Biomasse dell'Università di Perugia);
- CREAR (Centro Interdipartimentale di Ricerca per le Energie Alternative e Rinnovabili dell'Università di Firenze);
- CETA (Centro di Ecologia Teorica ed Applicata), che vede coinvolte insieme ad altri partner l'Università degli Studi di Trieste e l'Università degli Studi di Udine;
- BIOMASS (Osservatorio permanente sugli usi di biomasse in agricoltura dell'Università Cattolica di Piacenza);
- CRIBE (Centro Ricerche Interuniversitario in Biomasse da Energia fondato dalla Scuola Superiore Sant'Anna e l'Università di Pisa).

La ricerca in quest'ambito non si limita comunque al solo mondo universitario, ma sono presenti anche enti di ricerca quali CNR IVALSÀ, ENEA (Centro di Casacce e Trisaia). Sono presenti inoltre amministrazioni pubbliche, quali il Centro di Eccellenza per le Bioenergie della Regione Basilicata (CEB) e le associazioni di produttori e di categoria come l'Associazione Italiana Energie Agroforestali (AIEL), l'Associazione Produttori di Energia da fonti Rinnovabili (APER), la Federazione Italiana Produttori Energie Rinnovabili (FIPER) e l'Italian Biomass Association (ITABIA) che svolgono attività di informazione e divulgazione, nonché di supporto tecnico e consulenza ai portatori d'interesse di questo settore. A queste vanno aggiunte poi le molteplici aziende private che forniscono consulenza imprenditoriale ma allo stesso tempo si occupano di attività di reportistica e informazione attraverso le principali fiere, convegni e seminari sul tema.

Fino a pochi anni fa, il fattore di maggiore criticità per alcune colture dedicate, riscontrato a livello dell'azienda agricola, era identificato nel livello di meccanizzazione necessario per la loro conduzione agronomica. In alcuni casi era, infatti, richiesto l'utilizzo di macchine difficilmente presenti nelle normali aziende e poco diffuse anche a livello commerciale per rendere economicamente sostenibili alcune delle principali operazioni colturali, quali ad esempio l'impianto e la raccolta. Gli avanzamenti tecnologici del comparto industriale dei mezzi tecnici per l'agricoltura hanno reso di-

sponibili sul mercato alcune attrezzature e macchine specificatamente studiate per queste coltivazioni, con ottime capacità operative sia in termini di tempi per ettaro che di consumi energetici.

Secondo quanto riportato dalla comunità scientifica, i maggiori punti di forza e debolezza delle colture, ascrivibili alle singole specie, sono presentati in tabella 1 dove emergono, da un punto di vista aziendale, le differenze fra le varie specie.

Tabella 1 – Caratteristiche di performance agronomica delle colture a biomassa ligno cellulosa. I simboli +, ++ e +++ indicano rispettivamente una buona, discreta ed ottima rispondenza della coltura. Il simbolo ? indica mancanza di informazioni adeguate a riguardo.

	Resa	Annuale o Perenne	Resistenza malattie	Efficienza uso acqua	Efficienza uso nutrienti	Facilmente meccanizzabile	Non invasività	Qualità biomassa
Sorgo zuccherino/da fibra	+++	A	++	+++	++?	++	++	++
Canapa	++	A	+++	++	++	++	++	++
Miscanto	+++	P	+++	+++	++	+	+++	++
Panico	++	P	++?	+++	+++	++	+++	++
Canna comune	+++	P	+++	++	++	+	+	++
Pioppo	++	P	++	+	++?	++	++	+++
Salice	++	P	++	++	+++	++	++	+++
Eucalipto	++	P	++	++?	+++	++	++	+++

Tuttavia, l'adattabilità di una coltura ad un determinato territorio così come la conseguente sostenibilità dei sistemi colturali che ne può derivare devono essere definite in stretta relazione alle condizioni pedo-climatiche dell'ambiente di studio. Per questo motivo, con lo scopo di esaminare nei dettagli le peculiarità delle singole specie, di seguito sono state predisposte schede specifiche riportanti, oltre alla descrizione botanica delle colture, informazioni in merito alla tecnica colturale e all'organizzazione della filiera energetica facendo riferimento alle attività realizzate in prove di lungo periodo messe a punto nella Toscana litoranea a partire dai primi anni Novanta.

ERBACEE

2. Canna comune (*Arundo donax* L.)

Neri Roncucci, Nicoletta Nassi o Di Nasso

Inglese: *Giant reed*Francese: *Canne de Provence*Tedesco: *Pfahlrohr*

Spagnolo: *Caña común*

2.1 Generalità**Origine e diffusione**

Il genere *Arundo* comprende numerose specie, tutte diffuse nei paesi temperato-caldi e l'areale di origine della canna comune (*A. donax*) risulta ad oggi ancora non del tutto chiarito, in quanto la specie ha avuto una forte ed estesa diffusione in tempi remoti (fig. 2). Mentre le tradizionali testimonianze botaniche evidenziavano l'origine mediterranea di diverse

Figura 2 – Impianto di canna comune al 4° anno di età. San Piero a Grado (PI).



specie afferenti al genere *Arundo* (*A. collina*, *A. mediterranea*), tra cui la stessa canna comune, recenti studi genetici sembrano supportare l'ipotesi di una origine asiatica della canna comune, la quale ha subito una progressiva diffusione verso il Medio Oriente e il Mediterraneo. Oltre alla canna comune è presente sul territorio italiano anche la Canna del Reno (*A. plinii*) che si distingue per il minore sviluppo, per la ligula provvista di peli molto brevi (*A. donax* presenta invece peli più lunghi e vistosi) e per la glumetta inferiore non tridentata all'apice. In territorio extramediterraneo, un'altra specie soprattutto diffusa nei paesi asiatici (Taiwan, Giappone e Filippine) è costituita dalla *A. formosana*.

Essendo già presente in Grecia ed in Italia al tempo dei più importanti antichi poeti e scrittori quali Omero, Teofrasto e Plinio, la canna comune può ritenersi una componente tipica del paesaggio mediterraneo ed italiano, dove si trova diffusa allo stato spontaneo: si rinviene sui cigli stradali e ferroviari, lungo fossi e fiumi. Dall'areale mediterraneo, a seguito di introduzione ad opera dell'uomo, spesso con intenti di salvaguardia dall'erosione, la canna comune si è poi diffusa anche negli Stati Uniti, nel Sud America, in Australia e in Africa, divenendo in molti casi una specie particolarmente invasiva.

Importanza storica

L'utilizzo che se ne è fatto nel corso dei secoli è stato vario: dall'uso nella fabbricazione di strumenti musicali, che può farsi risalire fino a 5000 anni fa, al diffuso impiego per l'allestimento di protezioni naturali (siepi, recinti, graticci ecc.), o come tutore in viticoltura ed orticoltura e per la produzione di oggettistica (cestini ecc.). In Italia, nella prima metà del secolo scorso, è stata realizzata una delle più interessanti esperienze di utilizzo industriale di questa specie allorché, nell'area del basso Friuli in un'estesa zona palustre di recente bonifica, furono impiantati centinaia di ettari, che nel periodo di massima espansione arrivarono a coprirne oltre 5000, per alimentare la fabbrica di cellulosa della città di Torviscosa. Ad oggi, com'è noto, l'interesse per questa specie come coltura industriale sembra rinascere soprattutto per ragioni legate al suo impiego come coltura dedicata ad uso energetico.

Caratteri botanici e morfologia

La canna comune, secondo l'odierna tassonomia, appartiene alla classe delle monocotiledoni (*Liliopsida*), all'ordine delle *Poales*, alla famiglia delle *Graminaceae* altrimenti dette *Poaceae*, tribù *Arundineae*. Il binomio linneano che la identifica è *Arundo donax* L.

Trattasi di una specie erbacea perenne che, a livello spontaneo, si presenta in densi raggruppamenti; questa sviluppa un grosso rizoma, rivestito

nelle parti più giovani da scaglie giallognole che rappresentano le guaine fogliari, da cui si dipartono in modo indistinto da tutta la superficie numerose radici che raggiungono profondità ragguardevoli, nell'ordine di oltre 1,5 metri già all'età di tre anni (fig. 3). La biomassa ipogea complessivamente prodotta da una coltura di un anno di età è recentemente risultata di 13,6 t ha⁻¹ di sostanza secca, con una discreta e relativamente costante densità radicale a profondità da 30 a 120 cm.

Figura 3 – A sinistra: rizomi e radici superficiali in inverno. A destra: piante recise per evidenziare il fusto cavo.



La struttura epigea della pianta è costituita da culmi cavi nella parte internodale e pieni a livello dei nodi, distanti circa 12-30 cm uno dall'altro e di diametro variabile da 1 a 4 cm; questi si originano annualmente dalle gemme del rizoma e raggiungono, in clima mediterraneo, altezze considerevoli, anche oltre i 4 metri in una sola stagione vegetativa, tanto da far ritenere la canna una delle più grandi specie erbacee spontanee dei nostri ambienti. I culmi sono in gran parte rivestiti dalle guaine fogliari che proseguono in lunghe e ampie lamine lanceolate, portate in modo alterno, progressivamente sempre più piccole verso l'apice; solamente le prime due o tre guaine basali restano di dimensioni ridotte.

Le infiorescenze, costituite da vistosi panicoli, sono formate da spighe di fiori sterili che si differenziano in modo molto disomogeneo, anche all'interno dello stesso gruppo di piante (fig. 4). È evidente che in queste condizioni la moltiplicazione della specie avviene per via agamica.

La riproduzione agamica della specie comporta una molto bassa variabilità genetica, come hanno confermato diverse analisi su DNA condotte sia su popolazioni europee (italiane, francesi e greche) che statunitensi ma, ciò nonostante, la sua diffusione in ambienti agropedoclimatici fortemente diversificati tra loro ha consentito lo sviluppo di numerosi ecotipi di canna comune con caratteristiche piuttosto differenti, tali da poter supportare un

eventuale piano di miglioramento genetico. A livello europeo è stato finanziato uno screening di circa 200 popolazioni sud europee, rilevando una notevole variabilità in termini di crescita e produttività.

In riferimento alla ripartizione della biomassa, in generale possiamo affermare che le specie perenni rizomatose sono caratterizzate da un rapporto tra biomassa aerea e biomassa ipogea all'incirca pari a uno. Ciò sembra essere confermato da studi su piante al 9° e 10° anno di età, condotti nella pianura pisana, dai quali emerge una ripartizione della biomassa per circa il 50% nei rizomi, il 15% nelle foglie ed il 35% nei fusti.

Figura 4 – A sinistra: culmo, guaina e lamina fogliare. A destra: infiorescenza (panicolo).



Esigenze ed adattamento ambientale

La canna è in grado di svilupparsi in condizioni pedoclimatiche assai varie ed è caratterizzata da un ritmo di accrescimento decisamente elevato, che le deriva sia dall'alto rendimento fotosintetico che la caratterizza (simile a quello delle specie C4 pur essendo una C3), sia dalla capacità di sfruttare appieno le risorse idriche e nutrizionali disponibili nell'ambiente, sia dall'elevata competitività che è in grado di esprimere nei confronti delle altre specie spontanee.

Per quanto concerne le esigenze termiche della pianta, in letteratura non sono riportate informazioni dettagliate, ma è comunque possibile affermare che per iniziare la fase vegetativa sono richieste temperature superiori ai 12-14 °C e che abbisogna di circa 10 °C per sostenere la crescita. Al riguardo, una recentissima sperimentazione di lungo periodo condotta nell'Italia centrale ha messo in evidenza come per il completo sviluppo della coltura siano necessari valori di somma termica compresi tra 2500 e 3000 °C.

Relativamente alle principali caratteristiche del terreno, la pianta sembra manifestare un'ampia adattabilità; infatti, essa si rinviene sia in suoli poco

permeabili e caratterizzati da ristagni idrici (anche se in questo caso con qualche limitazione dovuta all'instaurarsi di malattie radicali come marciumi e batteriosi), sia in terreni piuttosto aridi e scarsamente dotati di elementi nutritivi. L'ampia valenza ecologica di questa specie fa sì che in letteratura venga indicata sia come mesofita, che idrofita o xerofita, in virtù della propria ricordata notevole adattabilità a condizioni pedoclimatiche estremamente varie; le produzioni migliori di biomassa per unità di superficie si ottengono comunque in terreni freschi, profondi, ben drenati e ricchi di sostanza organica.

Le esigenze nutrizionali della specie sono scarsamente documentate; la letteratura classifica la canna comune come poco esigente dal punto di vista nutrizionale, in relazione al robusto e persistente apparato rizomatoso che facilita il turnover dei nutrienti. Alcuni recenti studi condotti nella Toscana litoranea hanno permesso di verificare asportazioni medie di circa 3-4 kg t⁻¹ s.s. di azoto, 1,5-2,5 kg t⁻¹ s.s. di fosforo e 8-9 kg t⁻¹ s.s. di potassio.

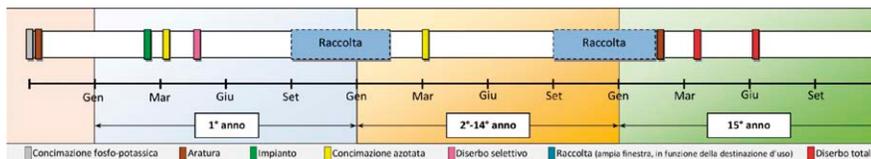
Anche per quanto concerne le esigenze idriche, alcuni recenti studi condotti in Italia hanno messo in luce un modesto consumo di acqua ed una elevata capacità di estrazione della stessa dal suolo, con ciò confermando l'elevata rusticità ed adattabilità della canna comune messa in luce da numerose ricerche che hanno indagato sulla capacità della pianta di sopportare stress di vario genere. La specie è anche apparsa in grado di crescere in ambienti fortemente contaminati da metalli pesanti senza effetti di rilievo sulla produttività, così come sembra possibile utilizzare acque reflue, di scolo o saline per l'irrigazione della coltura.

Tecnica colturale

La lavorazione principale necessaria per una adeguata preparazione del terreno per l'impianto della coltura può consistere o in un'aratura o in una ripuntatura effettuate ad adeguata profondità (almeno 40-45 cm) in modo da garantire un tempestivo allontanamento delle acque in eccesso lungo il profilo del terreno ed un buon approfondimento dell'apparato radicale; il letto di semina va poi preparato per la messa a dimora dei rizomi attraverso una o due lavorazioni secondarie con i normali erpici di vario genere. Qualora le analisi del terreno rilevino una carenza manifesta di fosforo o di potassio e si ritenga indispensabile provvedere alla distribuzione di tali elementi, è opportuno farlo sul terreno sodo, prima della lavorazione principale, in modo da garantire un adeguato approfondimento ed incorporamento degli stessi nello strato di terreno maggiormente occupato dai rizomi e dall'apparato radicale.

La fase di impianto si può considerare come il punto critico della coltivazione in quanto, al momento, essa necessita nel complesso di un investimento finanziario piuttosto elevato; i fattori che possono contribuire a ridurre i costi dell'impianto della coltura sono essenzialmente due: la tipologia di materiale di propagazione e la densità di piante sull'unità di superficie.

Figura 5 – Itinerario tecnico della canna comune.



Materiale di propagazione

La canna comune può essere impiantata tramite rizomi, talee di fusti e piantine micropropagate. Mentre riguardo quest'ultima modalità ancora poco è conosciuto, la propagazione tramite porzioni di rizoma, effettuata a fine inverno-inizio primavera, garantisce livelli di attecchimento sufficientemente elevati, che possono superare valori dell'85%; di contro, il principale limite di questa tecnica è rappresentato dagli elevati costi di estirpazione, di preparazione e di messa a dimora del materiale di propagazione. Per la meccanizzazione di quest'ultima operazione possono essere utilizzate, come anche per il miscanto, le stesse macchine pianta tuberi usate in orticoltura opportunamente modificate, che in un solo passaggio aprono il solco, interrano il rizoma, lo ricoprono e rullano il terreno, per farlo aderire al suolo e favorire così la radicazione e l'attecchimento.

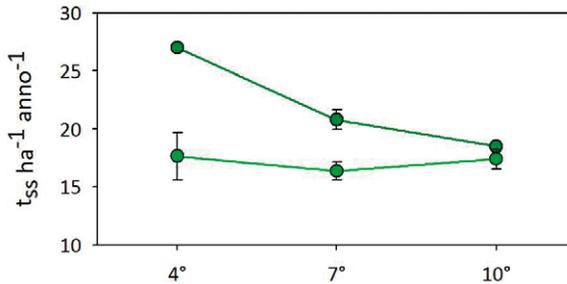
L'impiego di fusti interi, da prelevare alla fine del periodo vegetativo della pianta ed impiantare il più possibile prima delle gelate tardive, non pone particolari problemi per la messa a dimora del materiale; è infatti possibile impiegare le stesse macchine trapiantatrici per la canna da zucchero, che, in un unico passaggio, aprono il solco, interrano i fusti, li ricoprono e li rullano. La bibliografia sembra tuttavia indicare percentuali di attecchimento piuttosto basse o comunque non in grado di formare piantagioni sufficientemente dense.

Densità di impianto

Nell'impianto della coltura, considerando il relativamente alto costo del materiale e della messa a dimora, è senz'altro opportuno cercare di limitare per quanto possibile le densità iniziali di impianto; del resto, sperimentazioni di lungo periodo condotte nella pianura pisana hanno evidenziato una maggiore produttività ed efficienza in impianti con densità iniziali di 20000 piante ha⁻¹ rispetto a investimenti superiori e, in Grecia, densità di 12500 piante ha⁻¹ (100x80 cm), non hanno fatto osservare riduzioni di produttività della coltura; ciò conferma la nota capacità della specie di recuperare un eventuale basso investimento iniziale con la progressiva espansione dei rizomi negli anni successivi a quello di impianto.

Circa l'effetto della concimazione, appare confermato come la distribuzione di N-P-K incrementi la produttività della coltura soprattutto nei primi anni d'impianto, ma è anche vero che tali effetti tendono ad attenuarsi con il sopraggiungere della maturità delle piante (fig. 6).

Figura 6 – Produzione di impianti maturi di canna comune concimati ($200\text{-}80\text{-}200\text{ kg ha}^{-1}$ N-P-K) (verde scuro) e non concimati ($0\text{-}0\text{-}0\text{ kg ha}^{-1}$ N-P-K) (verde chiaro). [Fonte: Nasso o Di Nasso et al. 2010 modificato]



Al momento si ritiene comunque razionale procedere alla concimazione minerale solo in termini di restituzione al terreno delle asportazioni effettivamente operate dalla coltura, sulla base del contenuto in nutrienti della biomassa prodotta dalla stessa e tenuto conto delle foglie che ritornano al terreno e della dotazione del terreno in elementi nutritivi (fig. 7); orientativamente è possibile consigliare apporti iniziali di circa $80\text{-}90\text{ kg ha}^{-1}$ di azoto, $30\text{-}40\text{ kg ha}^{-1}$ di fosforo e $150\text{-}180\text{ kg ha}^{-1}$ di potassio, con valori più bassi per rese di circa $20\text{ t}_{s.s.}\text{ ha}^{-1}$ e quelli più alti per rese intorno alle $30\text{ t}_{s.s.}\text{ ha}^{-1}$.

Figura 7 – Lettiera di foglie in canna comune.



In virtù del rapido accrescimento e della notevole copertura del suolo, la coltura non necessita di particolari interventi per il controllo della flora infestante; solamente nell'anno di impianto è opportuno prestare attenzione allo sviluppo delle malerbe, intervenendo eventualmente 'in pre-impianto' con erbicidi non residuali e/o in post-emergenza precoce con sarchiature meccaniche.

In ambiente mediterraneo non sussistono particolari problemi legati a fitofagi o a crittogame e, ad oggi, di norma, non risulta necessario alcun controllo.

Raccolta

La raccolta è annuale e ricade in un ampio periodo di tempo, che va da dicembre a marzo, a partire da quando il colore delle foglie vira da verde intenso a giallo-verde; pur non essendo ancora del tutto chiari i meccanismi ed i tempi della traslocazione degli elementi minerali dalla parte aerea ai rizomi e l'entità dell'influenza del periodo di raccolta sul contenuto in ceneri della biomassa epigea ottenuta, appare evidente che quanto più viene ritardata la raccolta tanto minore è il contenuto in umidità dei fusti (intorno al 50%) ma, contemporaneamente, con il procedere della stagione invernale si assiste ad una perdita di biomassa (5-10%) imputabile alla caduta di foglie (fig. 8). La scelta del periodo di raccolta e delle successive fasi di stoccaggio e conservazione è comunque funzione anche della destinazione d'uso della biomassa ed è possibile ipotizzare molteplici periodi di raccolta, a seconda di come il rapporto tra quantità e qualità della biomassa evolve nel tempo. Al riguardo si ricorda altresì che non sono state osservate differenze significative nel contenuto in cellulosa, emicellulosa e lignina in epoche di raccolta differenti.

Figura 8 – Prodotto idoneo per la raccolta. Fine inverno a Cesa (AR).



Per la meccanizzazione della raccolta sono state sperimentate con successo delle falcia-trincia-caricatrici con testate universali già impiegate per

colture da insilato e successivo stoccaggio in cumuli del materiale tal quale, con conseguente naturale perdita di acqua (fig. 9). Gli svantaggi del cantiere sono costituiti soprattutto dalla bassa densità (circa $80 \text{ kg s.s. m}^{-3}$) del materiale e dall'alta percentuale di umidità, che comportano un discreto innalzamento dei costi di trasporto; questa ipotesi di cantiere presenta tuttavia il vantaggio di poter intervenire, rispetto allo stato di maturità della coltura, in qualunque momento dell'anno non essendo legata all'essiccamento del prodotto. Un altro cantiere ipotizzabile si basa sull'imbballatura in campo del prodotto precedentemente trinciato ed essiccato; questo avviene in più fasi e su piante di dimensioni elevate e pur richiedendo attrezzature specifiche (vedi fig. 9) consente di innalzare la massa volumica del materiale raccolto a valori di circa $140\text{-}170 \text{ kg m}^{-3}$.

Figura 9 – Cantiere di trincia-andanatura e rotoimbballatura di canna comune.



Produttività

Nel corso degli ultimi anni, numerose sono le ricerche che sono state condotte in diversi paesi europei per valutare la potenzialità produttiva della canna comune ed i risultati ottenuti sono stati evidentemente abbastanza diversificati nei differenti ambienti pedoclimatici in cui si è operato: se in alcuni casi – in clima temperato e/o con sufficiente apporto idrico – la produttività stimata per gli anni successivi al primo si aggira intorno alle $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di sostanza fresca, in altri casi la produzione – in ambiente più mediterraneo e in sperimentazioni parcellari con ricorso all'ir-

rigazione – è stata mediamente, nei primi quattro anni dall’impianto, pari a 26 t ha^{-1} di sostanza secca con alta variabilità delle rese; rese medie di oltre $30 \text{ t s.s. ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ sono state riportate da altri autori, sempre in ambienti sud europei. Anche nel nostro paese le sperimentazioni condotte al fine di valutare i migliori cloni esistenti a livello locale e per stimare le risposte della coltura a condizioni agro-ambientali diversificate hanno spesso condotto a rese altrettanto elevate, superiori le $30 \text{ t di s.s. ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$) (figg. 10-11).

Figura 10 – Produttività di canna comune di lungo periodo in Toscana litoranea. Densità impianto: $20000 \text{ piante ha}^{-1}$; Concimazione: 100 kg ha^{-1} di N, P e K. [Fonte: Angelini et al. 2009 modificato]

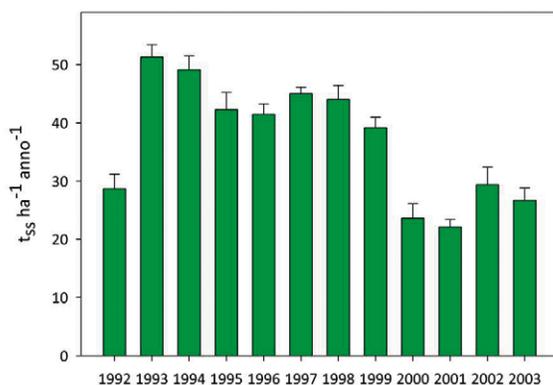
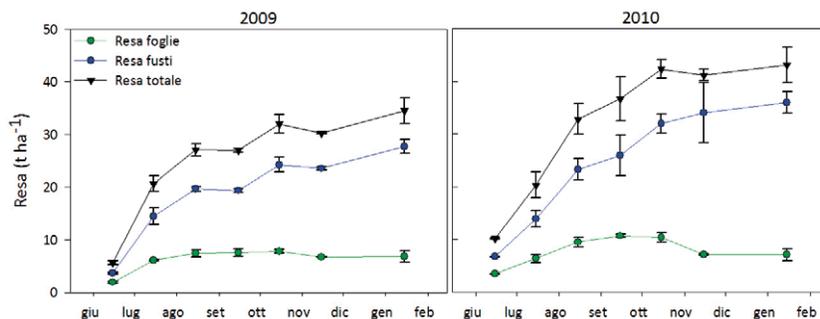


Figura 11 – Ripartizione della produttività di canna comune registrata nel 2009 e 2010 nella pianura pisana. Piante al 7° e 8° anno; concimazione 100-100-100 N-P-K. [Fonte: Nasso o Di Nasso et al. 2011]



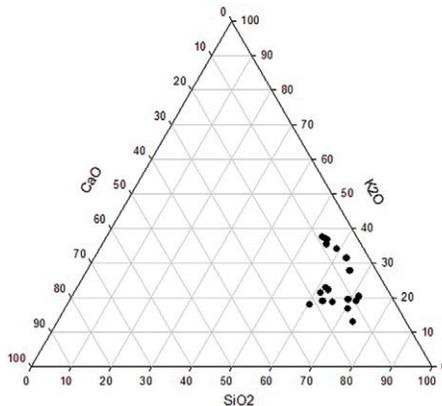
Usi e qualità della biomassa

È già stato sottolineato come la scelta del periodo di raccolta possa dipendere anche dalla destinazione della biomassa in relazione alla filiera che è destinata ad alimentare; ogni tipologia di conversione energetica richiede infatti una biomassa con determinate specifiche caratteristiche: per i processi termochimici (combustione, pirolisi, gassificazione) è preferibile un prodotto caratterizzato da elevato rapporto C/N (> 30), elevato contenuto in lignina e bassa umidità ($< 30\%$), mentre per quelli biologici (fermentazione alcolica, digestione anaerobica) è più apprezzata una biomassa con basso rapporto C/N (< 30), basso contenuto in lignina ed umidità più elevata ($> 30\%$).

In termini di energia associata alla biomassa, la canna comune presenta un potere calorifico variabile da 16,7 a 18 MJ kg^{-1} di sostanza secca; ai fini dello sfruttamento per la combustione il contenuto in ceneri risulta piuttosto elevato (tra il 4,8 e il 7,4%).

Inoltre, è importante valutare anche il contenuto in silice, potassio e calcio, e in particolare il rapporto tra $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ e $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ che dovrebbe risultare il più alto possibile per ridurre fenomeni di incrostazione. Studi di lungo periodo condotti nella pianura pisana hanno messo in luce come tali rapporti risultino influenzati sia dalla concimazione che dall'epoca di raccolta e dall'età della coltura. Tuttavia le concentrazioni relativamente elevate di silice lasciano supporre come processi alternativi alla combustione possano risultare migliori per questo tipo di biomassa (fig. 12).

Figura 12 – Distribuzione relativa dei principali ossidi inorganici. [Fonte: rielaborazione da Nassi o Di Nasso et al. 2010]



Di fatto, la produzione di bioetanolo dalla fermentazione di biomasse lignocellulosiche (cosiddetto di II generazione) sta riscuotendo un notevole interesse sia da parte del mondo della ricerca che nel mondo dell'industria

dei biocarburanti; in questo caso la biomassa deve essere adeguatamente caratterizzata in termini di macromolecole organiche direttamente convertibili in etanolo (cellulosa ed emicellulosa) e della frazione inattaccabile dalla popolazione batterica (la lignina) che diviene un prodotto residuale del processo di conversione. Nella canna comune i valori di cui sopra si aggirano intorno al 30-40 e 25-30% rispettivamente per cellulosa ed emicellulosa ed al 10-20% per la lignina e appaiono simili per foglie e fusti. Pertanto sembra verosimile destinare tale coltura alla produzione di bioetanolo di seconda generazione. Ancora in fase di sperimentazione risulta invece la possibilità di procedere, analogamente a quanto viene ad oggi fatto con mais e/o sorgo, ad un insilamento e successiva digestione anaerobica per la produzione di biometano.

3. Miscanto (*Miscanthus × giganteus* Greef et Deuter)

Neri Roncucci, Nicoletta Nassi o Di Nasso

Inglese: *Miscanthus giganteus*

Francese: *Miscanthus géant*

Tedesco: *Riesen-Chinaschilf*

Spagnolo *Miscanthus giganteus*

3.1 Generalità

Origine e diffusione

Il genere *Miscanthus* comprende circa una ventina di specie. La maggior parte di queste specie risulta nativa del Sud-Est asiatico; tuttavia sono conosciute due specie originarie dell'area himalayana e quattro del continente africano (Hodkinson *et al.* 2002) (fig. 13).

Nell'ambito del genere *Miscanthus* le specie che possono essere ricordate per la loro rilevanza in ambito scientifico ed applicativo sono il *M. sinensis*, il *M. sacchariflorus* e l'ibrido *M. × giganteus*. Il *Miscanthus sinensis* risulta la specie più conosciuta in occidente ed è stato importato dal Giappone negli anni Trenta per fini ornamentali. Questa specie è diploide e si caratterizza per il rizoma cespitoso, i culmi assai sottili, progressivamente emessi durante l'intera stagione vegetativa, una buona resistenza al freddo e per il lungo periodo di fioritura.

La seconda specie, il *M. sacchariflorus*, è tetraploide e si adattata ad ambienti più caldi; essa presenta un rizoma strisciante e fusti di maggior diametro, che per l'80% circa si sviluppano in primavera.

L'ibrido *Miscanthus × giganteus*, frutto dell'incrocio tra le due specie sopra citate, è triploide e pertanto sterile; trattasi del genotipo maggiormente studiato come coltura dedicata ad uso energetico soprattutto in virtù delle sue caratteristiche di vigore e di potenzialità produttiva (fig. 14).

Figura 13 – Distribuzione del genere *Miscanthus*. [Fonte: Hodkinson et al. 2002 modificato]

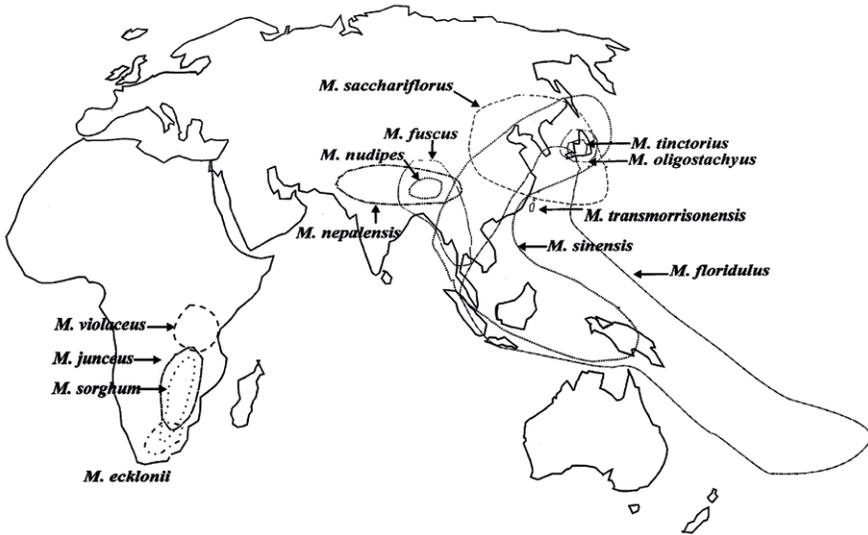


Figura 14 – Impianto di *Miscanthus x giganteus* al 4° anno di età. San Piero a Grado (PI).



Caratteri botanici e morfologia

Il miscanto appartiene alla classe delle monocotiledoni (*Liliopsida*), ordine *Poales*, famiglia delle *Graminaceae*, tribù *Andropogonaceae*. Trattasi di una specie erbacea perenne caratterizzata da un apparato radicale rizomatoso simile, sebbene di dimensioni leggermente inferiori, a quello della canna comune; sempre nuovi rizomi si sviluppano annualmente e l'intreccio che

questi creano nei primi 30 cm del suolo aumenta nel corso degli anni; oltre il 90% della biomassa ipogea complessiva è compresa nei primi 35 cm di suolo anche se le radici propriamente dette, che a loro volta hanno origine dai rizomi, raggiungono profondità maggiori. In letteratura sembra emergere come la durata media (*turnover*) del rizoma di miscanto sia di circa 4 anni, ovvero il 25% della biomassa ipogea viene decomposto annualmente. Tuttavia risulta ancora da chiarire se vi sia o meno un ricambio del rizoma nei primi anni della coltura; alcuni autori suggeriscono infatti come non vi sia alcun turnover fino agli 8 anni dall'impianto.

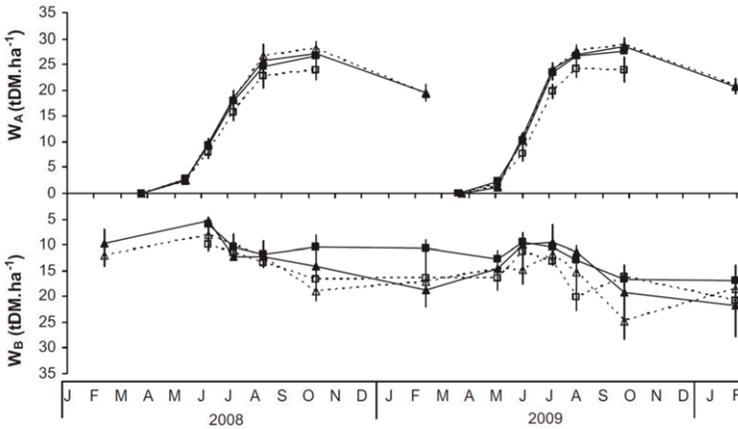
L'apparato epigeo è caratterizzato da lunghi (anche oltre 4 m) e sottili fusti pieni, ispessiti a livello dei nodi, dai quali si dipartono, in modo alternato, le foglie, le cui guaine avvolgono totalmente i fusti; i lembi fogliari risultano rigidi e scabri, piuttosto lunghi (50-80 cm) e larghi circa 1-2 cm; l'infiorescenza è un panicolo spargolo con asse lungo e ramificato. Come nella canna comune, anche nel miscanto il rapporto tra il peso della porzione epigea e quello della massa ipogea della pianta si avvicina a uno (fig. 15).

Figura 15 – A sinistra: porzione basale dei fusti di miscanto. A destra: infiorescenza.



In figura 16 si riporta lo sviluppo della biomassa aerea (*shoot*) e dei rizomi (*rhizome*) durante l'anno; appare evidente come l'andamento della prima sia caratterizzato da un iniziale aumento (dall'emergenza fino a fine settembre), cui segue una diminuzione della stessa, per lo più imputabile alla caduta delle foglie. Di contro, l'andamento ponderale della biomassa ipogea nel corso di un anno evidenzia un calo di questa dalla ripresa vegetativa primaverile fino ad agosto, per poi stabilizzarsi su valori simili a quelli della porzione aerea in inverno.

Figura 16 – Peso secco ($t\ ha^{-1}$) della porzione epigeica ed ipogeica in *Miscanthus* al terzo e quarto anno di crescita. Le linee tratteggiate rappresentano tesi non concimate ($0-0-0\ kg\ ha^{-1}\ N-P-K$), mentre le linee continue tesi concimate ($120-0-0\ kg\ ha^{-1}\ N-P-K$). [Fonte: Strullu et al. 2011]



Esigenze ed adattamento ambientale

Il miscanto è una specie a metabolismo C4 e quindi in linea di massima caratterizzata, in mancanza di altri fattori limitanti, da alta efficienza d'uso della radiazione, dell'acqua e dei nutrienti; in letteratura si riportano valori della temperatura basale (zero di vegetazione) pari a circa $10\ ^\circ C$, che permettono alla pianta di completare il suo ciclo di sviluppo dopo aver accumulato dai 1500 ai $2000\ ^\circ C$ circa (somma termica).

Per quanto concerne la sua resistenza al freddo, le giovani piantine (ed anche i rizomi) possono subire danni con temperature del suolo inferiori a $-3\ ^\circ C$ soprattutto nell'inverno successivo all'impianto; e ciò sia per l'ancora modesto approfondimento dell'apparato radicale sia per l'assenza dell'effetto pacciamente garantito dalle foglie cadute. Negli anni successivi al primo la tolleranza della coltura alle basse temperature diviene progressivamente più elevata.

Il miscanto non ha particolari esigenze in fatto di granulometria del terreno; problemi di sufficiente attecchimento della coltura possono insorgere all'impianto in terreni decisamente argillosi e scarsamente strutturati anche se, nel lungo periodo, è proprio su questi tipi di suolo che, in virtù della loro più elevata capacità di ritenzione idrica, si possono ottenere le rese maggiori. In effetti, la disponibilità di acqua nel terreno sembra costituire un prerequisito essenziale per ottenere dal miscanto rese elevate anche in ambienti mediterranei, caratterizzati, com'è noto, da un'alta radiazione solare incidente e da elevate temperature.

Per quanto concerne le esigenze nutrizionali, la letteratura specifica riporta di asportazioni medie annue orientative nell'ordine di 2-5, 0,3-1,1 e 0,8-1,0 kg t_{ss}⁻¹ rispettivamente per N, P e K; anche alcune esperienze direttamente condotte in Toscana sembrano confermare una richiesta di azoto e fosforo (in kg per tonnellata di sostanza secca) rispettivamente di circa 2,5 e 1,1. Per il potassio sono state registrate asportazioni più elevate (5,6 kg t_{ss}⁻¹) probabilmente ascrivibili ad una elevata dotazione di tale elemento nel terreno che, a sua volta, ha comportato un consumo di lusso.

Tecnica colturale

L'itinerario tecnico da seguire per la preparazione del terreno per l'impianto della coltura ricalca sostanzialmente le tecniche già indicate per la canna comune: una lavorazione principale (aratura o ripuntatura) a media profondità, seguita da una o più lavorazioni complementari per affinare il terreno e controllare la flora infestante.

L'impianto della coltura dovrebbe essere effettuato in primavera, orientativamente tra marzo e aprile, cercando di anticipare il più possibile il momento di intervento ma evitando, nel contempo, il rischio di incorrere in gelate tardive; infatti, quanto più si riesce ad allungare il periodo vegetativo del primo anno e tanto più robusta e resistente sarà la pianta nei confronti dei primi freddi invernali (tab. 2).

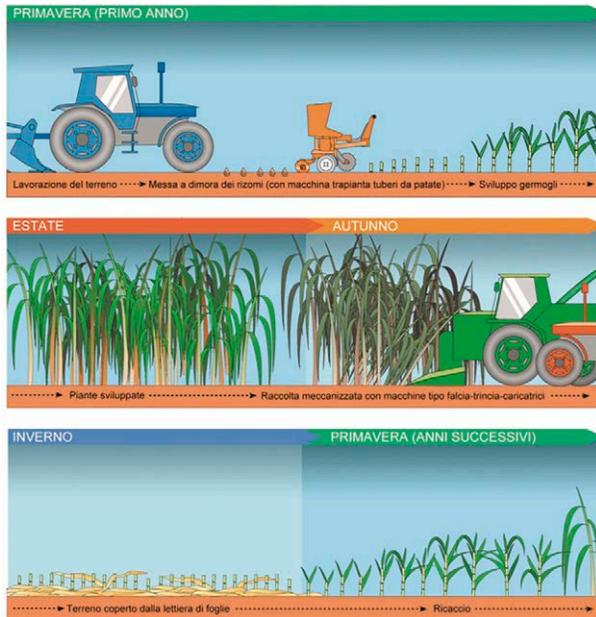
Ad oggi, il materiale di propagazione a cui si può ricorrere è rappresentato da porzioni di rizoma o da piantine micropropagate. I rizomi si ottengono in inverno da piante madri di almeno tre anni; ciascuna porzione deve contenere almeno 2-3 gemme. Il materiale deve poi essere conservato in condizioni controllate (bassa temperatura e buona umidità) fino al momento dell'utilizzo. La densità di piantagione ritenuta sufficiente, anche al fine di mantenere relativamente basse i costi per il materiale di propagazione, ed è di circa 20000 piante ha⁻¹ (2 piante m⁻²); in seguito, analogamente a quanto avviene per la canna comune, grazie alla diffusione spontanea dei rizomi, la pianta riesce a riempire gli spazi vuoti, raggiungendo densità superiori ai 40 fusti m⁻².

Tabella 2 – Percentuale di attecchimento in funzione della durata e della temperatura di conservazione dei rizomi. [Fonte: Caslin et al. 2011]

Durata stoccaggio (settimane)	Modalità di stoccaggio	
	Temperatura ambiente	Refrigerazione (3-5 °C)
0	94%	94%
2	67%	94%
4	17%	72%
6	6%	89%

Analogamente a quanto avviene per la canna comune, per la meccanizzazione dell'impianto di rizomi di miscanto possono essere impiegate trapiantatrici da tuberi comunemente usate per le patate; nell'ipotesi che vengano impiegate piantine micropropagate, si possono utilizzare le ordinarie macchine trapiantatrici per piante a radice nuda. In generale la messa a dimora dei rizomi sembra in grado di garantire minori costi di impianto, in quanto, ad oggi, elevato è il costo del materiale micro propagato (fig. 17).

Figura 17 – Itinerario tecnico del miscanto.



In ambienti semi-aridi è sovente suggerito di procedere ad una irrigazione dopo il trapianto, in modo da favorire l'attecchimento. In effetti, la disponibilità di acqua nel terreno esercita senz'altro un ruolo importante non solo nella fase di attecchimento, ma anche nella produttività effettiva della coltura; la dotazione idrica, infatti, soprattutto con l'avanzare della stagione estiva, influenza positivamente sia l'indice di area fogliare (LAI) che l'altezza della pianta. Del resto, anche l'elevata presenza di radici superficiali sembra corroborare l'ipotesi, già avanzata da numerosi autori, per cui – contrariamente alla canna comune – la coltura necessita di condizioni idriche favorevoli per raggiungere rese soddisfacenti. L'irrigazione della coltura, in condizioni ambientali limitanti, costituisce quindi un fattore di non poca rilevanza che, in funzione del livello di concimazione azotata, può consentire un incremento delle rese dal 25 ad oltre l'80%.

L'effetto del livello di concimazione azotata sulla produzione areica di sostanza secca della coltura sembra dipendere da numerosi fattori: la disponibilità di azoto totale nel terreno (e dalla sua mineralizzazione), dall'andamento termopluviometrico stagionale e dall'età della coltura. In una sperimentazione recentemente condotta in Germania, in assenza di apporti irrigui (precipitazioni medie di 754,5 mm ma assai ben distribuite), la risposta alla fertilizzazione azotata ha dato risultati positivi fino a dosi di 110 kg N ha⁻¹, per poi diminuire progressivamente. Di contro, ulteriori ricerche condotte in Italia hanno messo in evidenza, così come già emerso per la canna comune, lo stretto legame esistente tra la disponibilità di acqua e quella di azoto: in assenza di fertilizzazione azotata, il ricorso all'irrigazione non comporta significativi incrementi della produzione, mentre l'effetto dell'irrigazione viene notevolmente amplificato dall'incremento del livello di azoto disponibile per la pianta.

Dal punto di vista pratico, anche per questa coltura, la stesura di un adeguato piano di concimazione può essere realizzata sulla base delle asportazioni medie annuali tenuto conto dei nutrienti che tornano al suolo per la caduta delle foglie (fig. 18) e della grande quantità di nutrienti stagionalmente traslocati dall'apparato aereo ai rizomi in autunno (stimabili nel 20-40% per l'azoto, 30-50% per il fosforo e 15-30% per il potassio) e viceversa in primavera. Ricerche condotte nella pianura pisana evidenziano asportazioni effettive pari a circa 50-60 kg ha⁻¹ per l'azoto, 20-25 kg ha⁻¹ per il fosforo e 80-100 kg ha⁻¹ per il potassio.

Figura 18 – Lettiera di foglie in miscanto in pieno inverno.



Il miscanto, così come la canna comune, ha dimostrato di essere una coltura caratterizzata da una buona competitività nei confronti della flora spontanea; infatti, pur giovandosi di eventuali interventi di controllo meccanico delle malerbe nelle prime fasi dell'impianto e dell'insediamento della coltura, essa riesce a coprire rapidamente il terreno ostacolando lo sviluppo delle infestanti, sia attraverso la rapida espansione dell'apparato radicale che per la cospicua pacciamatura realizzata per la caduta delle foglie. Quest'ultima può anche garantire notevoli vantaggi ambientali, in termini di riduzione dei fenomeni di erosione, mantenimento dell'umidità e della fertilità del terreno.

Sulla coltura di miscanto i danni causati da fitofagi o da malattie crittogamiche sono estremamente rari, tanto che di norma non si giustificano interventi fitosanitari.

Raccolta

La raccolta della coltura avviene annualmente e la programmazione della scelta dell'epoca di esecuzione non può prescindere dal considerare con la dovuta attenzione fattori quali l'ordinaria distribuzione delle piogge, la disponibilità e la capacità di lavoro di attrezzature idonee e l'uso che si intende fare della biomassa prodotta.

Appare evidente come la raccolta nel periodo autunnale comporti spesso l'ottenimento di un prodotto umido (oltre il 50%) che poco si addice all'impiego diretto in caldaia o ad altre trasformazioni termochimiche ma che lascia aperta la possibilità di utilizzare tale biomassa per trasformazioni biologiche (fermentazione alcolica e/o digestione anaerobica).

Di contro, operare la raccolta meccanica a fine inverno, nonostante determini spesso una diminuzione della resa media in biomassa secca intorno al 20%, permette di far raggiungere al prodotto in campo un'umidità pressoché ottimale (15-20%) per una sua conservazione e per un suo uso diretto in caldaia (fig. 19). A ciò si aggiungono anche delle caratteristiche qualitative migliori, essenzialmente ascrivibili al minor contenuto in ceneri conseguente alla perdita delle foglie ed alla lisciviazione da parte delle piogge.

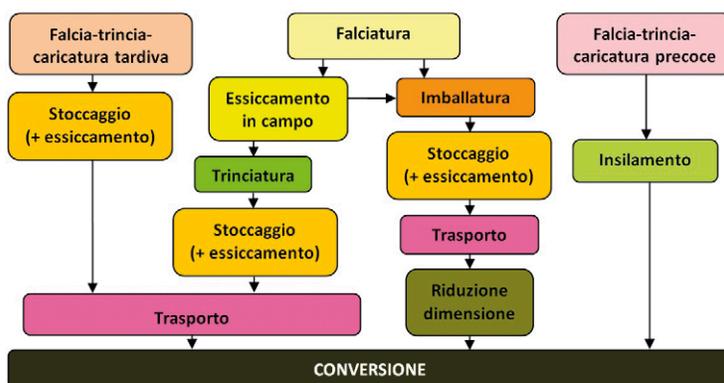
La raccolta della coltura del miscanto è ormai completamente meccanizzata e può essere eseguita con le stesse attrezzature già descritte per la canna comune (fig. 20). Per la raccolta in più fasi si può utilizzare una comune falciatrice, eventualmente seguita da ranghinatura, e successiva imballatura; per la raccolta in un unico passaggio si possono invece impiegare le comuni falcia-trincia-caricatrici da mais. Lo stoccaggio del materiale, sia imballato che trinciato, può essere realizzato con diverse tecniche: quello sotto tettoia garantisce evidentemente la maggiore protezione degli agenti atmosferici. Per aziende che non possono disporre di ricoveri idonei (per motivi economici o di spazio) un buon compromesso è rappresentato dall'impiego di teli di plastica. Vale anche la pena sottolineare come,

ad oggi, sono in fase di sperimentazione tecniche di conservazione alternative, adatte allo stoccaggio di un prodotto 'umido', come ad esempio l'insilamento.

Figura 19 – Coltura idonea alla raccolta invernale; si noti la quasi totale assenza di foglie.



Figura 20 – Cantieri di raccolta e stoccaggio del miscanto.



Produttività

In bibliografia si riportano rese del miscanto in Europa variabili dalle 10-15 t ha⁻¹ di sostanza secca (in condizioni nord e centro europee e in as-

senza di irrigazione) alle oltre 30 t ha⁻¹ nel sud del continente e in presenza di apporti irrigui; in Francia, in condizioni colturali ottimali (concimazione + irrigazione), si sono ottenute produzioni di punta superiori a 45 t ha⁻¹.

Nell'Italia centrale (pianura pisana) con sperimentazioni di lungo periodo condotte su terreni di medio impasto, naturalmente freschi e di buona fertilità, sono state registrate produzioni medie annue di circa 30 tonnellate ha⁻¹, anche in assenza di irrigazione (figg. 21 e 22).

Figura 21 – Produttività di miscanto di lungo periodo in Toscana litoranea. Densità impianto: 20000 piante ha⁻¹; concimazione: 100 kg ha⁻¹ di N, P e K. [Fonte: Angelini et al. 2009 modificato]

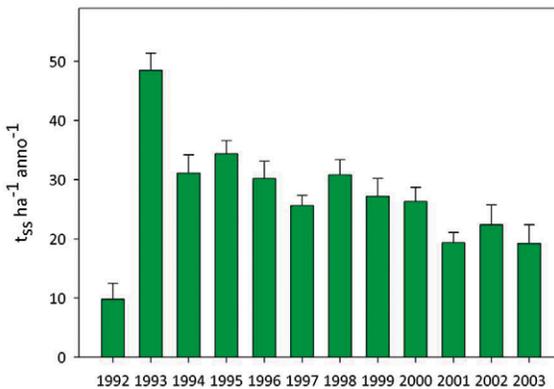
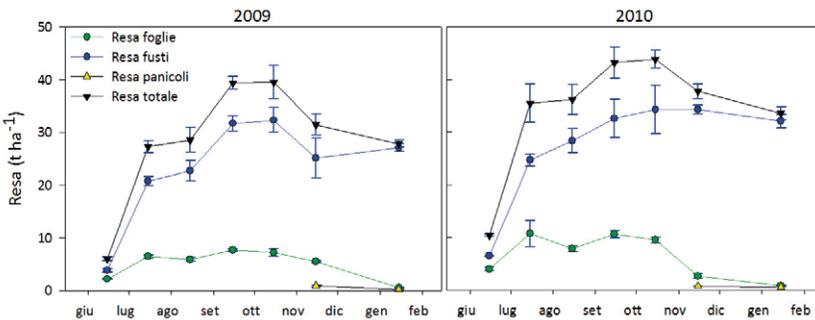


Figura 22 – Ripartizione della produttività di canna comune registrata nel 2009 e 2010 nella pianura pisana. Piante al 7° e 8° anno; concimazione 100-100-100 N-P-K. [Fonte: Nasso et al. 2011]

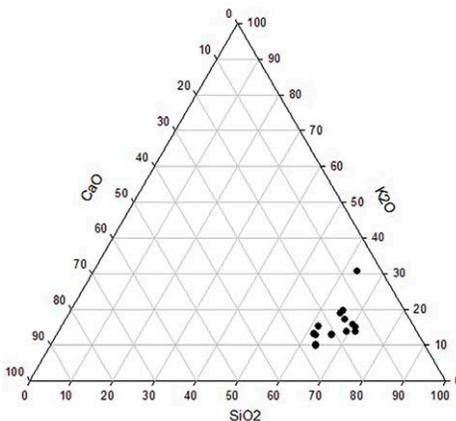


Le rese del miscanto riportate da Cosentino *et al.* (2007) e da Mantineo *et al.* (2009) per l'Italia meridionale assommano a circa 30 t ha⁻¹ in presenza di discreti apporti irrigui. Rese inferiori, di circa la metà (14 t ha⁻¹), sono state ottenute in condizioni di limitata disponibilità di acqua.

Usi e qualità della biomassa

Per quanto concerne la valutazione degli aspetti qualitativi della biomassa prodotta dalla coltura del miscanto il riscontro in letteratura è apparso quasi esclusivamente legato all'eventuale impiego di questa nella combustione diretta in caldaia e/o gassificazione. In tale direzione sono stati indagati i fattori maggiormente rilevanti quali il potere calorifico (che risulta di 16-18 MJ kg⁻¹), le eventuali emissioni di gas nocivi e di particolati, il contenuto in ceneri (con valori di 1,6-4% della s.s. dove i più bassi si riferiscono a fine inverno) e la composizione delle stesse per valutare la presenza di elementi che possono ostacolare e/o diminuire l'efficienza del processo di combustione. Tali problematiche risiedono infatti nel possibile rilascio di elementi inorganici (Cl, S, K, Na, Ca, Si, P) durante il passaggio alla fase gassosa del combustibile; in particolare, la presenza di silice assieme a calcio e potassio contribuisce alla formazione di silicati alcalini, con basso punto di fusione (700 °C circa) che possono determinare la formazione di depositi compatti (fig. 23).

Figura 23 – Distribuzione relativa dei principali ossidi inorganici. [Fonte: rielaborazione da Angelini et al. 2007]



Al riguardo, il principale problema che sembra doversi considerare ai fini dell'uso diretto in caldaia della biomassa di miscanto è proprio quello della bassa temperatura di fusione delle ceneri, imputabile alla cospicua presenza di silice, e bassi rapporti silice-potassio e silice-calcio (vedi fig. 23); alcuni studi sulla concimazione della coltura e sulla conseguente qualità della biomassa prodotta hanno evidenziato come incrementi di fertilizzazione azotata siano correlati positivamente con valori più elevati del potere calorifico, mentre, almeno nel primo anno di coltivazione, l'azoto non ha influenzato significativamente il contenuto di ceneri in foglie e steli.

Circa il contenuto medio di cellulosa, emicellulosa e lignina, nel miscanto i valori riportati nella più recente letteratura sono comparabili con quelli di canna comune: la cellulosa è pari a circa il 40-49%, la emicellulosa al 25-28% e la lignina all'8-11%. Questi valori lasciano intravedere come la produzione di bioetanolo di seconda generazione a partire da miscanto sia promettente. Ancora in fase di sperimentazione è il ricorso a tecniche di insilamento della biomassa verde e successiva digestione anaerobica per la produzione di biometano.

4. Cardo (*Cynara cardunculus* L.)

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Maria Valentina Lasorella

Inglese: *Cardoon*

Francese: *Chardon*

Tedesco: *Distel*

Spagnolo: *Cardo*

4.1 Generalità

Origine e diffusione

Il cardo (*Cynara cardunculus* L.) è una pianta originaria del bacino del Mediterraneo, tradizionalmente diffusa come coltura orticola e della cui coltivazione si hanno notizie già dal tempo dei romani. È una specie erbacea perenne appartenente alla famiglia delle *Asteraceae*, tipica delle zone mediterranee, diffusa in modo particolare in Europa meridionale, Nord Africa, America del Sud e Australia. Sebbene in Italia ed in tutta l'Europa meridionale questa coltura sia sempre stata coltivata come coltura orticola, dagli anni Novanta è stato preso in considerazione il suo impiego anche come coltura a destinazione energetica sia per la produzione di biomassa che per la produzione di olio vegetale (fig. 24).

Caratteri botanici e morfologia

Il cardo è una specie perenne, che sviluppa il suo ciclo colturale dall'autunno. In questo periodo dell'anno, infatti, germoglia per poi trascorrere l'inverno sotto forma di rosetta (stadio in cui risulta massima la resistenza al freddo) e produrre lo scapo fiorale nella primavera successiva. In estate si ha poi l'arresto vegetativo cui segue la fase di senescenza della parte aerea della pianta, mentre il potente apparato radicale sopravvive in stato di dormienza.

L'apparato ipogeo della pianta è costituito da un organo sotterraneo rizomatoso di riserva (ceppaia), da cui dipartono 3-5 radici carnose e robuste – del diametro talvolta maggiore a 2 cm – che possono raggiungere oltre il

Figura 24 – Impianto di cardo.



metro di profondità; l'apparato radicale vero e proprio è decisamente fittonante ed è capace di esplorare senza problemi gli orizzonti sotto-superficiali del suolo più ricchi di umidità. I rizomi sono provvisti di gemme e di 'ovoli'; questi ultimi si presentano come corte ramificazioni del rizoma stesso, provviste di gemme che spesso assumono una forma ovale da cui il loro nome; gli ovoli più grossi sono situati nella parte più profonda della ceppaia e sono i primi a produrre nuova vegetazione.

Il fusto, inizialmente di consistenza erbacea, assume progressivamente una consistenza semi-legnosa; presenta sezione circolare di diametro fino a 8-10 cm, può raggiungere un'altezza talvolta superiore a 100-120 cm e tende a ramificarsi anche quando la pianta sta entrando nella fase riproduttiva. Le foglie sono portate su internodi molto ravvicinati in particolare nella parte basale del fusto e fanno assumere alla pianta stessa un aspetto cespuglioso; queste sono lobate e pennatosette, caratterizzate da una grossa nervatura centrale, abbastanza spessa, che nella parte di attacco abbraccia parzialmente il fusto. Quelle più adulte possono raggiungere una lunghezza superiore al metro; la lamina fogliare è di colore verde grigiastro ricoperte da numerosissimi peli in particolare nella parte inferiore. Alcune cultivar presentano talvolta vere e proprie spine ai margini della grossa nervatura centrale e nei punti di attacco, su di essa, dei setti della lamina fogliare (fig. 25).

Figura 25 – Particolare di una foglia di cardo.



Le infiorescenze (capolini) abbastanza numerose (20-30 per pianta) sono portate all'estremità del fusto principale e delle sue ramificazioni (di 1°-2°-3° ordine ecc.). Esse si presentano di forma tendenzialmente ovale o conica, sono di modeste dimensioni (3-5 cm), ricoperte da numerose e piccole brattee ovali appuntite, coriacee, di colore verde, violetto o bruno, provviste spesso di aculei o spine all'estremità. I fiori (flosculi), molto numerosi, sono inseriti su un ricettacolo carnoso, che può essere edule, a forma di calice (capolino) che tende a diventare convesso durante la schiusura dei fiori; essi sono ermafroditi, a corolla tubolare e di presentano come tanti filamenti di colore violetto o azzurro (fig. 26).

Figura 26 – Pianta di cardo (a sinistra), particolare di capolino (al centro) e cardo in fioritura (a destra).



La fecondazione è operata da insetti bottinatori ed i frutti che ne derivano, impropriamente chiamati 'semi', sono acheni tetragoni (cipsele), di for-

104 Le biomasse lignocellulosiche

ma oblunga lievemente ricurva, un po' depressa, di colore grigiastro più o meno scuro e talvolta punteggiato o striato di nero, provvisti di pappo setoloso. I 'semi' di colore più scuro sono quelli formati più precocemente nella parti periferiche del talamo (capolino); sono più pesanti e presentano migliore germinabilità. Il peso di 1000 'semi' si aggira intorno a 35-45 g (fig. 27).

Figura 27 – Acheni di cardo.



Esigenze ed adattamento ambientale

Il cardo predilige terreni fertili, freschi e profondi, di medio impasto e senza ristagni idrici, tendenzialmente neutri o leggermente acidi; si adatta anche a terreni più o meno marcatamente sabbiosi e sopporta anche una certa salinità. Le esigenze termiche sono analoghe a quelle del carciofo (temperatura basale 7 °C) anche se può evidenziare una maggiore sensibilità alle basse temperature: infatti la pianta arresta la crescita a 0 °C e può andare incontro a morte se le temperature scendono al di sotto dei -2 °C. Le temperature ottimali di accrescimento si aggirano sui 16-18 °C con elevata umidità relativa dell'aria.

Questa specie si adatta particolarmente bene alle caratteristiche dell'ambiente mediterraneo, contraddistinto da limitati apporti idrici e con irregolare distribuzione della pioggia durante l'anno. Infatti, grazie al ciclo di crescita che va dall'autunno alla primavera, periodo in cui si registrano maggiori eventi piovosi, è in grado di intercettare gli apporti idrici naturalmente disponibili, ottenendo così buone rese in biomassa e acheni.

Tecnica colturale

La coltura del cardo è di norma impiantata per 'seme' in primavera (marzo-aprile), sebbene possa anche essere propagata per via agamica impiegando carducci, ovoli e altre parti di pianta (rizoma). Il seme (circa 2-3 kg ha⁻¹) viene interrato con seminatrice di precisione alla profondità di 3-5 cm in file variamente distanti in modo da ottenere un investimento di cir-

ca 15.000 piante ha⁻¹ che in condizioni di disponibilità idriche limitate può scendere a 10.000 piante ha⁻¹.

Per quando riguarda la preparazione del letto di semina, questa viene di norma realizzata con una lavorazione principale (aratura o ripuntatura) piuttosto accurata, seguita da una o più erpicature, in modo da raggiungere una zollosità non eccessiva e procedere all'interramento dei fertilizzanti fosfo-potassici. L'epoca di semina è diversa in rapporto agli ambienti agro-pedoclimatici ed è possibile sia nel periodo autunnale che in quello primaverile; nel primo caso si esegue nel mese di settembre-ottobre o, comunque, non appena le condizioni di temperatura e umidità consentono alla pianta di accrescersi velocemente e di raggiungere prima dei freddi invernali uno sviluppo tale da resistere alle improvvise gelate (fase di rosetta). Quando il rischio di gelate precoci è troppo elevato, è consigliabile rimandare la semina alla primavera successiva, indicativamente nel mese di marzo.

Le asportazioni di nutrienti da parte della coltura sono piuttosto elevate, tanto che nella fase di impianto si rivela indispensabile un'adeguata fertilizzazione di base, calcolata in funzione delle asportazioni presunte, della produttività della coltura nell'ambiente considerato e della dotazione naturale del suolo. Per la concimazione di fondo, in rapporto alle caratteristiche chimiche e nutrizionali del terreno, appare in linea di massima opportuno distribuire all'impianto circa 100-120 kg ha⁻¹ di azoto, 60-70 kg ha⁻¹ di P₂O₅ e 100-150 kg ha⁻¹ di K₂O; negli anni successivi al primo, gli eventuali apporti di concimi fosfopotassici e/o di azotati sono da effettuarsi al momento della ripresa vegetativa, a fine inverno o inizio primavera.

Dal punto di vista delle esigenze idriche il cardo presenta un ciclo vegetativo che ben si adatta al clima mediterraneo, pur riuscendo a crescere anche in ambienti di tipo xerico. Tuttavia, l'efficienza d'uso dell'acqua – Water Use Efficiency – (WUE) calcolata per il cardo non risulta particolarmente elevata essendo pari a circa 1 kg di s.s. per ogni 1.000 kg di acqua traspirata. In linea generale, secondo quanto sin qui emerso in campo scientifico, per un sviluppo di questa coltura idoneo alla destinazione energetica le precipitazioni medie disponibili non devono in ogni caso essere inferiori a circa 400 mm anno⁻¹ (tab. 3).

Tabella 3 – Produttività del cardo per due anni consecutivi in esperimenti realizzati in diverse località dell'Europa mediterranea. [Fonte: Fernandez et al. 2006]

Località	1994-1995		1995-1996	
	Precipitazioni	Resa	Precipitazioni	Resa
Madrid (Spagna)	280	6,5	529	23,1
Tebas (Grecia)	490	28,6	324	33,4
Forlì (Italia)	752	17,5	837	24,6
Poliporo (Italia)	316	7,5	722	15,6
Sicilia (Italia)	387	15,9	654	–

Gestione della flora infestante

Una certa sensibilità del cardo alla competizione della flora infestante si verifica solo nel primo anno d'impianto; successivamente, una volta raggiunto lo sviluppo completo della coltura, l'apparato aereo garantisce una copertura pressoché completa del terreno che inibisce naturalmente lo sviluppo delle malerbe. I sistemi di controllo delle infestanti nella fase di impianto della coltura si integrano tra quelli meccanici di preparazione del letto di semina e quelli che, nei casi più complessi, prevedono l'applicazione di erbicidi di pre-emergenza; ma ove non si voglia intervenire chimicamente, le infestanti possono essere controllate mediante sarchiature (fig. 28).

Figura 28 – Impianto di cardo al 1° anno di età.



Le possibili avversità biotiche della coltura sono rappresentate da afidi, insetti minatori del fusto (come *Gortyna xantenes* Germ.) e da vari defogliatori (come *Apion carduorum* Kirby, *Sphaeroderma rubidum* Graells, *Agrostis segetum*, *Pyrameis cardui* L.), anche se di norma i danni da questi effettivamente apportati non risultano di gravità tale da giustificare interventi di lotta chimica (fig. 29).

Figura 29 – Pianta intera di cardo.



Raccolta

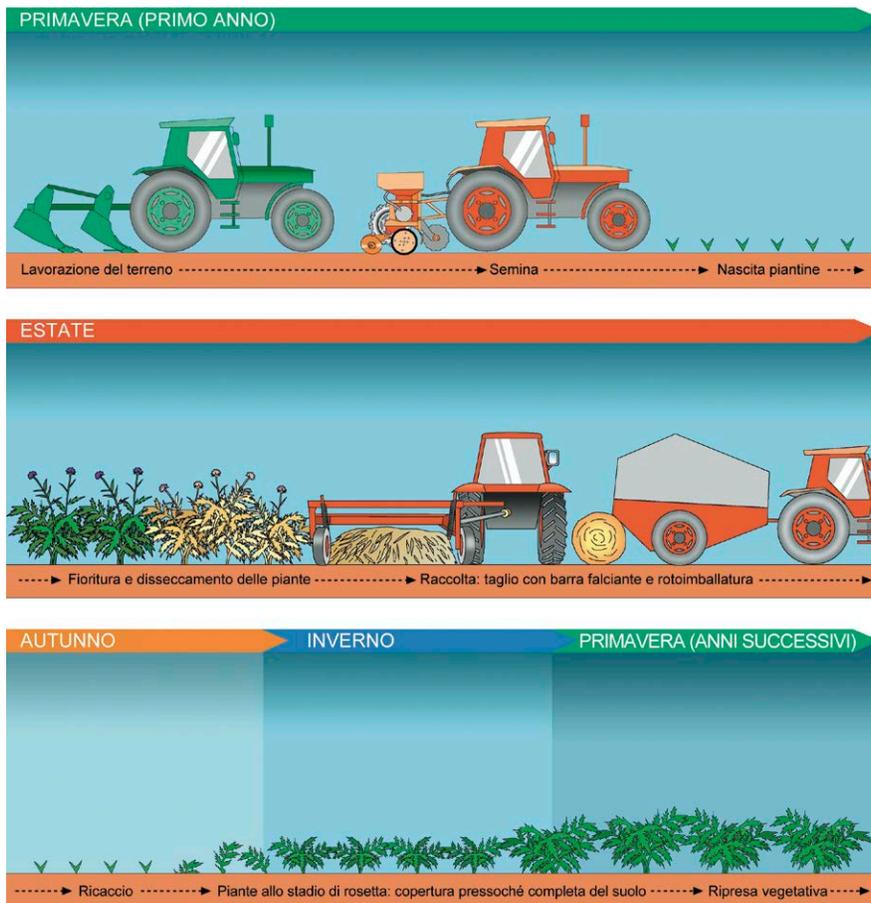
Al momento della raccolta (da fine luglio a metà settembre), il cardo presenta generalmente un valore di umidità intorno al 55%. Il prodotto finale della coltura può essere costituito sia dal complesso della biomassa lignocellulosica della parte aerea (foglie, scapi e capolini) che dal seme soltanto; questo a sua volta rappresenta mediamente il 15% della biomassa totale.

La raccolta separata delle due componenti si realizza effettuando un primo passaggio per raccogliere il seme con una normale mietitrebbiatrice – con testata da mais o da girasole tenuta sollevata all'altezza dei capolini – mentre la successiva raccolta della biomassa rimanente avviene falciando le piante alla base; questa viene poi disposta in andane con l'impiego di un ranghinatore per favorire la raccolta con il pick-up dell'imballatrice. Le balle presentano mediamente una densità finale di 140-150 kg m⁻³.

Altra alternativa è quella di raccogliere l'intera biomassa in un'unica soluzione, senza separare i semi, impiegando direttamente in campo una macchina falcia-trincia-caricatrice, oppure abbinando a questa una testata di tipo Kemper e una imballatrice semovente per ottenere direttamente balle ad alta densità. Naturalmente, in questo caso il materiale raccolto è costituito sia dai capolini (contenenti i semi oleosi) sia dalla biomassa restante (fig. 30).

108 Le biomasse lignocellulosiche

Figura 30 – Elementi fondamentali della tecnica colturale del cardo.



Produttività

È noto che uno dei principali fattori limitanti la crescita delle colture in ambiente mediterraneo sia spesso costituito dalla disponibilità idrica; conseguentemente anche la resa del cardo è fortemente influenzata dal quantitativo di acqua che si rende disponibile durante il suo ciclo di sviluppo. Studi condotti nell'ambito di molteplici programmi di Ricerca & Sviluppo, realizzati in ambito europeo, hanno dimostrato come la resa di questa coltura vari dalle 10 alle 20 t ha⁻¹ anno⁻¹ nel caso in cui l'impianto abbia avuto una buona riuscita e la piovosità annua sia pari ad almeno 500 mm.

La durata media dell'impianto è teoricamente pari a circa 15 anni; tuttavia, in pratica, questa deve essere valutata in funzione della convenienza

economica del sistema colturale stesso. Nel caso specifico, infatti, visti i relativamente più bassi costi di realizzazione dell'impianto, potrebbe essere opportuno ridurre la durata dell'impianto a soli 5-6 anni, oltre i quali sembra verificarsi un sostanziale calo delle rese. Al riguardo alcune prove sperimentali di lungo periodo condotte in Toscana, hanno confermato questa tendenza con rese elevate dal 2° al 6° anno d'impianto (circa 20 t ha⁻¹), cui ha fatto seguito una decisa decrescita produttiva (circa 10 t ha⁻¹) (fig. 31). Per quanto concerne il contenuto di sostanza secca alla raccolta, eseguendo quest'operazione in agosto, gli stessi studi hanno permesso di raggiungere valori pari al 40-50 % variabili in funzione dell'annata e della varietà adottata (fig. 32). Questa specie risulta interessante anche per le buone rese in granella, che può raggiungere il peso di 2 t ha⁻¹ che ha un contenuto in proteine pari a circa il 22%, mentre quello in olio, idoneo per la produzione di biodiesel, può anche superare il 25%.

Figura 31 – Resa in biomassa totale di due cultivar di cardo coltivate nella pianura pisana per 11 anni.

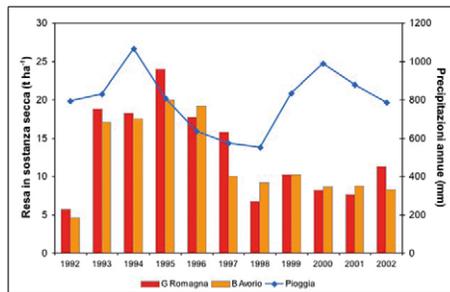
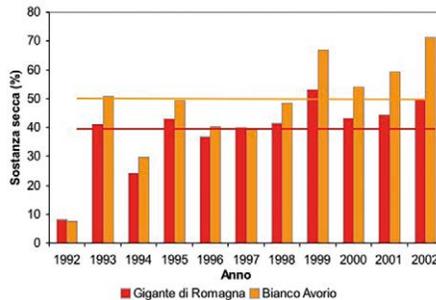


Figura 32 – Contenuto in sostanza secca di due cultivar di cardo coltivate nella pianura pisana per 11 anni. Le linee rappresentano il valore medio per ciascuna cultivar escluso l'anno d'impianto.



Usi e qualità della biomassa

L'impiego del cardo come coltura da energia prevede in primo luogo la produzione di un combustibile solido, dato dall'intera biomassa aerea, da destinare alla conversione termochimica (con un potere calorifico); data la buona qualità della fibra essa può essere impiegata anche per la produzione cartacea, ma anche come substrato lignocellulosico per la produzione di bioetanolo di seconda generazione. Come combustibile solido la biomassa di cardo è caratterizzata da un buon potere calorifico, intorno a 16 MJ kg^{-1} , da un contenuto in ceneri piuttosto alto (13-15% della s.s.) e un contenuto in silice che, invece, risulta piuttosto basso (12-18% delle ceneri). La biomassa aerea del cardo è rappresentata in media per il 30% dalle foglie, per il 25% dai fusti e per il 45% dai capolini, il 15% dei quali è granella e la quantità di energia associata a ciascuna componente è variabile (tab. 4). Dalla combustione della intera biomassa aerea senza gli acheni si ricavano circa 15 MJ kg^{-1} , valore questo leggermente inferiore rispetto ad altre colture lignocellulosiche.

Tabella 4 – Potere calorifico delle diverse porzioni di pianta in cardo. [Fonte: Fernandez et al. 2006]

Porzione	Potere calorifico (MJ kg^{-1})
Foglie basali	14,2
Foglie cauline	15,9
Fusti	14,4
Capolini (senza acheni)	15,9
Acheni	218
Biomassa totale	15,9

Tabella 5 – Analisi immediata di cardo coltivato nella pianura pisana. [Fonte: Angelini et al. 2009b]

	Proximate analysis (% s.s.)		
	Sostanza volatile	Carboni fisso	Ceneri
Cardo	73	13,1	13,9

Tabella 6 – Composizione delle ceneri di cardo. [Fonte: Angelini et al. 2009b]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Cardo	14,5	2,9	1,1	17,7	2,7	10	21,5	6,3	3	18,7

Alcuni esperimenti realizzati con il cardo per generare calore e/o elettricità in impianti pilota hanno messo anche in evidenza come le caratte-

ristiche qualitative della biomassa siano variamente influenzate sia dalla tecnica di raccolta (può determinare contaminazioni della biomassa con piccole porzioni di terra che aumentano il contenuto in ceneri e quindi complicano la gestione dell'impianto), sia dalla gestione colturale (concimazioni con KCl aumentano il contenuto di entrambi questi elementi nella biomassa generando problemi di depositi nella caldaia).

5. Panico (*Panicum virgatum* L.)

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Maria Valentina Lasorella -

Inglese: *Switchgrass*

Francese: *Panique*

Tedesco: *Switchgrass*

Spagnolo: *Panico*

5.1 Generalità

Origine e diffusione

Il panico (*Panicum virgatum* L.) è una graminacea appartenente alla tribù *Panicaceae*, della subfamiglia *Panicoideae*. Nativa dell'America settentrionale, si è diffusa dal 55°N di latitudine sino al Messico come importante specie erbacea nelle praterie americane. Inizialmente utilizzata unicamente come coltura da foraggio, solo negli ultimi anni ne è stata ipotizzata la valorizzazione come specie a destinazione energetica, tanto che recentemente l'U.S. Department of Energy l'ha scelta come coltura 'modello' per la produzione di bioetanolo di seconda generazione.

Alcune varietà di panico furono selezionate anche per la protezione e la conservazione del suolo, oltre che per l'alimentazione del bestiame. Questa specie è infatti caratterizzata da un sistema di radici profonde, fibrose e persistenti che si sviluppano in profondità e migliorano le caratteristiche del terreno, sia realizzando uno strato profondo più ricco di materia organica che riducendo il rischio di erosione. Vari studi hanno evidenziato come il panico possa anche essere utilizzato come pianta 'fitodepuratrice' per la sua alta capacità filtrante e per la buona capacità di assorbimento di contaminanti dal suolo, soprattutto metalli pesanti. La sua alta adattabilità e produttività in un ampio range di situazioni agro-ambientali l'hanno resa una coltura utilizzabile per ristabilire la fertilità dei suoli in aree degradate dove l'agricoltura non è praticata, tra cui le aree in disuso per la presenza di sostanze fitotossiche.

Caratteri botanici e morfologia

È una pianta erbacea perenne con un ciclo fotosintetico C4, si adatta abbastanza bene a condizioni di siccità e ad alte temperature. Nei climi

temperati, la maggior parte della sua crescita avviene dalla tarda primavera sino alla fine dell'estate-inizio dell'autunno, divenendo pressoché dormiente durante i mesi più freddi; la stagione produttiva dura circa tre mesi nelle aree a nord delle zone temperate, mentre nelle zone temperate-tropicali può durare anche otto mesi. La notevole diversità fisio-morfologica presente all'interno della specie le consente comunque di esprimere un'elevata adattabilità a un'ampia gamma di situazioni ambientali.

Figura 33 – Coltura di panico in provincia di Pisa: due varietà a confronto: Alamo, ecotipo lowland (sinistra) e Blackwell, ecotipo upland (destra).



Il fusto del panico è costituito da culmi eretti, di forma tondeggiante, molto robusti; gli internodi sono cavi, di colore verde-rossastro e intervallati da 5-7 nodi, di diametro variabile da 1 a 8 mm e altezza massima da 0,5 a 2,5 m. Le foglie sono di colore grigio verde, glabre, lunghe 10-60 cm, larghe 3-15 mm, finemente scanalate; presentano una nervatura centrale biancastra e nettamente marcata. I fiori sono riuniti in un'infiorescenza a pannocchia espansa (panicolo), pendente, lunga sino a 60 cm, costituite da un numero elevato di spighette. Nelle spighette si trovano due tipi di fiore: quelli superiori sono fertili e quelli inferiori sono maschili, ma sterili. Dai fiori fertili si originano, a fecondazione avvenuta, delle cariossidi lucide, piatte e ovali, allungate longitudinalmente, con glume di diversa dimensione. In maturazione, le cariossidi assumono una tinta rosa o vio-

letta fino al marrone dorato, cui tende anche il colore del fogliame durante l'autunno.

Il panico ha caratteristiche di specie auto-seminante, poiché una certa quantità di seme cade prima della raccolta della biomassa. Il peso di 1000 semi è variabile tra gli 0,7 e i 2 g a seconda della varietà; quindi, mediamente un chilogrammo di semente contiene circa 850-950.000 semi, caratterizzati da un alto livello di dormienza che in alcune varietà può raggiungere il 90%. L'insediamento della coltura, ovvero la fase di emergenza e le prime fasi di sviluppo della plantula, rappresenta il periodo più critico dell'impianto in quanto lo sviluppo molto lento la rende scarsamente competitiva nei confronti delle infestanti.

Figura 34 – Particolari morfologici del panico: culmo e guaina (sinistra), lamina fogliare e infiorescenza (destra).



Il sistema radicale è di tipo rizomatoso, prende origine dalla corona posta sotto il colletto ed è costituito da diverse radici avventizie che si trovano entro i primi 30-35 cm di spessore del terreno (fig. 35). Le radici primarie servono alla pianta soprattutto nel primo periodo del ciclo, mentre le radici secondarie, spesse e porose, possono estendersi fino a 3 m di profondità; il rizoma centrale costituisce il centro di accumulo delle sostanze nutritive, particolarmente importanti per la ripresa vegetativa dopo il periodo invernale.

Figura 35 – A sinistra: pianta di panico. A destra: rizoma con particolare delle radici.



Il rizoma si forma durante la fase di accostamento della pianta, in seguito allo sviluppo di radici dai nodi basali, vicino alla superficie del terreno; nel complesso la parte ipogea può rappresentare oltre l'80% della biomassa totale della pianta. Tuttavia questa percentuale varia in funzione del genotipo, del tipo di terreno e della tecnica colturale; recenti esperienze hanno mostrato in proposito valori oscillanti da un minimo di 2.500 kg ha⁻¹ ad un massimo di 18.500 kg ha⁻¹.

Basandosi sulle caratteristiche morfologiche e sugli habitat di preferenza, vengono definiti due gruppi di ecotipi di panico: *lowland*, generalmente distribuito nelle pianure alluvionali e caratterizzato da più elevata taglia e da maggior velocità di sviluppo e capacità produttiva e *upland*, diffuso invece sugli altipiani siccitosi, caratterizzato da steli più sottili, semi più grandi, e, in genere, da produzioni di biomassa meno elevate.

Esigenze ed adattamento ambientale

Il panico sembra essere una coltura sicuramente poco esigente sotto il profilo ambientale: dal punto di vista climatico si adatta piuttosto bene a condizioni di stress idrico e sopporta anche lunghi periodi di freddo intenso.

Secondo Madakadze (1997) la temperatura base di germinazione varia molto in rapporto alla varietà (da 5,5 a 10,9 °C); Hsu *et al.* (1985) hanno stimato una temperatura minima di germinazione di 10,3° C per le cv. Blackwell e Cave-in Rock, mentre Kiniry *et al.* (1996) hanno previsto una temperatura di base per la crescita di Alamo di circa 12 °C. È comunque

una specie sensibile al fotoperiodo: per fiorire richiede giorni lunghi seguiti da giorni brevi, con meno di 10 ore di luce, indipendentemente dalle temperature; la sensibilità al fotoperiodo è diversa fra le varietà e influenza notevolmente la produzione.

Anche la disponibilità idrica è un fattore determinante lo sviluppo e la produttività della coltura, soprattutto nell'anno d'impianto. Questa interagisce con i principali fattori agronomici della tecnica colturale con particolare riguardo alla frequenza di taglio e alla fertilizzazione azotata, anche per garantire o meno un buon insediamento della coltura nei primi anni della stessa.

Il panico si adatta bene a numerosi tipi di suolo; tollera pH compresi tra 4,9 e 7,6, sebbene prediliga un pH neutro. I suoli migliori per la coltivazione sono quelli profondi e ben dotati; nei terreni tendenzialmente sabbiosi si ha generalmente una migliore emergenza, ma spesso le produzioni sono condizionate negativamente dalla scarsa disponibilità idrica. La specie è molto efficiente nella ricerca degli elementi nutritivi e sembra avvantaggiarsi delle micorrize per l'assorbimento del fosforo.

Tecnica colturale

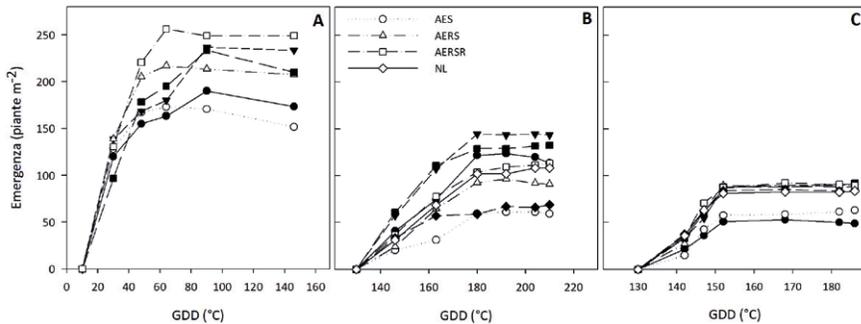
Come già anticipato, l'impianto della coltura risulta essere la fase più critica dell'intero ciclo produttivo; la bassa germinabilità e la dormienza del seme, unite a condizioni ambientali sfavorevoli, alla semina su terreno non ben preparato e a problemi di competizione con le malerbe, possono determinare scarsi livelli di emergenza, con effetti negativi sulla produttività della coltura.

Di norma le lavorazioni principali del terreno e i successivi lavori di preparazione del letto di semina non differiscono molto da quelli normalmente praticati per le colture da rinnovo a semina primaverile come mais e sorgo. Solitamente si esegue un'aratura di media profondità, che può anche essere sostituita da una ripuntatura più o meno profonda, seguita dalle ordinarie operazioni di affinamento del letto di semina; alcune linee guida sulla coltivazione del panico suggeriscono in proposito anche la non-lavorazione (*no-tillage*) o la minima lavorazione (*minimum tillage*), soprattutto nei terreni collinari, al fine di ridurre l'erosione superficiale e i costi di impianto della coltura (fig. 36).

La semina viene di norma effettuata mediante seminatrice meccanica tradizionale o di precisione e nelle regioni mediterranee l'epoca più adatta sembra essere compresa tra la metà di aprile e metà maggio, anche se in alcuni casi è emersa l'opportunità di realizzare la semina in autunno, seppur con livelli di emergenza inferiori (*vedi* fig. 36). Secondo alcuni autori, le semine anticipate consentono di superare più velocemente la dormienza dei semi, approfittando di un maggior numero di eventi piovosi per la coltura ed ampliando convenientemente la durata del ciclo coltura-

le. Considerate le ridotte dimensioni del seme, vanno comunque evitate profondità di semina superiori a 3 cm e, se il letto di semina si presenta eccessivamente soffice, una rullatura sia prima che dopo la semina può favorire l'emergenza.

Figura 36 – Numero di piante emerse per 2 m per un ecotipo lowland (bianchi) e uno upland (neri) in relazione ai GDD, secondo differenti itinerari tecnici in primavera (A) e autunno (B – C): AES = aratura, erpicatura, semina; AERS = aratura, erpicatura, rullatura, semina; AERSR = aratura, erpicatura, rullatura, semina, rullatura e NL = non lavorazione. [Fonte: Monti et al. 2001]



La quantità di seme da impiegare deve essere determinata in funzione della dimensione del seme e della sua germinabilità, della varietà e dello stato di affinamento del terreno e può variare da 2,5 a 10 kg di seme ad ettaro. Recentemente, in Europa, si sono ottenute buone rese ed una buona copertura del suolo, con un investimento finale di circa 30 piante m^{-2} . In letteratura, è comunemente raccomandata anche una distanza tra le file compresa tra 10 e 20 cm che sembra consentire un congruo anticipo nel raggiungimento della completa copertura del terreno, una sufficiente intercettazione della luce nel corso di tutta la stagione produttiva e una riduzione della competizione delle malerbe. Per contro, l'adozione di interfile troppo ridotte sembra aumentare eccessivamente la competizione intraspecifica, determinando un minor diametro dei culmi ed un conseguente maggior rischio di allettamento della coltura. La fase d'impianto può dirsi conclusa con successo quando le piante hanno 4 foglie ed almeno 2 radici secondarie della lunghezza di almeno 8 cm.

In ambienti idonei alla coltura, se mantenuto in buone condizioni edafiche e di corretta utilizzazione, un impianto di panico sembra poter conservare una buona produttività per circa 10 anni, con la massima resa espressa a partire dal 2°-4° anno.

Sotto il profilo delle esigenze nutrizionale, il panico è senz'altro una pianta che si avvantaggia della disponibilità di azoto, ma è sicuramente in grado di raggiungere buone produzioni anche con bassi input colturali. Considerando che la fertilizzazione deve essere stabilita in funzione del-

la dotazione del suolo e in modo da mantenere positivo il bilancio fra gli apporti (mineralizzazione, pioggia, residui colturali ecc.) e le asportazioni (lisciviazione, assorbimento della coltura) del sistema colturale, in genere si ritiene che, un apporto in primavera, in corrispondenza della ripresa vegetativa di circa 50-100 kg ha⁻¹ anno⁻¹ di azoto possa essere sufficiente; in terreni sabbiosi e/o poveri di sostanza organica è consigliato un aumento dell'apporto di azoto di circa il 25%. Dosi di azoto più elevate non determinano in genere aumenti significativi della produzione mentre possono invece provocare un incremento sostanziale delle infestanti e un'eccessiva lisciviazione dell'elemento nutritivo in falda. Di contro, la concimazione fosfo-potassica non sembra avere effetti produttivi significativi, solo nei terreni poveri è consigliabile una somministrazione rispettivamente di 40 e di 80 kg ha⁻¹ per anno di P₂O₅ e K₂O (tab. 7).

Figura 37 – Campi di panico nelle prime fasi di sviluppo (Pisa).



Tabella 7 – Piano di concimazione consigliato per il panico in funzione di diverse tipologie di suolo: S = scarsamente dotato, M = mediamente dotato, A = altamente dotato.

Anno	Azoto (kg ha ⁻¹)			Fosforo (kg ha ⁻¹)			Potassio (kg ha ⁻¹)		
	S	M	A	S	M	A	S	M	A
Impianto	0	0	0	40	0	0	80	0	0
Successivi	100	60	50	40	0	0	80	0	0

Nell'anno d'impianto l'irrigazione può rivelarsi utile per accompagnare la prima fase di crescita delle piantine nel caso in cui il periodo successivo alla semina risulti particolarmente siccitoso; dal secondo anno in avanti, l'irrigazione non risulta di norma necessaria.

Il lento accrescimento nella fase iniziale del ciclo e la bassa vigoria delle plantule fanno sì che l'insediamento della coltura richieda diverse settimane; ciò comporta spesso notevoli problemi di competizione con le infestanti, verso le quali risulta senz'altro necessario un accurato controllo. Particolare attenzione potrà essere rivolta all'impiego di metodi meccanici di tipo

preventivo come la *falsa semina* che si realizza attraverso una erpicatura del terreno prima della semina allo scopo di determinare la germinazione dei semi delle malerbe presenti, seguita da un secondo passaggio con erpice volto all'eliminazione totale delle piante emerse; tale metodo consente così di ridurre sostanzialmente la flora potenziale del suolo (*seed bank*) prima della messa a dimora della coltura. In alternativa si può ricorrere all'impiego di mezzi chimici in pre-semina o in post emergenza; ciò può essere particolarmente difficoltoso quando la flora avventizia è rappresentata prevalentemente da specie monocotiledoni; tanto che per questa coltura non sono al momento registrati principi attivi specifici. Di contro, nel caso in cui si debbano controllare specie dicotiledoni, molti sono i principi attivi disponibili e, pertanto, la riuscita del trattamento dipende soprattutto dalla tempestività dell'intervento.

Produttività

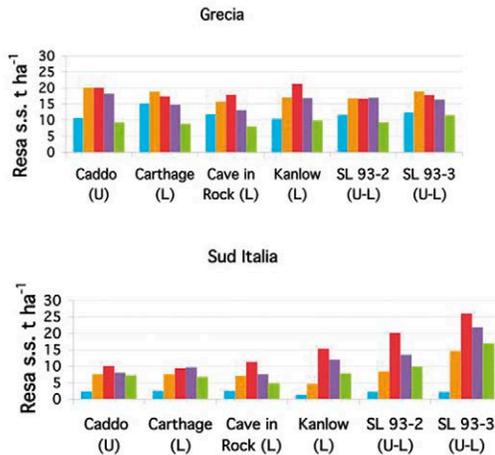
In linea generale, le varietà *lowland*, quali ad esempio Alamo, Kanlow e Carthage, mostrano una maggiore produttività rispetto alle varietà *upland*. C'è da dire che il continuo lavoro di miglioramento genetico operato su questa specie ha determinato nel tempo un notevole incremento della sua produttività. La crescita della coltura per alcuni ecotipi può essere molto rapida, con oltre il 75% della biomassa formata prima della fioritura estiva. Dopo la completa fioritura, gli steli lignificano, inizia la senescenza e le piante diventano dormienti.

Questa coltura è stata introdotta in Europa come coltura a destinazione energetica solo in tempi recenti, tuttavia i risultati di alcune sperimentazioni condotte presso il centro ENEA di Trisaia (Matera), presso l'Università di Bologna e negli ultimi anni presso il Centro di Ricerche Agroambientali "E. Avanzi" ed il CRIBE, hanno mostrato risultati veramente incoraggianti ed hanno evidenziato l'adattabilità di questa specie all'areale mediterraneo. Per quanto concerne la resa potenziale di questa coltura, studi di medio termine condotti in ambiente mediterraneo hanno messo in evidenza una forte influenza delle condizioni ambientali sulla resa di alcune varietà (con medie di circa 15 t di s.s. ha⁻¹ anno⁻¹); tuttavia l'impiego di varietà *lowland* (L) recentemente selezionate (SL 93-2 e 93-3) sembra presentare una maggiore stabilità di resa al variare delle condizioni di crescita della coltura (fig. 38); anche quando la disponibilità idrica è pari a circa 700 mm anno (compresa una irrigazione di soccorso in estate), si osserva come l'anno d'impianto sia tendenzialmente caratterizzato da produzioni inferiori rispetto agli anni successivi (da 2 a 8 t s.s. ha⁻¹), mentre in seguito la produttività della coltura aumenta con rese che oscillano tra le 10 e le 25 t s.s. ha⁻¹ anno (fig. 39).

Negli ultimi dieci anni valutazioni in merito alla resa di questa coltura non hanno solo preso in considerazione diversi genotipi ma hanno analiz-

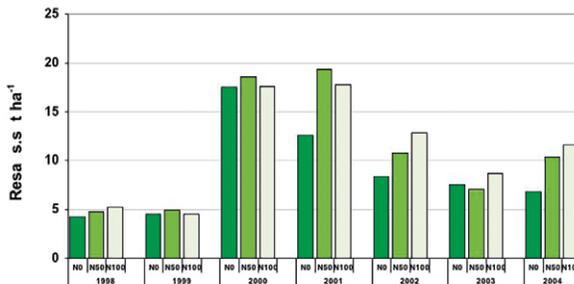
zato anche gli effetti della tecnica colturale. In particolare, questa coltura sembra risentire del livello di concimazione azotata in modo variabile che a sua volta potrebbe essere influenzato sia dall'andamento climatico stagionale che dall'età della coltura (vedi fig. 39).

Figura 38 – Produttività (t s.s. ha⁻¹) di alcune varietà di panico dal 1° al 5° anno d'impianto; U = ecotipo upland, L = ecotipo lowland, UL = ecotipo intermedio.



Per garantire la massima efficienza del sistema la scelta dell'epoca di raccolta ottimale assume un ruolo fondamentale. Infatti – come coltura da energia – il panico è raccolto una volta all'anno in inverno, anche se il suo prolungato impiego nel passato come coltura foraggera ne ha dimostrato anche l'attitudine a tagli ripetuti durante la stagione di crescita, che potrebbero garantire una finestra di approvvigionamento più ampia degli impianti.

Figura 39 – Effetto di tre dosi di concimazione (N0, N50, N100) sulla produttività di panico (ecotipo Alamo). [Fonte: ENEA]

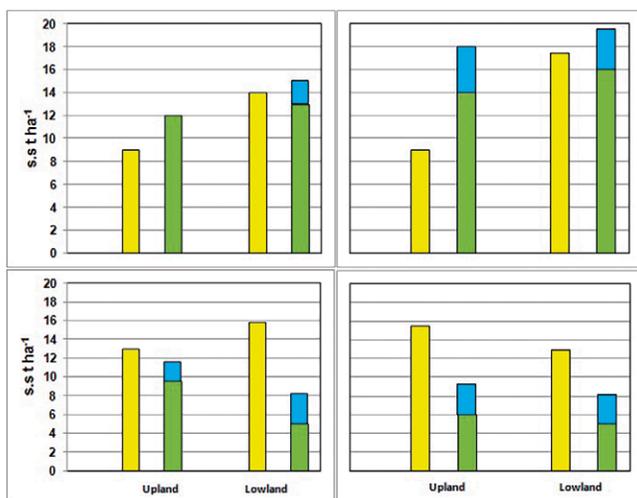


Studi condotti in Italia confrontando diverse epoche di raccolta hanno confermato quanto esposto in precedenza; tuttavia i risultati a disposizione fanno presupporre che l'adozione di tagli multipli possa determinare un più rapido esaurimento della coltura (fig. 40).

Raccolta e stoccaggio

La scelta del periodo di raccolta è cruciale anche riguardo alla destinazione d'uso della biomassa, poiché ogni tipologia di conversione energetica richiede che la biomassa possieda specifiche caratteristiche tecniche (contenuto di umidità, pezzatura ecc.) in grado di ottimizzare il processo di conversione. Nell'areale mediterraneo, il cantiere di raccolta può essere distinto in funzione dell'epoca di taglio: raccolte precoci (luglio-agosto) possono prevedere sfalcio, condizionamento, ranghinatura e rotoimballatura con sosta del materiale in campo prima dell'imballaggio per diminuirne il contenuto di umidità secondo uno schema che richiama il processo di fienagione; in alternativa raccolte tardive (gennaio-febbraio), che possono essere realizzate attraverso sfalcio, ranghinatura e imballatura in balle parallelepipedo senza sosta del prodotto in campo (*vedi* fig. 40); la raccolta invernale consente l'essiccamento della biomassa quando la pianta è ancora in piedi, e allo stesso tempo permette la traslocazione dei nutrienti dalla parte aerea della pianta (ai rizomi) riducendo le asportazioni di nutrienti e garantendo un maggior quantitativo di elementi nutritivi per promuovere il ricaccio primaverile.

Figura 40 – Resa di due ecotipi di panico (upland e lowland) dal 1° al 4° anno d'impianto in relazione a diverse epoche di raccolta: una volta l'anno a fine inverno (colonna gialla) e due volte l'anno, nella prima settimana di luglio e nuovamente a fine inverno (rispettivamente colonna verde e colonna azzurra impilate).



Per le diverse operazioni di raccolta e condizionamento della biomassa del panico possono essere utilizzate macchine tradizionalmente impiegate per le foraggere; di norma la raccolta in unico taglio si compie nell'autunno-inverno quando il contenuto di umidità del materiale è idoneo, tagliando la coltura a 4-5 cm da terra per poi imballarla. Nel caso di raccolta anticipata (o nel caso del doppio taglio) la biomassa ha una umidità attorno al 50%, mentre le raccolte tardive permettono di raggiungere umidità variabili tra il 35% ed il 15% in relazione alla varietà. La possibilità di densificare la biomassa in rotoballa (densità 142 kg m^{-3} pari a circa 1900 GJ m^{-3}) o balle prismatiche (densità 110 kg m^{-3} pari a circa 2100 GJ m^{-3}), secondo la richiesta dell'utilizzatore finale, influenza fortemente i costi per la movimentazione e lo stoccaggio, in quanto diversa è la densità che si può raggiungere.

Figura 41 – Macchina andanatrice (a sinistra) e rotoballe di panico (a destra).



Rispetto ad altre specie erbacee perenni potenzialmente impiegabili come colture da biomassa a destinazione energetica in ambiente mediterraneo, il panico risulta apparentemente svantaggiato per i più contenuti livelli di resa ottenibili; di contro questa coltura merita di essere tenuta in considerazione in quanto presenta molteplici vantaggi:

- la propagazione per seme;
- la raccolta è realizzabile con macchine per la foraggicoltura familiari agli agricoltori e non necessita di ulteriori investimenti;
- l'attitudine alle zone collinari dove può rappresentare un'alternativa all'abbandono dei suoli agricoli garantendo con il suo apparato rizomatoso un buon contenimento dei fenomeni erosivi.

Usi e qualità della biomassa

La biomassa di panico può essere impiegata con buoni risultati come combustibile solido viste le sue ottime caratteristiche chimiche (tab. 8) e la sua elevata efficienza, molto simile a quella del legno. Test in merito all'impiego di questa biomassa come combustibile solido hanno messo in evi-

denza una limitata formazione di depositi, scarsi fenomeni di erosione dei macchinari e un basso rilascio di sostanze volatili; ed anche per questo motivo sono in corso alcuni studi pilota volti a valutarne la messa in commercio sotto forma di pellet per il riscaldamento domestico.

Come specie da biomassa lignocellulosica il panico sembra presentare una buona attitudine anche alla produzione di bioetanolo di seconda generazione. I principali studi condotti in merito sono stati realizzati negli Stati Uniti dove si è investito molto nella valutazione di questa coltura alla produzione di biocarburanti in alternativa al bioetanolo da mais.

Tabella 8 – Principali caratteristiche chimiche della biomassa di panico. [Fonte: Database ieabcc.nl]

Potere calorifico (MJ kg ⁻¹)	Ceneri (% p.s.)	Sostanza volatile (% p.s.)	C (% p.s.)	H (% p.s.)	N (% p.s.)	O (% p.s.)	S (% p.s.)	Cl (% p.s.)
18-18,6	2,7-10,1	71-82	47,4	5,8	0,8	38,9	0,1	0,1
Composizione delle ceneri (mg kg ⁻¹)								
Si	Ca	Mg	K	Na	P	Al	Fe	
22,7	3,2	1,3	3,6	105,4	551,6	458,4	312,4	

Tabella 9 – Composizione della biomassa di panico. [Fonte: CETA 2007]

Composizione	
Cellulosa	32,0
Emicellulosa	25,2
Lignina	18,1
Acidi	1,2
Estrattivi inazotati	17,5

6. Sorgho (*Sorghum bicolor* L.)

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Maria Valentina Lasorella

Inglese: *Sorghum*

Francese: *Sorgho*

Tedesco: *Sorghumhirse*

Spagnolo: *Sorgo*

6.1 Generalità

Il sorgho, *Sorghum vulgare* Pers. (sinonimo: *Sorghum bicolor* (L.) Moench), appartiene alla famiglia della graminacee, tribù della *Andropogoneae*. Tra le specie coltivabili il sorgho è una delle più antiche in quanto si ritiene che abbia avuto origine nell'Africa occidentale diverse migliaia di anni fa, per poi

diffondersi inizialmente in Asia e in Europa e poi in America e in Australia. È il quarto cereale al mondo per importanza, dopo frumento, riso e mais.

Nei paesi occidentali (USA ed Europa), la sua coltivazione è prevalentemente destinata alla produzione di mangimi concentrati per l'alimentazione del bestiame e per la produzione di foraggio ultimamente anche per usi energetici. Attualmente il sorgo si estende su una superficie mondiale complessiva di circa 57 milioni di ettari, con una produzione di quasi 63 milioni di tonnellate di granella secca. La superficie investita a sorgo da granella in Italia nel 2010 ha superato i 40.000 ha (dati ISTAT), localizzati quasi totalmente nel centro-nord. Il 54% della superficie coltivata a sorgo è in Emilia Romagna e Lombardia.

In relazione agli scopi per cui è destinato si conoscono numerose varietà botaniche ed ibridi. Il sorgo rappresenta una delle colture dedicate annuali potenzialmente più interessanti, soprattutto per l'elevata adattabilità ai diversi ambienti, tra cui quelli marginali con limitata fertilità del suolo e modeste disponibilità idriche; la coltura è contraddistinta anche da una tecnica di coltivazione relativamente semplice, con possibilità di impiegare un'agrotecnica a basso input energetico e chimico e rese ad ettaro piuttosto interessanti (sorgho da fibra, foraggeri, zuccherini). Per usi energetici (biomassa da biogas e da combustione) assumono una particolare importanza i sorghi da fibra e zuccherini, caratterizzati da una taglia molto elevata, una moderata capacità di ricaccio e robusti e midollosi; al contrario, i sorghi da foraggio, caratterizzati da più sfalci durante la stagione di crescita, hanno trovato una certa diffusione come fonte foraggera 'di soccorso' per colmare il deficit che deriva dalla scarsità produttiva dei prati nei mesi estivi. Le varietà da foraggio, infatti, seppur caratterizzate da una buona produttività e un ciclo molto breve, necessitano di più raccolte per realizzare la loro potenzialità e questo le rende meno interessanti sotto l'aspetto economico a causa dei costi di gestione più elevati.

Caratteri botanici e morfologia

Il sorgo coltivato è una pianta erbacea annuale, caratterizzata da un ciclo fotosintetico C4, che si accresce nella stagione primaverile-estiva. La parte aerea è costituita da fusto e foglie, il fusto o culmo presenta una serie di nodi e internodi ripieni di midollo, in alcune varietà secco, in altre succulento e zuccherino e può raggiungere altezze fino a 4 metri; nei nodi si inseriscono le foglie lineari e lanceolate, in numero variabile sulla base della precocità della varietà, in media da 8-10 per varietà più precoci e fino a 18-20 per le più tardive. La superficie della foglia è ricoperta da una pruina cerosa che costituisce una barriera abbastanza efficace contro la perdita di acqua. I nodi basali del culmo presentano delle gemme che spesso germogliano garantendo un certo accestimento della pianta, soprattutto nelle varietà da foraggio.

Figura 42 – Impianto di sorgo allo stadio di levata nella pianura pisana.



L'apparato radicale è di tipo fascicolato ed è formato da diversi palchi di radici che si sviluppano molto precocemente e che presentano elevata capacità di assorbimento idrico – maggiore del mais – conferendo a questa specie, insieme alle altre caratteristiche evidenziate, una grande adattabilità a scarsi regimi idrici.

In generale, il sorgo è caratterizzato da una fase iniziale di sviluppo piuttosto lento e solo dopo l'emissione di numerose foglie inizia una fase di allungamento degli internodi (levata, fig. 42), alla quale segue l'emissione dell'infiorescenza; questa è un racemo terminale composto detto 'panicolo' (figg. 43-44) che ha un portamento di solito eretto e in certi casi pendente e una compattezza maggiore in relazione alla lunghezza e robustezza dell'asse principale e dei rami laterali, su cui sono inserite le spighe accoppiate, in cui una sessile e l'altra sterile. Si tratta comunque di una pianta piuttosto rustica e adattabile a differenti ambienti il cui sistema fogliare, in caso di carenza idrica, riesce a limitare molto la traspirazione pur mantenendo una elevatissima efficienza fotosintetica.

Anche su questa specie l'uomo è intervenuto con un'intensa opera di selezione, andando a selezionare attraverso il miglioramento genetico varietà a diversa attitudine; tra queste troviamo sorghi da saggina, sorghi zuccherini, sorghi da foraggio, sorghi da granella e sorghi da fibra.

Il sorgo da fibra è un ibrido tra un sorgo da granella ed un sorgo da saggina. L'incrocio tra questi due ha portato ad ecotipi più produttivi, ultimamente utilizzati come colture a destinazione energetica e caratterizzati da internodi pieni di midollo secco e molto ricco in fibre.

Figura 43 – Coltura di sorgo: particolari delle foglie (a sinistra) e del pannicolo (a destra).



Figura 44 – Campo di sorgo in fase di fioritura nella pianura pisana.



Esigenze ed adattamento ambientale

Per il proprio accrescimento e sviluppo il sorgo richiede temperature piuttosto elevate fin dalla germinazione, che può risultare rallentata o addirittura compromessa con temperature inferiori a 10 °C; le temperature ottimali per tutto il ciclo vegetativo sono comprese tra 20 e 30 °C, mentre temperature superiori a 38 °C possono danneggiare la coltura soprattutto in carenza di acqua. La pianta, avendo un metabolismo fotosintetico C4, richiede elevate intensità luminose durante tutte le fasi del suo ciclo; dal punto di vista fotoperiodico la specie è tipicamente brevidiurna ma grazie al miglioramento genetico le varietà oggi coltivate sono sostanzialmente fotoindifferenti o brevidiurne facoltative, tanto che completano il ciclo entro la fine dell'estate anche alle latitudini più settentrionali. Il sorgo presenta un'alta adattabilità a diversi tipi di terreno, compresi quelli argillosi di cattiva struttura, purché siano presenti sufficienti riserve idriche; i migliori terreni sono comunque quelli tendenzialmente argillosi, profondi, mentre quelli più sciolti risultano accettabili soltanto se è possibile ricorrere all'irrigazione; assolutamente inadatti sono i terreni soggetti a ristagno idrico, asfittici e freddi. Riguardo alla reazione del terreno la pianta del sorgo è molto adattabile e cresce bene tanto in terreni acidi (pH 5.5) quanto in quelli alcalini (pH 8.5). Molto buona è anche la sua capacità di adattamento alla salinità del terreno, mentre in fase di emergenza e di primo sviluppo le giovani piantine sono molto sensibili alla crosta superficiale; particolare attenzione è dunque richiesta nei terreni limosi.

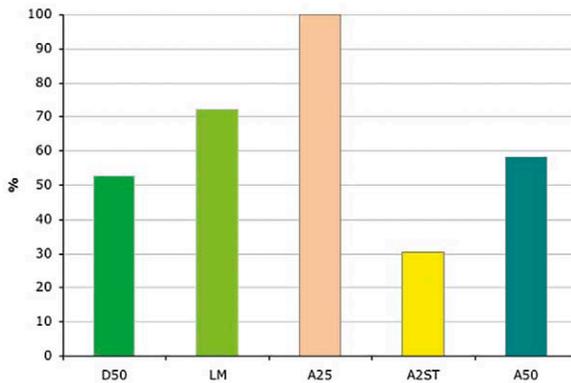
Tecnica colturale

Nell'ambito dello sviluppo delle biomasse ad uso energetico un certo interesse è stato manifestato nei confronti del sorgo, coltura annuale che comporta minori vincoli di immobilizzazione del terreno ed una gestione tecnica comparabile a quella delle colture tradizionalmente praticate. Infatti, essendo una specie annuale, il sorgo può essere inserito con facilità nei normali avvicendamenti colturali e viene tradizionalmente avvicendato con i cereali autunno-vernini ed altre colture erbacee assumendo il posto di una qualsiasi coltura da rinnovo a semina primaverile. Il sorgo non tollera la monocoltura e, pur essendo considerata una specie preparatrice dal punto di vista del miglioramento delle caratteristiche fisiche del terreno, può manifestare fenomeni di depauperamento della fertilità chimica del suolo con conseguenti diminuzioni di produttività della coltura in successione. A seguito di una sua prolungata coltivazione sullo stesso terreno con rotazioni troppo strette, possono insorgere fenomeni di perdita di fertilità e di allelopatia, senza considerare che avvicendamenti troppo brevi favoriscono anche l'instaurarsi di una flora

infestante specifica, formata principalmente da graminacee, che risulta nel tempo di difficile gestione.

In merito alla lavorazione principale, uno studio di lungo periodo – condotto nella pianura pisana – ha mostrato come è possibile ottimizzare la resa di questa coltura adottando un'aratura superfici da eseguire nell'estate precedente la semina, mentre il ricorso a lavorazioni più spinte o più ridotte sembrerebbe comportare una riduzione della produttività mediamente del 50% (fig. 45).

Figura 45 – Indice di comparazione percentuale delle rese in sostanza secca in relazione alle diverse tipologie di lavorazione principale del terreno. A25 = aratura a 25 cm (è considerato come 100% e le altre rese sono espresse come percentuale rispetto alla tesi di riferimento), D50 = discissura a 50 cm, LM = lavorazione minima, A2ST = aratura a doppio strato, A50 = aratura a 50 cm.

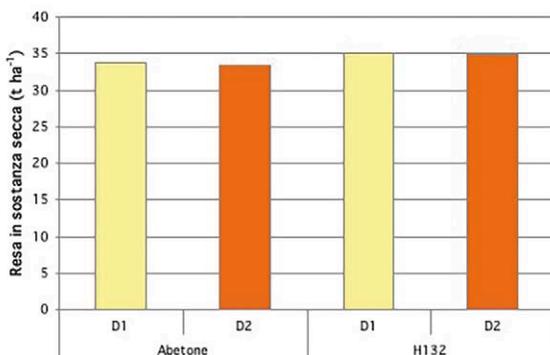


La preparazione del letto di semina è poi completata con due passaggi di erpice – a dischi e a denti rotanti – così da affinare il suolo, assicurare una rapida e uniforme emergenza e creare l'ambiente idoneo a un'emergenza rapida, uniforme e contemporanea con un adeguato sviluppo della pianta.

Dato che la temperatura ottimale per la germinazione dei semi è di circa 14 °C, il periodo migliore per la semina è, di norma, individuabile dalla metà fino alla fine del mese di aprile nel sud e nel centro Italia, mentre si può protrarre fino a metà maggio al centro-nord; ordinariamente la fase di emergenza risulta conclusa dopo 10-15 giorni dalla semina. La densità ottimale per la coltura destinata alla produzione di biomassa varia tra le 10 e le 20 piante m⁻²; alcune recenti esperienze condotte nella pianura pisana (fig. 46) non hanno fatto registrare un significativo incremento di produttività passando dall'investimento minore a quello maggiore, dato che all'aumentare della densità risultava aumentato il numero di culmi ma, di contro, si registrava una diminuzione dei diametri degli stessi.

Altre esperienze condotte nel sud Italia avevano invece individuato nella densità di 20 piante m^{-2} il miglior compromesso tra produttività e allestimento; nella pratica comune, tenendo conto della scelta varietale, della dimensione del seme e dello stato del terreno e, quindi, anche delle perdite in fase di germinazione e di emergenza, la quantità di seme consigliata varia intorno agli 8-13 $kg\ ha^{-1}$.

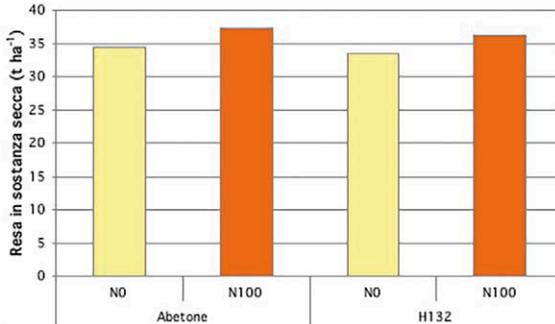
Figura 46 – Resa in sostanza secca di due varietà di sorgo (Abetone e H132) coltivate nella pianura pisana a due diverse densità d'impianto (D1 = 10 $pt\ m^{-2}$ e D2 = 20 $pt\ m^{-2}$).



La semina può essere eseguita impiegando sia normali seminatrici di precisione che quelle ordinariamente utilizzate per i cereali autunno-vernini, purché sempre opportunamente regolate. La profondità di semina varia in relazione alle condizioni idriche del letto di semina e, quindi, in funzione del tipo di suolo e dell'andamento termo-pluviometrico stagionale, ma mediamente può variare tra i 20 mm in terreni tendenzialmente più compatti e/o freschi e i 40-50 mm nei terreni più sciolti e/o tendenzialmente più asciutti; in alcuni casi, in terreni caratterizzati da elevata macroporosità, al fine di garantire una buona riserva di umidità attorno al seme e impedire fenomeni di stress idrico, può essere auspicabile effettuare una rullatura post semina.

Per quanto attiene la tecnica di fertilizzazione, nel nostro paese, le dosi di fertilizzante consigliate variano tra 60-80 $kg\ ha^{-1}$ di P2O5 distribuito totalmente in pre-semina e 100-120 $kg\ ha^{-1}$ di N da distribuirsi anch'esso alla semina; in suoli non sufficientemente dotati deve ovviamente essere realizzata anche la concimazione potassica. A tal proposito, prove recentemente condotte nel nostro meridione hanno mostrato come l'efficienza nell'utilizzazione dell'azoto è massima in condizioni di piena disponibilità idrica. Nel centro-nord, con andamenti stagionali non particolarmente siccitosi, su terreni adeguatamente profondi e abbastanza fertili e con avvicendamenti comprendenti anche specie leguminose, la concimazione azotata non sembra comportare significative differenze di produttività (fig. 47).

Figura 47 – Resa in sostanza secca di due varietà di sorgo (Abetone e H132) coltivate nella pianura pisana con due diversi livelli di concimazione azotata (N0 = assenza di concimazione e N100 = 100 kg ha⁻¹).



Come è già stato accennato, il sorgo presenta in genere una fase di germinazione ed emergenza piuttosto lenta e questa caratteristica tende a diminuire la competitività della coltura nei confronti della flora infestante durante i primi stadi di sviluppo che sono di fondamentale importanza per la riuscita della coltivazione; ciò rende indispensabili interventi di controllo della flora infestante con strategie di lotta sia indiretta (adeguate lavorazioni del terreno, rispetto dell'avvicendamento, tecniche di falsa semina ecc.) che diretta; per controllare al meglio le malerbe è comunque consigliabile abbinare tali accorgimenti ad ulteriori interventi sia con mezzi meccanici (sarchiatura) che con mezzi chimici. Gli attuali indirizzi agronomici nelle colture da energia tendono in ogni caso a minimizzare l'impiego di fitofarmaci; pertanto, contemporaneamente all'adozione di avvicendamenti più lunghi e diversificati possibili, viene spesso raccomandato un solo trattamento in post-emergenza. In Italia, le avversità specifiche di ordine patologico e parassitario del sorgo sono pressoché trascurabili.

Produttività

Per la destinazione energetica generalmente sono impiegate varietà zuccherine o sorghi da fibra – ibridi derivanti dall'incrocio di varietà da granella e da saggina – indicati per la conversione termochimica (combustione, gassificazione ecc.) o biologica (digestione anaerobica o produzione di bioetanolo di prima e seconda generazione). Tuttavia, la classificazione dei diversi tipi di sorgo in base alla destinazione energetica non è sempre chiara; si può affermare che la maggior presenza di zuccheri semplici fermentescibili o di carboidrati complessi costituenti le pareti cellulari definisce l'attitudine di una determinata varietà alla digestione per la produzione di biogas – nel primo caso – piuttosto che alla

combustione per la produzione di calore o alla gassificazione, nel secondo caso.

Una volta individuata la destinazione d'uso, la scelta della varietà o dell'ibrido deve tenere in considerazione criteri di adattabilità alle condizioni climatiche del sito: negli ambienti collinari o in zone poco favorevoli sotto il profilo delle disponibilità idriche sarà auspicabile scegliere ibridi medio-precoci o precoci il cui ciclo si realizza in pochi mesi, mentre classi medie sono da preferirsi in bassa collina o in pianura in assenza di irrigazione; gli ibridi tardivi, infine, saranno preferibili in condizioni più favorevoli, in terreni freschi e/o con discreta disponibilità idrica durante tutto il ciclo colturale.

Tabella 10 – Principali caratteristiche quanti-qualitative di due dei più diffusi sorghi: 133, sorgo da fibra e SUCRO 506, sorgo zuccherino. [Fonte: «L'informatore agrario»].

	BIOMASS 133	SUCRO 506
Taglia (cm)	350-480	340-480
Resa (t s.s ha ⁻¹)	17-35	15-40
S.V. (%)	92-95	92-95
° Brix	10-14	14-20

Le rese di biomassa riportate in bibliografia (tabb. 10 e 11) sono piuttosto variabili, essendo ampiamente influenzate dalle condizioni agro-pedoclimatiche delle zone di coltivazione; nelle già citate esperienze condotte nella pianura pisana, da Mazzoncini, sono state registrate produttività di oltre 30 t ha⁻¹ di s.s. ma rese medie di questa entità sono da considerarsi del tutto eccezionali e riconducibili ad un andamento stagionale particolarmente favorevole allo sviluppo della coltura.

In effetti, nello stesso areale di coltivazione della pianura pisana, le rese medie ottenute in ulteriori sperimentazioni di più lungo periodo hanno messo in luce valori medi pluriennali tra le 25 e le 30 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca.

Tabella 11 – Produzione di biomassa secca (t ha⁻¹) di colture di sorgo a diverso livello di input. [Fonte: Cosentino et al. 2002]

	Sorgo da fibra	Sorgo zuccherino
Alto input	25,3	25,4
Basso input	16,9	20,8

Come confermato da altre numerose esperienze, rappresentative di buona parte degli ambienti italiani, sembra quindi che il sorgo possa risultare competitivo nei confronti di altre specie dedicate alla produzione di biomassa da energia, solo in ambienti favorevoli caratterizzati da buone disponibilità idriche e nutrizionali. A tal proposito, sperimen-

tazioni pluriennali condotte nel nord Italia hanno riportato, in annate particolarmente sfavorevoli, rese variabili tra 12 e 18 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca significativamente influenzate dalla forte siccità che si era verificata.

Raccolta

Per quanto concerne le varietà ad uso energetico, l'epoca di raccolta della pianta può essere effettuata a partire da circa 15 giorni prima della fioritura, quando risulta sufficientemente compiuto l'accumulo di sostanza secca e di cellulosa nel culmo. In funzione della lunghezza del ciclo, della varietà e del tipo di terreno, nei nostri areali di coltivazione l'epoca di taglio varia da metà agosto a metà settembre (fig. 49), anche se sensibili differenze possono essere determinate dal microclima dell'area.

La biomassa alla raccolta presenta un contenuto di umidità piuttosto elevato (circa il 70%) per cui sono spesso raccomandabili varietà a ciclo più breve, anche se occorre tener conto che al ciclo più lungo corrisponde generalmente una maggiore capacità produttiva.

La raccolta (tab. 12) può essere realizzata impiegando due diversi cantieri di raccolta: nel *cantiere trinciatura* è usata una falciatrici-caricatrice che fornisce materia prima trinciata tal quale, idonea – ad esempio – all'alimentazione di impianti a biogas; nel *cantiere imballatura*, è utilizzata una falciatrice-condizionatrice, opportunamente modificata per ridurre gli inconvenienti legati ad ingolfamenti o inquinamento del prodotto, cui seguono le fasi di andatura, rivoltatura o ranghinatura e imballatura; quest'ultimo cantiere può essere realizzato impiegando i macchinari tipici della fienagione; il prodotto che si ottiene, essiccato in campo e imballato, può essere destinato all'alimentazione di centrali termoelettriche.

Nel *cantiere trinciatura* la biomassa presenta una bassa massa volumica che comporta elevati costi di trasporto e, di conseguenza, le coltivazioni devono essere ubicate nei pressi dell'impianto di utilizzazione (alcuni autori sostengono che il trasporto sia anti-economico oltre i 25 chilometri). Il vantaggio di questa linea di raccolta è che si può intervenire in qualunque periodo, in estate e in autunno, non avendo problemi di essiccamento in campo; il prodotto però è destinabile solo alla produzione del biogas, non essendo idoneo alla combustione diretta senza una fase di essiccamento. Nel *cantiere imballatura*, invece, è necessario intervenire in più fasi – con elevate superfici da raccogliere si dovrebbe iniziare l'operazione dopo la prima decade di agosto – e per facilitare l'essiccazione ed evitare lo sviluppo di processi fermentativi è inoltre fondamentale condizionare il culmo che alla raccolta presenta un'umidità media del 70%. Al fine di poter ottenere un prodotto essiccato (umidità 20%) sono perciò necessarie in media due operazioni di rivoltamento e/o ranghinatura il cui esito è strettamente legato all'andamento stagionale. Di contro, i vantaggi di questa tipologia

132 Le biomasse lignocellulosiche

di cantiere sono riconducibili al basso livello di umidità del prodotto, che favorisce il trasporto e lo stoccaggio e che ne consente l'eventuale utilizzazione in caldaia.

Quando è prevista l'utilizzazione diretta della biomassa, è anche possibile lasciare più a lungo le piante in piedi e ritardare la raccolta fino a quando l'umidità raggiunge valori inferiori al 50% (fig. 48). Risulta in ogni caso importante effettuare l'operazione di raccolta prima delle piogge autunnali che provocano un rapido innalzamento dell'umidità ed un precoce deterioramento della qualità della biomassa.

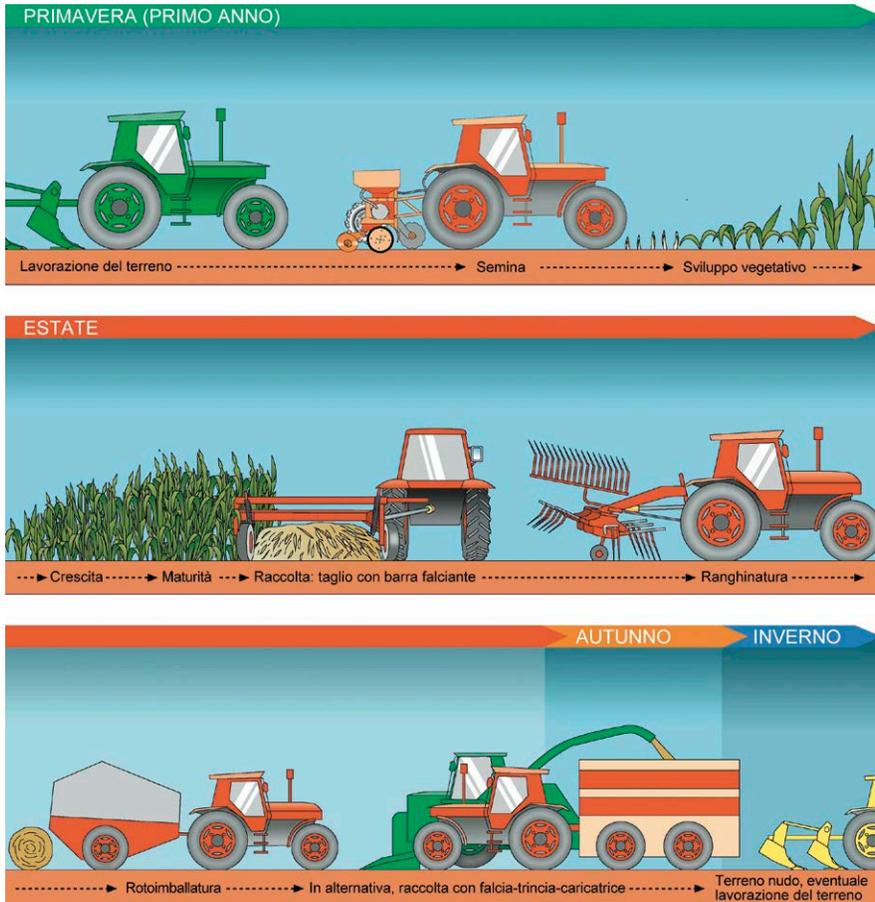
Tabella 12 – Spesa energetica e perdita di prodotto sulla base dei diversi cantieri di raccolta. [Fonte: Bentini, Zucchelli 2008]

	Perdite			Spesa energetica MJ/ha
	(% sulla produzione in sostanza secca)			
	Al taglio	A terra	TOTALI	
Cantiere trinciatura	10,1	–	10,1	1.248
Cantiere imballatura	7,3	12,5	19,8	1.824

Figura 48 – Coltura di sorgo da biomassa pronta per la raccolta tardiva.



Figura 49 – Elementi fondamentali del ciclo colturale del sorgo da biomassa.



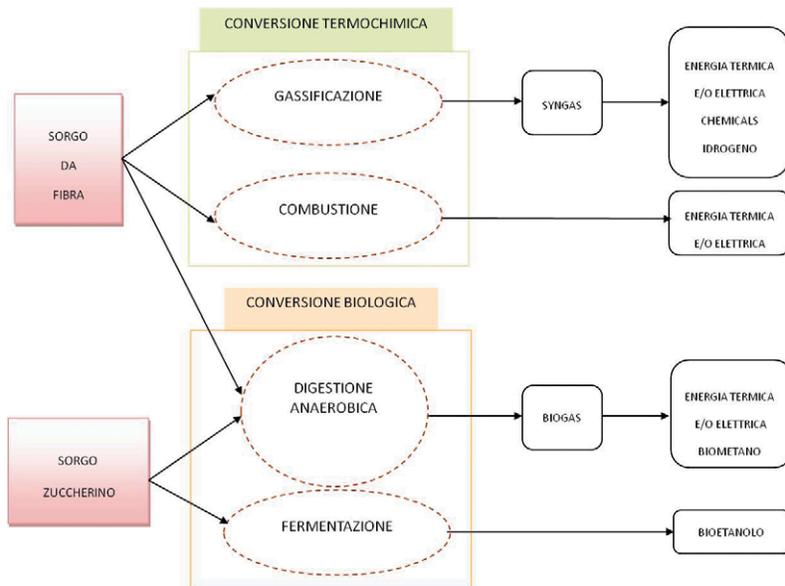
Usi e qualità della biomassa

Per la produzione di energia generalmente si fa riferimento ai sorghi zuccherini e da fibra che possono essere impiegati per l'alimentazione di diverse filiere energetiche (fig. 50). I sorghi da granella riscuotono un minore interesse per la taglia più ridotta: tuttavia non si dovrebbe sottovalutarne la capacità a fornire elevate rese in granella, aspetto che potrebbe migliorare le rese in biogas della coltura.

Tra le diverse filiere proposte quella al momento più matura e già presente sul territorio italiano è il biogas che sembra rappresentare la linea di utilizzo più vantaggiosa anche dal punto di vista economico. In questo caso la biomassa di sorgo può essere impiegata in codigestione con reflui zoo-

tecniche o come unico substrato. L'impiego di questa coltura negli impianti a biogas sta rappresentando una valida alternativa all'uso del mais in quanto il sorgo può essere coltivato in assenza di irrigazione e non è caratterizzato da una duplice destinazione d'uso tra il settore alimentare e non.

Figura 50 – Possibili impieghi della biomassa di sorgo.



Per quanto concerne l'uso della biomassa di sorgo per la conversione termochemica, è importante ricordare che il potere calorifico della coltura oscilla tra 16 e 17 MJ kg⁻¹, in funzione della varietà adottata. Il contenuto in ceneri varia molto in rapporto alla gestione colturale e all'ambiente di coltivazione, con valori compresi tra 4 e 9% della sostanza secca, mentre il contenuto di silice è piuttosto elevato e può raggiungere valori del 35%.

ARBOREE

7. Pioppo (*Populus spp.*)

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Valentina Giulietti, Simona Bosco

Inglese: *Poplar*
 Francese: *Peuplier*
 Tedesco: *Pappel*
 Spagnolo: *Chopo, alamo*

7.1 Generalità

Le specie del genere *Populus* – da cui derivano i cloni più utilizzati nell'ambito della pioppicoltura e delle piantagioni ad uso energetico – sono: il pioppo nero (*Populus nigra* L.), il pioppo deltoide (*Populus deltoides* Marsh.), gli ibridi fra queste due specie e il pioppo bianco (*Populus alba* L.).

Origine e diffusione

Il pioppo nero vegeta in quasi tutta l'Europa centrale e centro-meridionale, l'Africa settentrionale e l'Asia centrale. In Italia si trova sporadicamente allo stato spontaneo lungo i corsi d'acqua nella zona del *Lauretum* e del *Castanetum* e penetra nella sottozona calda del *Fagetum*, cioè dal livello del mare fino ai 1200 m nelle Alpi e 1600 circa negli Appennini. Originariamente doveva trattarsi di una specie polimorfa delle pianure alluvionali che, poi, ha subito una forte erosione genetica a causa delle bonifiche e della diffusione delle cultivar e degli ibridi con il *Populus deltoides*. L'European Forest Genetic Resources (EUFORGEN, <http://www.euforgen.org>) ha recentemente sviluppato un progetto internazionale per la conservazione dei genotipi di *Populus nigra*.

L'americano *P. deltoides* ha un areale di diffusione molto vasto, comprendente tutto il settore orientale degli Stati Uniti e, marginalmente, il Canada; è un pioppo di foreste planiziarie che si addensa vicino ai grandi fiumi dove le periodiche esondazioni gli procurano depositi terrosi da colonizzare. Il polimorfismo della specie è tuttora molto accentuato. L'introduzione in Europa è avvenuta agli inizi del Settecento.

Il pioppo bianco o gattice ha un areale di diffusione che si estende dall'Europa centro-meridionale all'Africa settentrionale fino all'Asia occidentale. In Italia è comune in tutta la penisola, dal piano fino alla montagna salendo sulle Alpi fino a 1000 m e 1500 m negli Appennini; sporadico a gruppi lungo i corsi d'acqua e nei terreni freschi che rientrano nella zona del *Lauretum* e del *Castanetum*. La sua distribuzione è condizionata soprattutto

dal periodo vegetativo, con un minimo valutabile in 220 giorni con temperatura superiore ai 5 °C. Si è naturalizzato in molte regioni dell'Europa centro-orientale, nella Francia occidentale e settentrionale, Belgio e Olanda.

Importanza storica

La forma più antica di utilizzo dei pioppi nel contesto agricolo è la pioppicoltura di 'ripa' che si sviluppa a filari lungo le strade, i canali, permettendo così storicamente anche uno sfruttamento dei margini dei campi per produrre legno, frasca da foraggio, azione frangivento, ombreggiamento e ornamento. Di contro, la pioppicoltura specializzata è un'attività più recente che implica l'impianto di pioppeti più o meno estesi in vista della produzione di legno con densità di 300-400 piante ad ettaro e turni di 9-15 anni, implicando maggiori attenzioni nella coltivazione e nella scelta delle varietà. La pioppicoltura riveste tuttora una notevole importanza nel mercato italiano del legno, poiché fornisce dal 30 al 50% della produzione nazionale annua di tondame da lavoro pur interessando una superficie piuttosto limitata (circa 70-80.000 ettari) situata prevalentemente in Lombardia, Piemonte ed Emilia Romagna. La produzione è destinata prevalentemente ai settori dei pannelli (53%) e dei pallet (20%).

A partire dagli anni Novanta, si è diffusa la coltivazione di pioppo in piantagioni a turno breve di ceduzione, da destinare alla produzione di energia (fig. 51). Queste piantagioni sono per lo più gestite intensiva-

Figura 51 – Impianto maturo di SRF di pioppo in autunno.



mente, con densità d'impianto variabili da 10.000-1000 piante ad ettaro, con turni di taglio di 1-5 anni e con la completa meccanizzazione delle operazioni colturali, sia all'impianto che alla raccolta. L'obiettivo delle Short Rotation Forestry (SRF) è infatti sostanzialmente quello di produrre grandi quantità di biomassa, per lo più in forma di cippato o pellet per usi energetici. Attualmente nel nostro paese ci sono circa 6000 ha di piantagioni SRF con turni di 2-5 anni, costituiti in grande prevalenza da pioppi ibridi espressamente selezionati per questo tipo di coltivazione ed utilizzazione.

Un altro interessante aspetto della recente diffusione del pioppo in SRF è dato dall'uso di questa specie per interventi di ripristino di situazioni ambientali degradate, come nel caso della fitodepurazione di falde o terreni contaminati da metalli pesanti, idrocarburi, azoto ecc., o per la ricostituzione di ambienti 'naturaliformi' in zone fortemente antropizzate, quali cave, discariche ecc.

Caratteri botanici e morfologia

Appartengono al genere *Populus* alberi a rapido accrescimento o arbusti con ramificazione sparsa a chioma arrotondata o allungata con corteccia di colore variabile. Il sistema radicale tendenzialmente superficiale si concentra nei primi 60-80 cm di suolo. Le foglie sono caduche, alterne, semplici, palminervie, gialle d'autunno. Trattasi di piante dioiche, con fiori riuniti in penduli amenti che appaiono sui rami dell'anno precedente, prima delle foglie; le piante maschili si distinguono da quelle femminili per la chioma più piramidale, per i rami meno espansi e per le gemme a fiore che sono più numerose e si aprono prima delle gemme femminili. L'impollinazione è anemofila, il frutto è un capsula che matura prima del pieno sviluppo delle foglie, i semi sono molto piccoli ovoidi, arrotondati all'apice, muniti di peli sericei. Il pioppo si propaga spontaneamente per seme; la germinabilità non è molto alta e dura solo poche settimane.

Il genere *Populus*, come tutte le *Salicaceae*, presenta spesso la facoltà di riprodursi anche per via vegetativa e dunque asessuata: questo fa sì che, oltre alle piantine prodotte da seme, possano essere impiegate per realizzare nuovi impianti anche talee di rami o giovani fusti. Il grado di attecchimento di questo materiale vegetativo varia in funzione delle specie e del clone. La specie *Populus alba*, ad esempio, ha generalmente difficoltà di attecchimento da talea legnosa. L'uso delle talee piuttosto che di piantine da seme, a radice nuda o in contenitore, può presentare numerosi vantaggi economici e tecnici, primo fra tutti la possibilità di impiegare cloni con un elevato grado di uniformità.

Il genere viene suddiviso in 5 sezioni: *Populus* (= *Leuce*), *Aigeiros*, *Turanga*, *Tacamahaca*, *Leucoides*, *Abaso*. Solo le specie che appartengono alle prime due sezioni interessano la flora forestale italiana e la pioppicoltura.

- Sezione *Leuce*: vi appartengono i pioppi tremuli e il pioppo bianco, suddivisi in due sottosezioni. La sottosezione *Trepidae* include i pioppi tremuli che hanno areali molto settentrionali e montani, sono specie spiccatamente pioniere e rustiche, assolutamente incapaci di moltiplicarsi per talea, ma dotati di una forte produzione di polloni radicali; la sottosezione *Albidae* comprende soltanto la grande specie polimorfa del pioppo bianco (*Populus alba*). Si tratta di una pianta che a maturità raggiunge notevoli dimensioni, molto tollerante in fatto di suoli e che è in grado di emettere numerosi polloni radicali in particolare come risposta a fattori esterni di disturbo. La capacità di riprodursi o meno per talea legnosa è legata al singolo clone. Questa specie è meno utilizzata in coltura rispetto ad altre a causa della geometria meno regolare della chioma e dell'accrescimento giovanile non particolarmente rapido, anche se è caratterizzata da elevata resistenza ai parassiti.
- Sezione *Aigeiros*: questa importantissima sezione include le specie di maggior rilievo tanto per la pioppicoltura tradizionale che per la gestione come ceduo a turno breve. Vi appartengono il pioppo nero (*P. nigra*), il pioppo deltoides (*P. deltoides*) e la grande specie ibrida (*P. x canadensis* = *P. x euramericana*). Il pioppo nero, diffuso in Europa e Asia, è molto comune anche in Italia e la varietà 'italica' è la più diffusa, soprattutto con fini ornamentali e di frangivento. Il *P. deltoides* è una specie nordamericana, caratterizzata da maggior rapidità di crescita ma, rispetto ai pioppi neri e agli ibridi, presenta maggiori difficoltà di radicazione delle talee legnose. Gli ibridi delle due precedenti specie hanno dato origine a molti cloni che sono oggi, probabilmente, tra i più utilizzati nella pioppicoltura italiana.

L'impiego dei cloni di pioppo in Italia è regolamentato dal Registro Nazionale dei Materiali Forestali di Base (RNMFB) che registra e descrive le specie e le varietà coltivabili a fini economici con il D.L. 386/03 di recepimento della direttiva 1999/105/CE). L'iscrizione dei cloni è subordinata all'approvazione dell'Osservatorio Nazionale per il Pioppo (ONP).

La selezione di cloni specifici per la produzione di biomassa viene effettuata in funzione di alcuni parametri che rivestono particolare importanza, quali:

- l'adattabilità alle particolari condizioni agropedoclimatiche del sito di impianto;
- la resistenza alle malattie fogliari, spesso molto favorite dalla densità delle chiome che caratterizza i cedui a turno breve;
- la capacità di ricaccio dopo la ceduzione;
- la vigoria di accrescimento giovanile.

Esigenze ed adattamento ambientale

I pioppi da coltura destinata alla produzione di biomassa lignocellulosica sono mediamente esigenti, in termini di fertilità del terreno, di disponibilità di acqua e di areazione stesso del terreno. In linea generale, i cloni più produttivi si rivelano anche i più esigenti e meno adattabili, e ripetute situazioni di stress, soprattutto idrico, facilitano spesso anche l'attacco dei parassiti.

Esigenze termiche. Per quanto concerne le esigenze termiche i pioppi hanno bisogno di un periodo vegetativo di almeno 220 giorni con temperatura superiore a 5 °C. Tutte le specie di pioppo di origine europea o americana resistono a temperature minime invernali inferiori anche ai -20 °C e sono quindi poco sensibili alle gelate tardive, mentre durante il periodo vegetativo possono resistere fino a temperature di -2 °C, purché per brevi periodi.

Esigenze idriche. Tutte le specie afferenti al genere *Populus* hanno bisogno di precipitazioni medie annue di almeno 700 mm; pur tollerando la siccità nel periodo estivo, in terreni collinari o laddove non sia presente una falda che la pianta possa raggiungere, sarebbe auspicabile che le precipitazioni estive ammontassero ad almeno 100-150 mm; di contro abbondanti piogge ed alta umidità atmosferica nel periodo estivo favoriscono gli attacchi parassitari (come *Marssonina brunnea* e *Melampsora* sp.) e conseguentemente la riduzione della resa. Le elevate esigenze idriche di questa specie sono confermate dagli alti livelli di traspirazione che variano in funzione della biomassa prodotta e dell'età dell'impianto. Negli impianti tradizionali, dal primo al decimo anno, la quantità d'acqua traspirata cresce da 400 a oltre 5000 m³ per ettaro all'anno.

Suolo. La coltivazione della SRF di pioppo dovrebbe essere realizzata quindi in terreni agricoli con tessitura tendenzialmente sciolta o di medio impasto, o comunque mai eccessivamente fine (con un contenuto di limo e argilla non superiore al 50%), con giacitura pressoché pianeggiante (anche per consentire la meccanizzazione delle varie operazioni colturali), di sufficiente profondità (almeno 80-100 cm) e con pH il più possibile vicino alla neutralità. Infatti, la resa della SRF può essere influenzata negativamente da un elevato contenuto di calcare attivo nel suolo, da elevata salinità o da eccessiva torbosità.

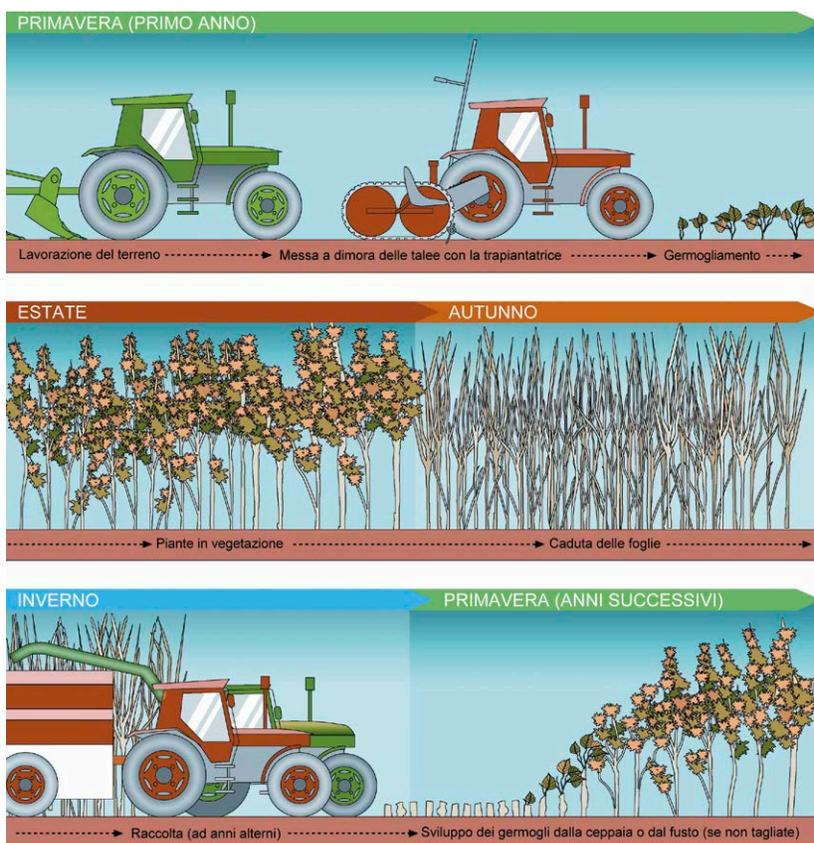
Tecnica colturale

Preparazione del terreno. Questa operazione è senz'altro molto importante per una buona riuscita dell'impianto di SRF (fig. 52) e deve essere quindi eseguita in modo accurato, specialmente su suoli tendenzialmente pesanti. La lavorazione principale consiste di norma in un'aratura tradizionale ad adeguata profondità, oppure – in alternativa – in una lavorazione a doppio strato (discissura profonda più aratura superficiale) o, ancora, in alcuni casi, anche nella sola ripuntatura/discissura profonda seguita da una energica frangizzollatura; queste operazioni vanno comunque sempre effettuate quando il terreno è in buone condizioni di tempera a evitare che abbia a

formarsi una temibile suola di lavorazione. La lavorazione principale può essere sfruttata anche per interrare ad adeguata profondità gli eventuali fertilizzanti che devono essere distribuiti prima dell'impianto della coltura.

Anche i successivi lavori complementari di preparazione del 'letto di semina' devono essere programmati, per tempi e modalità, in funzione della tipologia del suolo (tessitura e struttura), oltre che in relazione all'andamento termoudometrico tipico dell'area e, ovviamente, in rapporto al sistema culturale in cui la SRF è inserita. Essi potranno consistere sia in un paio di passaggi di estirpatore effettuati in inverno, in modo da affinare il terreno e controllare contemporaneamente la flora infestante sviluppatasi, sia in ripetuti interventi con erpice eseguiti poco prima del trapianto; in ogni caso, i lavori complementari dovranno consentire una buona messa a dimora e germogliazione del materiale di propagazione, evitando un eccessivo affinamento dello strato superficiale che potrebbe provocare la formazione della dannosa crosta superficiale.

Figura 52 – Elementi fondamentali del ciclo culturale di una SRF di pioppo.



Materiale di propagazione. Il materiale di propagazione è costituito da talee o astoni prodotti in vivaio. La conservazione del materiale, da quando viene raccolto e preparato fino al suo impiego, avviene in celle frigorifere a una temperatura di $2 (\pm 1) ^\circ\text{C}$; per favorire una rapida ripresa vegetativa, le talee e gli astoni devono essere idratati in acqua corrente per almeno 48 ore prima della loro messa a dimora. La realizzazione dell'impianto avviene di norma a fine inverno-inizio primavera quando le temperature iniziano ad aumentare, il terreno è ancora in tempera e sufficientemente fresco da favorire il rapido attecchimento della piantula.

La messa a dimora avviene durante la fase di riposo vegetativo, ovvero sul finire del periodo invernale, e viene effettuata utilizzando sezioni di fusto di 25-30 cm di lunghezza che vengono infisse verticalmente nel suolo per mezzo di specifiche trapiantatrici a cingolo o pneumatiche (fig. 53).

Figura 53 – Impianto di talee di pioppo con trapiantatrice a cingolo.



Relativamente all'impiego degli astoni interi messi a dimora orizzontalmente alla profondità di 5-10 cm, questa tecnica è tuttora in fase sperimentale; i primi risultati ottenuti sembrano comunque essere promettenti e il costo dell'impianto degli astoni interi, realizzato con i macchinari per la piantagione dei fusti di canna da zucchero, potrebbe risultare inferiore a quello delle talee (fig. 54).

Densità di impianto. Per stabilire la densità di impianto ottimale del ceduo a turno breve di pioppo si devono considerare molte variabili e in primo luogo il turno di taglio con cui si prevede di gestire l'impianto e il cantiere di raccolta adottato: all'aumentare della densità i fenomeni di competizione iniziano più precocemente, per cui generalmente si associano elevate densità di impianto a turni di taglio più brevi. Nelle condizioni tipiche della pioppicoltura italiana l'investimento suggerito oscilla tra le

6.000 e le 12.000 piante per ettaro; in quanto densità superiori determinerebbero un'eccessiva competizione tra le ceppaie che, nel tempo, tenderebbero inevitabilmente a diradarsi. A tal proposito, in prove di lungo periodo condotte nella pianura pisana con turno biennale e/o triennale, i migliori risultati sono stati ottenuti con densità comprese tra le 7.000 e le 10.000 piante per ettaro, con sesto d'impianto variabile da 2,5 x 0,4 m fino a 2,7 x 0,5 m.

Figura 54 – Macchina per la messa a dimora degli astoni in senso verticale.



Per quel che riguarda il sesto di impianto, le talee possono essere disposte in campo su file singole o binate, in relazione al tipo di attrezzatura meccanica che viene poi utilizzata sia per la coltivazione che per la raccolta: le file singole consentono un miglior controllo meccanico delle infestanti e possono essere realizzate con distanze interfilari variabili da un minimo di 1,60 m fino a 2,50 m e distanze sulla fila tra 0,40 e 0,60 m; le file binate sono spesso risultate poco indicate nell'ambiente italiano a causa delle difficoltà incontrate nella gestione della flora infestante nella fase iniziale del ciclo produttivo.

Concimazione. La coltivazione del ceduo a turno breve consente un notevole risparmio di fertilizzanti minerali rispetto alle normali successioni

erbacee: infatti con la caduta delle foglie il pioppo restituisce ogni anno al terreno circa il 60-80% dei nutrienti asportati, e ciò riduce di molto le asportazioni nette. L'entità delle asportazioni della SRF, pur con differenze per tipo di ambiente e specie, è comunque ridotta e le reintegrazioni per mantenere la fertilità da apportare al terreno per ogni $t\ ha^{-1}\ anno^{-1}$ di sostanza secca prodotta non vanno oltre i 4-6 kg per i tre elementi N, P e K. Tuttavia diversi valori sembrano essere influenzati dalla scelta del clone, dal turno di taglio e quindi al diametro medio dei fusti e la quantità relativa di rami che sono i fattori che maggiormente influenzano la quantità di nutrienti contenuti nella biomassa di pioppo.

Le sperimentazioni fin qui condotte hanno evidenziato una risposta minima o nulla della SRF di pioppo alla concimazione azotata; in genere si osserva, infatti, che i terreni agricoli in cui siano stati realizzati comuni avvicendamenti di colture erbacee sino al momento dell'impianto della SRF, presentano una riserva di azoto ampiamente sufficiente per i fabbisogni della coltura anche per alcuni anni. Questa concimazione viene comunque effettuata sia all'impianto che dopo ogni ceduazione. Di contro, la concimazione fosforica e potassica necessaria allo sviluppo della coltura durante l'intero ciclo produttivo viene di norma effettuata solo all'impianto. A conferma di tale impostazione, in prove condotte nella pianura pisana, è risultata ottimale la distribuzione del fertilizzante 8-24-24 in dosi di $0,6\ t\ ha^{-1}$.

Irrigazione. L'irrigazione è una pratica sicuramente onerosa e di norma da destinare a colture alimentari di pregio; nel caso della SRF da biomassa lignocellulosica è da prendere in considerazione esclusivamente per interventi di soccorso nel primo ed eventualmente nel secondo anno di vita dell'impianto. In questo caso è consigliabile un'irrigazione a pioggia, di almeno 20-25 mm, per favorire l'attecchimento delle talee. In taluni casi può essere interessante prevedere il ricorso all'irrigazione se si hanno a disposizione nelle immediate vicinanze adeguati quantitativi di acque reflue dei depuratori civili e soprattutto se l'impianto è stato realizzato su terreni tendenzialmente sciolti e non troppo dotati in sostanza organica.

Controllo delle infestanti. Dopo la distruzione delle infestanti direttamente effettuata con la preparazione del terreno per l'impianto, il successivo controllo delle malerbe si effettua soprattutto nel primo anno di coltivazione. In terreni caratterizzati da alto rischio di presenza di malerbe, può essere opportuno intervenire, subito dopo la messa a dimora delle talee, con prodotti residuali ad azione antigerminello che garantiscono di norma una copertura di circa 30-40 giorni. Successivamente al germogliamento delle talee è talvolta necessario intervenire nuovamente, soprattutto sulla fila, distribuendo in maniera localizzata prodotti ad azione dicotiledonici. A partire dalla primavera/estate del primo anno, il controllo delle malerbe può essere poi realizzato con una lavorazione meccanica dell'interfila come la sarchiatura, con la quale oltre alla rottura della crosta superficiale vengono anche eliminate le avventizie. Successivamente, se lo sviluppo

delle piante di pioppo è stato sufficientemente buono, non risulta più necessario alcun ulteriore controllo chimico delle malerbe. Il terreno dell'interfila va comunque sempre adeguatamente gestito dopo il taglio con una lavorazione meccanica superficiale necessaria per: interrare le eventuali infestanti, ripristinare la sofficità del terreno compattato dal passaggio delle macchine durante la raccolta e favorire il rapido ricaccio della ceppaia.

Avversità. L'elevata umidità dovuta all'alta densità di impianto crea le condizioni favorevoli allo sviluppo di parassiti fungini quali *Cytospora* spp. e *Discosporium populeum*, come pure il frequente turno di taglio può favorire l'insediamento nelle ceppaie di insetti corticicoli e xilofagi (quali *Cossus cossus*, *Cryptorhynchus lapathi* ecc.). Il ricaccio post-ceduazione e le giovani foglie che nascono alla ripresa vegetativa possono essere attaccati dalla *Chrysomela populi*, coleottero causa di defogliazioni che possono ripercuotersi sull'accrescimento della pianta. Defogliazioni importanti si possono avere anche in presenza di massicci attacchi di *Leucoma salicis*. Per il controllo fitosanitario la strategia migliore, viste le difficoltà di accesso in campo con i mezzi meccanici quando la coltura è avviata, è la scelta di cloni resistenti alle principali avversità. Particolare cura andrà poi posta nella scelta del sito d'impianto, lontano da pioppeti abbandonati o da terreni che presentano frequenti fenomeni di allagamento.

Turno di taglio. Generalmente, il turno di taglio più diffuso negli impianti di SRF di pioppo è quello biennale; fino ad oggi è stato quello maggiormente adottato anche a causa della mancanza di disponibilità di macchine operatrici in grado di realizzare la raccolta di piante di maggior diametro. Il superamento di questo limite ha reso possibile l'adozione di turni di ceduzione superiori ai 2 anni, tipicamente 3 anni, i quali sembrano favorire sia la maggiore produzione di sostanza secca per ettaro che la durata dell'impianto. A tal proposito recenti sperimentazioni in corso stanno valutando l'opportunità di estendere il turno di ceduzione fino a 5 anni. Indipendentemente dal turno di taglio presumibilmente adottato, alcuni autori consigliano spesso di realizzare un taglio nell'inverno successivo all'impianto per favorire la formazione della ceppaia e la produzione di un elevato numero di polloni; si prosegue poi la coltivazione seguendo il turno prestabilito.

Ripristino del terreno. Uno dei principali fattori limitanti la diffusione della SRF di pioppo nei sistemi colturali attuali riguarda le possibili difficoltà nel ripristino del terreno alla fine del ciclo colturale. Dall'esperienza realizzata presso la Aberdeen University è emerso come le migliori tecniche siano le seguenti.

- Estirpazione delle ceppaie: è forse il metodo più costoso, ma anche il più rapido; lo si realizza estirpando le ceppaie con una piccola pala meccanica e trasportandole fuori dell'appezzamento; è particolarmente indicato per ceppaie di età elevate e di più grandi dimensioni.

- Devitalizzazione delle ceppaie: prevede la distribuzione nella tarda primavera di un erbicida sistemico (a base di glyphosate) in dosi massime di 6 l ha^{-1} quando i polloni rimasti hanno raggiunto un'altezza di 150 cm (o comunque una sufficiente superficie fogliare); se le ceppaie sono molto vigorose può essere necessario un secondo intervento a fine estate (3 l ha^{-1}). La devitalizzazione delle piante e la naturale decomposizione delle radici rendono meno intensa la resistenza alle successive lavorazioni.

Questo secondo metodo è senz'altro più economico, ma il tempo necessario per rendere il terreno disponibile per una nuova coltura è notevolmente superiore: si va da pochi mesi, se in successione si intende reimpiantare nuovamente una SRF nelle interfile della precedente, ad oltre un anno (12-15 mesi) nel caso che si voglia ripristinare il terreno a seminativo.

Raccolta

Periodo. La raccolta della SRF di pioppo viene eseguita in inverno, da novembre a marzo, quando le piante sono in completo riposo vegetativo (vedi fig. 51); del resto, il taglio durante il periodo vegetativo da un lato potrebbe compromettere la vitalità delle ceppaie e dall'altro produrrebbe biomassa con un altissimo tenore di umidità.

La raccolta della SRF di pioppo va eseguita esclusivamente durante il riposo vegetativo (indicativamente nel periodo da novembre a marzo) per non compromettere la vitalità delle ceppaie. Per quanto riguarda la strategia di raccolta, i cantieri ipotizzabili sono sostanzialmente i due seguenti.

1. Taglio, cippatura/pezzatura e carico in una sola soluzione: per questo cantiere si utilizzano macchinari di derivazione 'agricola', del tutto simili come concezione alle macchine falcia-trincia-caricatrici impiegate per la raccolta del mais da insilamento. In questo caso viene prodotto esclusivamente cippato e, dato che la sminuzzatura dei fusti avviene contemporaneamente all'abbattimento, la biomassa prodotta presenta di norma un'elevata umidità (intorno al 40-50%) che può complicare non poco le successive operazioni di trasporto e, soprattutto, di stoccaggio (fig. 55).
2. Raccolta in due passaggi: abbattimento delle piante e concentrazione; successiva cippatura e trasporto. La soluzione del cantiere di 'abbattimento e concentrazione' presenta generalmente il vantaggio di avvalersi di macchinari più semplici e, soprattutto, di poter stoccare temporaneamente le piante intere, che possono esser lasciate essiccare naturalmente senza grandi rischi di perdite di biomassa per fermentazione. Per contro, lo svantaggio di questo tipo di cantiere è costituito

da una maggior complessità della logistica complessiva avendo la necessità di movimentare più volte la biomassa e di utilizzare per questo macchinari diversi (fig. 57).

Figura 55 – Esempi di cantieri con taglio-cippatura-carico contemporanei.



Figura 56 – Cantieri separati: a) abbattimento e b) concentrazione di SRF di pioppo.



La tendenza che si sta registrando in Italia nel mercato delle macchine per la raccolta è lo sviluppo di macchine, in genere, più economiche e leggere. Con questa tipologia, inoltre, si riescono a tagliare piante con diametri superiori ai 10 cm, fatto che consente di gestire anche impianti impostati con turni di ceduzione più ampi. Il prodotto raccolto con questa macchina può essere sia cippato che pezzato.

Nella seconda grande tipologia di cantiere le piante sono abbattute con una sega circolare portata (fig. 56), vengono poi concentrate a bordo campo o trasportate al centro aziendale e stoccate come tali. In questo caso, durante lo stoccaggio il materiale perde lentamente umidità in maniera naturale, senza andare incontro a fermentazioni indesiderate. Successivamente, quando necessario, le piante vengono cippate.

I principali prodotti ricavabili dalla raccolta dell'SRF pioppo destinabili allo stoccaggio sono:

- piante intere, ottenute operando un taglio alla base e quindi stoccate per poi essere trasformate (ad esempio tramite cippatura) prima dell'utilizzo;

- legna da ardere, di varia pezzatura in base al tipo di utilizzo;
- cippato, costituito da legno sminuzzato (chips) di dimensioni variabili (fig. 57);
- briquettes, tronchetti di materiale legnoso pressato di circa 7-8 cm di diametro e 30 cm di lunghezza;
- pellets (fig. 57).

Figura 57 – Cippato e pellet di pioppo.



La scelta del metodo di stoccaggio viene effettuata in funzione della disponibilità di spazio o di strutture capaci di contenere grandi quantità di materiale (fig. 58). Alcune soluzioni, apprezzabili dal punto di vista della riduzione dell'umidità nella biomassa, si rivelano a volte troppo dispendiose da un punto di vista energetico ed economico oppure irrealizzabili per mancanza di spazio.

In linea generale, lo stoccaggio può essere effettuato all'aperto o in locali chiusi e ciascuna delle due tipologie presenta vantaggi e svantaggi che di seguito andiamo a riassumere brevemente (fig. 58).

La tecnica dello stoccaggio all'aria aperta deve essere impostata in funzione dell'andamento meteorico stagionale tipico dell'area che influenza, necessariamente, la forma e/o l'altezza dei cumuli, la necessità o meno di copertura ecc. Importanti sono anche le caratteristiche della superficie su cui saranno posti i cumuli: ad esempio su terreni pesanti che trattengono maggiormente l'acqua potrebbero verificarsi problemi a causa di fenomeni di risalita capillare.

In generale, comunque, sono da preferirsi cumuli alti e di forma conica in quanto, specialmente in caso di piogge abbondanti, l'inclinazione delle pareti permette un allontanamento rapido e più efficiente dell'acqua meteorica. La disposizione in cumuli di grandi dimensioni (fig. 59) rispetto a quelli più piccoli, inoltre, permette di ridurre la superficie esposta agli

agenti atmosferici, aspetto positivo dato che, in pressoché tutte le soluzioni adottabili, lo strato più superficiale (20-30 cm) tende ad andare incontro inesorabilmente a riduzioni qualitative specialmente in funzione della successiva trasformazione energetica.

Figura 58 – Schema dei metodi di stoccaggio.



All'interno del cumulo, invece, si instaurano molto rapidamente dei processi fermentativi che fanno innalzare bruscamente la temperatura fino a circa 70 °C. Questo, oltre a creare le condizioni favorevoli all'accrescimento e alla proliferazione di funghi, potrebbe provocare pericolosi fenomeni di autocombustione specialmente durante la stagione estiva. Per mantenere bassa la temperatura e omogeneizzare il contenuto di umidità nei cumuli, in alcuni casi si procede anche al rimescolamento meccanico del materiale. La movimentazione del materiale è operazione tutt'altro che semplice, specialmente quando si tratta di cumuli molto grandi, senza contare che la 'rottura' dello strato superficiale espone nuova biomassa agli agenti atmosferici aumentando il quantitativo di materiale che andrà perso. È evidente, infine, che il rimescolamento del materiale rappresenta un ulteriore costo sia economico che energetico. Diversa è la situazione nel caso di materiale di dimensioni maggiori (tronchetti e fusti interi) che non sviluppa alte temperature all'interno dei cumuli, perde umidità più lentamente rispetto al cippato (specialmente nei primi mesi di stoccaggio) senza andare incontro, però, a perdite dovute a fenomeni fermentativi. Una possibile soluzione per lo stoccaggio all'aperto consiste nel posizionare dei teloni traspiranti sopra i cumuli di materiale legnoso (fig. 59). Tale accorgimento impedisce alla pioggia di bagnare i cumuli, consente di ridurre il contenuto di umidità fino al 35% in tempi relativamente brevi e, contemporaneamente, di limitare il deterioramento dello strato più superficiale del cumulo.

Lo stoccaggio della biomassa in locali chiusi può essere effettuato con diverse tecniche dipendenti dal livello tecnologico aziendale e dalla razionale gestione delle risorse economico-finanziarie. Tale procedura, infatti,

permette di limitare al massimo le perdite di prodotto utile, con guadagni che però non sempre riescono a giustificare gli investimenti necessari. Tale tecnica prevede il rimescolamento del prodotto in modo da omogeneizzare la superficie esposta all'aria, velocizzare l'abbattimento dell'umidità e contenere i processi fermentativi. L'adozione della ventilazione forzata è di solito utilizzata nei locali di stoccaggio delle centrali che possono dedicare una parte dell'energia e del calore (che spesso non viene riutilizzato) per questo scopo. Una soluzione praticabile per la riduzione del tenore di umidità potrebbe essere proprio quella di sfruttare, in presenza di centrali vicine, parte del calore prodotto per l'essiccazione della biomassa da stoccare. L'essiccazione può anche essere solo parziale, tale da arrivare a valori di umidità inferiori al 35%, soglia al di sotto della quale sono inibiti (o comunque fortemente rallentati) i processi fermentativi e la perdita di biomassa.

Figura 59 – Stoccaggio di cippato di pioppo in cumuli coperti e scoperti.



Produttività

Come in precedenza accennato, la produttività complessiva della SRF di pioppo dipende molto dal clone utilizzato, dalla fertilità del terreno, dalla disponibilità idrica, dall'età dell'impianto e dalla tecnica di coltivazione e di utilizzazione dell'impianto stesso. Sul piano della tecnica di gestione della coltura, l'elemento che maggiormente sembra condizionare il risultato produttivo è senz'altro costituito dal ritmo dei tagli di utilizzazione.

Prove di lungo periodo sono state condotte a Pisa, presso il Centro di Ricerche Agro-Ambientali Enrico Avanzi, a partire dagli anni Novanta. Le linee di ricerca impostate sono state principalmente quattro e hanno riguardato: la valutazione dell'ottimale distanza d'impianto, del più idoneo ritmo di ceduzione, del più conveniente livello di intensificazione, degli effetti della capacità di ritenzione idrica del suolo sulla resa. Le tesi poste a confronto sono riportate nella tabella 13.

Nei grafici che seguono sono sinteticamente riportati i risultati produttivi pluriennali delle prove descritte, in termini di biomassa utile, come sostanza secca per ettaro e per anno.

Tabella 13 – Descrizione sintetica delle principali esperienze di lungo periodo sulla SRF di pioppo.

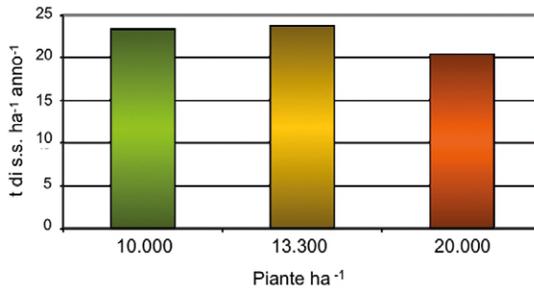
	Tesi sperimentali
Sesto di impianto	1) 0,5 x 1,0 m (circa 20.000 piante/ha) 2) 0,5 x 1,5 m (circa 13.300 piante/ha) 3) 0,5 x 2,0 m (circa 10.000 piante/ha)
Ritmo di ceduzione	1) annuale 2) biennale 3) triennale
Livello di intensificazione culturale	1) alto input (aratura a 50 cm; 10.000 piante ha ⁻¹ ; diserbo chimico pre-impianto e in post-emergenza alla fine del primo anno; concimazione azotata con 100 kg ha ⁻¹ di N dopo la ceduzione; turno biennale) 2) basso input (discissura a 35-40 cm; 8.000 piante ha ⁻¹ ; diserbo chimico di post-emergenza alla fine del primo anno; concimazione azotata con 50 kg ha ⁻¹ di N dopo la ceduzione; turno biennale)
Effetto ritenzione idrica suolo	Suolo sabbioso: ETP0%, ETP50%, ETP100%* Suolo medio-impasto: ETP0%, ETP50%, ETP100%

* ETP: Reintegro rispettivamente del 0%, 50%, 100% dell'evapotraspirazione potenziale.

Per quanto riguarda l'ottimale densità di impianto, in figura 60 si può osservare che le rese più elevate sono state ottenute, senza apprezzabili differenze tra loro, adottando i sestini di impianto più ampi e tali da determinare un investimento di 10.000 e 13.300 piante/ha, mentre aumentando la densità si provoca un decremento di circa il 10-15% nella produttività probabilmente a causa dell'eccessiva competizione che si instaura tra gli individui.

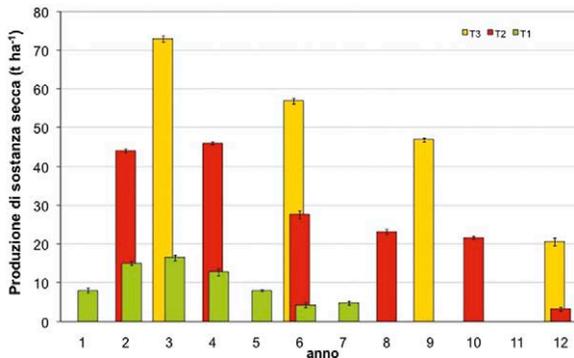
L'adozione di un sesto più ampio, quindi, sembra garantire una maggiore resa, oltre che un immediato contenimento dei costi di impianto (che talvolta possono superare il 50% del costo di produzione finale) e una maggiore facilità di movimento da parte dei mezzi meccanici.

Figura 60 – Rese della SRF di pioppo nella pianura pisana (media 1996-2002) in funzione della densità di impianto.



Se poi si considera la definizione dell'ottimale ritmo di ceduzione (fig. 61), i dati medi pluriennali in termini di produttività sembrano suggerire la convenienza ad orientarsi verso tagli più distanziati nel tempo: la frequenza annuale, infatti, ha fatto registrare rese nettamente inferiori (poco meno di 10 t/ha/anno di s.s.) rispetto al turno biennale (poco meno di 14 t/ha/anno di s.s.) ed a quello triennale (poco più di 16 t/ha/anno di s.s.) che, invece, hanno fatto registrare differenze meno importanti tra loro. L'aspetto di maggior rilievo risulta essere la durata dell'impianto che si è ridotta a soli sette anni nel caso del taglio annuale, mentre ha raggiunto i dodici anni nel biennale e nel triennale. Come si può notare, in tutte e tre le tesi a confronto si assiste a un decremento importante di produttività con l'andare del tempo, con interessanti indicazioni circa il momento in cui diventa non più conveniente proseguire con la coltivazione della SRF, per cui risulta necessario distruggere la SRF e procedere alla reintroduzione a coltura.

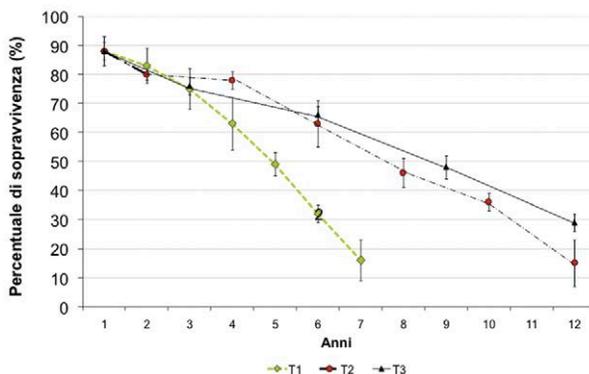
Figura 61 – Resa: istogramma in una SRF di pioppo per tre diversi cicli di taglio (T1 – annuale, T2 – biennale, T3 – triennale).



La percentuale di sopravvivenza delle piante varia in funzione del turno di ceduzione adottato (fig. 62). Questa mostra un rapido decremento

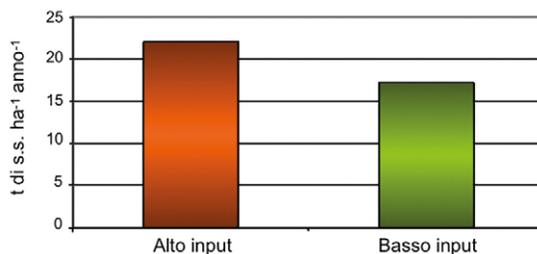
nel taglio annuale, dove al settimo anno solo il 15% delle piante era sopravvissuto, così come riscontrato nel turno biennale dopo 12 anni. Infine, nel turno triennale le piante sembrano caratterizzate da una maggiore vigoria, tanto che dopo 12 anni la percentuale di sopravvivenza si mantiene intorno al 30%.

Figura 62 – Sopravvivenza: istogramma in una SRF di pioppo per tre diversi cicli di taglio (annuale, biennale, triennale).



Per quanto riguarda la valutazione del più sostenibile livello di intensificazione colturale adottabile nella conduzione di una SRF di pioppo, infine, dalla figura 63 si può notare come, mediamente, sembra possibile individuare intorno al 20% la contrazione di resa da attendersi nel caso in cui si scelga di ridurre l'immissione di input chimici, meccanici ed energetici nel sistema (*vedi* tab. 13); la tesi 'basso input', infatti, ha fatto registrare una resa media pluriennale di circa $17 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di s.s., contro le $22 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di s.s. del livello alto, confermando come il pioppo sia una specie piuttosto esigente che si avvantaggia discretamente della intensificazione colturale (fig. 63).

Figura 63 – Rese della SRF di pioppo nella pianura pisana in funzione del livello di intensificazione colturale.



In merito all'effetto della ritenzione idrica del suolo sulla resa, le prove attualmente in corso hanno mostrato come, al termine del primo ciclo biennale di ceduzione, la migliore produzione sia stata riscontrata in terreni argillosi in cui si è somministrata la maggiore dose irrigua ($36 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di s.s.), mentre la peggiore in suoli tendenzialmente sabbiosi in assenza di supporto irriguo ($4 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di s.s.). Invece, su terreni di medio impasto si riscontrano rese ($22 \text{ t ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ di s.s.) comparabili a gran parte dei valori medi riportati per le piantagioni europee di pioppo in SRF anche in assenza di irrigazione (tab. 14). Da notare che su suoli caratterizzati da una buona ritenzione idrica l'apporto irriguo permette di incrementare la resa del 20% e del 40%; tuttavia ulteriori valutazioni in merito all'impatto ambientale legato a questo genere di gestione colturale devono essere prese in considerazione.

Tabella 14 – Resa (t s.s. ha^{-1}) di pioppo in SRF, in funzione di tre livelli di disponibilità idrica e due tipi di suolo.

Tipo suolo	0% ETP	50% ETP	100% ETP
Medio impasto	21,8	28,6	36,2
Sabbioso	4,2	21,9	33,1

Usi e qualità della biomassa

Il potere calorifico inferiore associato alla biomassa di pioppo presenta valori che oscillano tra 16 e 24 MJ kg^{-1} con una percentuale di ceneri che varia tra lo 0,5% e l'1,9%. Pertanto, la biomassa prodotta è ritenuta di buona qualità e migliore rispetto alle colture da energia erbacee, tendenzialmente caratterizzate da un più elevato contenuto in ceneri. Di notevole importanza è il basso contenuto in metalli alcalini, i quali sono la causa principale di gravi problemi tecnici, per la produzione di energia elettrica attraverso combustione, come ad esempio la formazione di incrostazioni. Valutando il contenuto di ceneri in funzione del tipo di terreno è stato osservato che il valore è superiore in piante cresciute su terreno argilloso (3,1%) rispetto a quello sabbioso (2,2%). Inoltre, è stato osservato un decremento del contenuto in ceneri in funzione della disponibilità idrica con valori differenti nelle diverse parti della pianta. Infatti, man mano che si reintegrano quote sempre maggiori di ETP nei rami prevale una dinamica di accumulo dei minerali rispetto ai fusti.

Differenze nel contenuto di corteccia e legno nella biomassa del pioppo, come per altre specie legnose, sono un indice importante per la valutazione della qualità del materiale prodotto. Emerge come in SRF di pioppo non sia conveniente, da un punto di vista della qualità del materiale prelevato, tagliare piante caratterizzate da un diametro (a 1,30 m da terra) inferiore a 4 cm per l'elevata percentuale di corteccia presente.

8. Eucalipto (*Eucalyptus* spp.)

Valentina Giulietti

Inglese: *Eucalypt*

Francese: *Eucalyptus*

Tedesco: *Eukalytus*

Spagnolo: *Eucalipto*

8.1 Generalità

Il presente paragrafo riguarda principalmente le specie del genere *Eucalyptus* interessanti nell'ambito delle piantagioni da legno ed in particolare quelle realizzate ad uso energetico.

Origine e diffusione

Il genere *Eucalyptus* è un endemismo dell'Australia e di alcuni territori limitrofi. I più importanti popolamenti naturali si trovano a sud del Tropico del Capricorno, lungo la fascia umida delle coste australiane. La presenza degli eucalipti in un areale molto ampio e diversificato è dovuta essenzialmente alla loro differenziazione in numerose entità genetiche, oltre 700 tra specie, varietà ed ibridi. Soltanto un centinaio possiede un discreto valore culturale, mentre tutte le altre specie costituiscono le formazioni cespugliose e arborescenti delle aree predesertiche o di alta montagna.

Gli eucalipti sono le specie più usate al mondo nelle piantagioni da legno. L'eccezionale rapidità di accrescimento, l'elevata plasticità nei confronti del clima e del terreno, la possibilità di essere governati a ceduo hanno consentito agli eucalipti di occupare un posto sempre più importante tra le specie esotiche in molti paesi del mondo.

Importanza storica

All'inizio del 1800, alcune specie di eucalipto sono state introdotte in Europa. In Italia, intorno alla metà del XIX secolo, si diffuse la credenza che gli eucalipti avessero virtù anti malariche e per questo motivo furono costituiti estesi impianti, come quello nella Maremma toscano-laziale. Solo verso la fine dell'Ottocento acquistarono importanza dal punto di vista forestale sia per il largo impiego lungo le linee ferroviarie della Sicilia, sia per gli impianti effettuati in Sardegna per produrre puntoni da miniera. Fra il 1930 e il 1940 gli eucalipti ebbero un altro periodo di ampia diffusione per la costituzione di alberature e frangivento nelle grandi opere di bonifica in Sardegna, nel Lazio e infine anche in Maremma e in Puglia. A partire dal 1950, nel sud d'Italia e nelle isole gli eucalipti sono stati impiegati in vasti rimboschimenti per difesa idrogeologica e, più di recente, in impianti fina-

lizzati alla produzione di legno per l'industria della carta. L'Inventario Nazionale Forestale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio (INFC 2005) ha stimato in circa 19600 ha la superficie complessiva delle piantagioni di eucalipto in Italia.

Secondo Nocentini (2010), l'esperienza italiana sugli eucalipti si può considerare per lo più fallimentare, così come avvenuto in altri paesi mediterranei, con gli obiettivi sia produttivi sia ambientali dei rimboschimenti che non sono stati assolutamente raggiunti. La difficoltà di commercializzare il legname ha determinato una crisi rispetto all'utilizzo delle specie di questo genere e ha indotto alcuni coltivatori a cambiare destinazione ai terreni dopo la ceduzione. Inoltre alcune piantagioni sono state danneggiate irreversibilmente dal fuoco e da altre avversità.

Mughini (2003) invece individua alcune prospettive per eucalipti in Italia: da una parte l'intensificazione dei modelli culturali secondo i principi dell'arboricoltura da legno sia di qualità che di quantità (SRF, per cippato ad uso energetico), usando materiale d'impianto selezionato; dall'altra la valorizzazione di alberature e filari frangivento all'interno delle zone agricole, dove le produzioni legnose, soprattutto ad uso energetico, risultano soddisfacenti (intorno a $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$).

La ricerca in Italia sugli eucalipti coltivati in SRF è molto recente, come anche in Europa, mentre si è sviluppata maggiormente in Australia, Nuova Zelanda, USA (Hawaii), Brasile, Uruguay, Venezuela e Sud Africa.

Caratteri botanici e morfologia

Il nome del genere, *Eucalyptus* (della famiglia delle *Myrtales*), deriva da *eu* = bene e da *kalipto* = nascosto, perché i fiori in boccio formano un opercolo che nasconde gli stami. Alcune caratteristiche del frutto sono molto importanti per il riconoscimento delle diverse specie.

Il portamento varia molto da specie a specie passando da un aspetto cespuglioso e arbustivo ad uno nettamente arboreo, raggiungendo e superando gli 80 m di altezza. La corteccia degli eucalipti può essere caduca o persistente. Le cortecce caduche (chiamate in Australia *gum*) possono desquamarsi in nastri larghi pochi centimetri e lunghi qualche metro, oppure staccarsi in placche o in squamette piccole. Le specie a corteccia persistente vengono suddivise principalmente in quattro tipi, partendo da quelle a corteccia molto spessa e dura con fenditure longitudinali profonde (*ironbark*) fino ad arrivare a quelle con una corteccia poco spessa suddivisa in numerose squamette (*peppermint*). I rametti sono generalmente di colore verde, ma in alcune specie sono rossi o violacei per la presenza di antociani. Nella corteccia, come anche nelle foglie si riscontrano numerose cavità secretici contenenti oli essenziali, cellule tannifere e sacche contenenti gommoresine. Le foglie sono persistenti, quelle vecchie cadono prevalentemente in estate (luglio-agosto); sono generalmente disposte alternate (questo fa sì

che sotto gli eucalipti vi è generalmente poca ombra), picciolate con forma prevalentemente falcata e prevalentemente coriacee. Gli stomi si trovano normalmente in entrambe le facce della foglia, molto infossati e con un notevole strato di cutina. La produzione del seme comincia fra i 5 e i 15 anni, a seconda della specie e delle condizioni ambientali. Il frutto è rappresentato da una capsula, i semi sono molto piccoli e molto variabili nella forma e conservano la germinabilità fino a 4-5 anni. Le plantule, a cotiledoni epigei, presentano foglie giovanili molto diverse da quelle adulte.

Nel nostro Paese sono state diffuse principalmente due specie: *Eucalyptus camaldulensis* ed *Eucalyptus globulus*. Le altre specie utilizzate sono state: *E. dalrympleana*, *E. viminalis*, *E. gomphocephala* ed *E. occidentalis*.

Esigenze ed adattamento ambientale

Termiche. Ciascuna specie del genere *Eucalyptus* ha delle esigenze proprie rispetto al clima e al terreno. Gli eucalipti, essendo di origine australiana, provengono da un areale a clima caldo o temperato caldo e con un regime pluviometrico assai variabile. Le temperature medie annue sono maggiori di 18 °C, con massime che arrivano a 40 °C, quelle minime inferiori allo zero sono frequenti soltanto a sud del 25° parallelo.

Il fattore limitante la diffusione degli eucalipti nel nostro paese, più che da particolari esigenze idriche o edafiche, è rappresentato dalle basse temperature invernali (fig. 64). Infatti gli eucalipti non hanno acquisito, con l'evoluzione del genere, caratteristiche morfologiche, anatomiche e fisiologiche tali da consentire il superamento di stress termici di una certa entità. Ad esempio, *Eucalyptus camaldulensis* ed *E. globulus* necessitano di temperature medie comprese fra 12 e 18 °C, sopportando temperature minime non inferiori a -6 °C. Le specie appartenenti al gruppo degli *snow gums* (*E. gunni*, *E. dalrympleana*, *E. stellutata*, *E. niphophila*), provenienti dalle zone più fredde del continente australiano, costituiscono un'eccezione avendo acquisito buone capacità di resistenza al freddo nei loro luoghi di origine. Ma sono caratterizzate da un lento ritmo di crescita, dalla lignificazione precoce dei nuovi getti e da un'altezza piuttosto ridotta. Per questo uno degli obiettivi del miglioramento genetico degli eucalipti è quello di trasferire la capacità di resistenza al freddo degli *snow gum* alle specie sensibili che rivestono attualmente un importante ruolo produttivo.

Idriche. Il regime pluviometrico dell'areale di origine è compreso fra i 100 mm delle regioni predesertiche centrali e i 3500 mm della costa orientale e della Tasmania. Le ricerche e la sperimentazione in Italia hanno confermato che la piovosità delle regioni meridionali e delle isole è sufficiente ad assicurare, nella maggior parte delle stazioni, accrescimenti soddisfacenti, o quanto meno la sopravvivenza nelle stazioni più aride.

Suolo. Per quanto riguarda il suolo, la plasticità degli eucalipti è ampiamente dimostrata dalla loro elevata capacità d'adattamento a vari tipi

di terreno: grazie all'apparato radicale che si sviluppa rapidamente sia in superficie che in profondità, soltanto su quelli estremamente degradati e poveri, calcari o superficiali, trovano difficoltà a svilupparsi.

Asportazioni. Una stima dell'entità delle asportazioni in SRF di due anni, per *Eucalyptus globulus*, viene riportata da Guo *et al.* (2002) per N, P, K rispettivamente: 7,5-0,6-4,5 Kg t⁻¹.

Figura 64 – Effetti delle basse temperature invernali su *E. globulus* (a sinistra) ed *E. camaldulensis* (a destra).



Tecnica colturale

Preparazione del terreno. Questa è sicuramente una fase molto importante per la buona riuscita degli impianti di SRF di eucalipto. La procedura seguita è la stessa già illustrata nella scheda del pioppo. Infatti, la lavorazione principale consiste di norma in un'aratura tradizionale ad adeguata profondità, oppure in alternativa in una lavorazione a doppio strato o nella sola ripuntatura-discissura profonda seguita da una energica frangizzollatura. Questa lavorazione può essere sfruttata per interrare ad adeguata profondità gli eventuali fertilizzanti che devono essere distribuiti prima dell'impianto della coltura.

I lavori di affinamento possono essere eseguiti appena prima dell'impianto. Anche i successivi lavori devono essere programmati, per tempi e modalità, e prevedono ripetuti passaggi sia per l'affinamento del terreno che per il controllo della flora infestante.

Materiale di propagazione. Per gli eucalipti si consiglia di utilizzare sementali di 3-4 mesi allevati in contenitori alveolari. Il materiale d'impianto

deve avere dimensioni tali da consentire il trapianto meccanico. Il risarcimento delle fallanze è consigliabile alla fine del primo anno in modo che la densità finale non risulti troppo inferiore a quella prefissata ed i popolamenti presentino sufficiente omogeneità.

Densità di impianto. Per quanto riguarda la densità di piantagione questa risulta strettamente connessa con l'impostazione del turno di raccolta che si vuole perseguire. Per le piantagioni finalizzate alla produzione di biomassa per fini energetici, la densità utilizzata potrà arrivare fino a 5000 piante da ettaro per turni di 2-3 anni (fig. 65); mentre per turni di 5 anni, le densità saranno comprese fra i 1000 e 1600 piante ad ettaro.

Figura 65 – Impianto di SRF di eucalipto a ciclo biennale e densità di circa 5000 piante ad ha.



Concimazione. Le necessità di nutrienti per le colture arboree sono abbastanza ridotte rispetto alle colture agrarie annuali. L'entità delle asportazioni nelle piantagioni a turno breve, pur con differenze in diversi ambienti e con specie diverse, è comunque ridotta e le reintegrazioni, per

mantenere la fertilità, da apportare al terreno per ogni t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca prodotta non vanno oltre i 4-6 kg per i tre elementi N, P e K. Tuttavia tali valori variano in base alla specie e al turno di taglio e quindi al diametro medio dei fusti e alla quantità relativa di rami che sono i fattori che maggiormente influenzano la quantità di nutrienti contenuti nella biomassa.

Irrigazione. L'irrigazione è da prendere in considerazione esclusivamente per interventi di soccorso nel primo ed eventualmente nel secondo anno di vita dell'impianto. Nel caso in cui l'eucalipto venga piantato tardivamente (fine maggio), quando ormai la probabilità di pioggia in ambienti mediterranei è ormai molto scarsa, si prevede un'irrigazione localizzata per favorirne l'attecchimento.

Controllo delle infestanti. Il controllo delle infestanti è determinante per il successo della piantagione, in particolare nella fase immediatamente successiva al trapianto che è la più delicata. Forti infestazioni mal controllate, in questa fase, andrebbero ad influenzare la produttività dell'intero ciclo colturale. Per quanto riguarda le fasi successive si fa riferimento alle modalità e ai tempi già illustrati per il pioppo.

Avversità. La resistenza degli eucalipti ai parassiti è buona. Soltanto quando una specie è coltivata in condizioni sfavorevoli, l'attacco di certi insetti può causare danni anche gravissimi. È il caso di *Phoracantha semipunctata* F. ('Tarlo dell'eucalipto') che, diffuso in molti paesi, recentemente ha fatto la sua comparsa anche in Italia. Il coleottero scava ampie e profonde gallerie sottocorticali lungo il fusto che possono provocare, nei casi più gravi, la morte rapida della pianta. Nelle stazioni con spiccata aridità estiva, risultano più vulnerabili quelle specie che sono più esigenti d'umidità e che in questi ambienti subiscono stress fisiologici che favoriscono l'attacco dell'insetto. A titolo preventivo è indispensabile svolgere uno studio accurato delle caratteristiche stagionali ed impiegare esclusivamente le specie ecologicamente adatte. Come misura di difesa dall'attacco di questo insetto è necessario eliminare tempestivamente tutte le piante colpite.

Attacchi di insetti galligeni (*Ophelimus maskelli* e *Leptocybe invasa*), entrambi originari dell'Australia, sono stati osservati in Italia negli ultimi quindici anni. Nelle piantagioni già affermate si assiste ad una riduzione evidente dell'accrescimento, mentre nei nuovi impianti gli attacchi in fase giovanile possono comprometterne la riuscita. Il primo è stato segnalato in Toscana nel 1998, oggi diffuso in tutto il territorio nazionale: attacca sia *E. globulus* che *E. camaldulensis*. Nelle piantagioni già affermate si assiste ad una riduzione evidente dell'accrescimento, mentre nei nuovi impianti gli attacchi in fase giovanile possono comprometterne la riuscita. Per il contenimento di *Ophelimus maskelli* la ricerca sta puntando sulla lotta biologica con insetti antagonisti e sull'incrocio dei cloni sensibili con le specie resistenti. Per quanto riguarda *Leptocybe invasa*, segnalato in Italia nel 2001 e oggi diffuso in larga parte del paese, la ricerca è ancora in corso.

Turno di taglio. Nelle piantagioni ad alta densità, realizzate a scopo di ricerca in Italia, le rotazioni adottate sono di 2-3 anni.

Ripristino del terreno. Questa fase, di ripristino del terreno alla fine del ciclo colturale delle SRF di eucalipto, rappresenta un importante limite per lo sviluppo delle colture legnose da energia. Per le tecniche specifiche adottate si rimanda alla scheda del pioppo, anche se nel caso dell'eucalipto bisogna tener conto del diverso sviluppo dell'apparato radicale.

Raccolta

Periodo. La raccolta della SRF di eucalipto può essere eseguita in un periodo più ampio rispetto al pioppo, considerando le peculiari caratteristiche fisiologiche di pianta sempreverde. In Italia, la sperimentazione in tal senso ha riguardato esclusivamente piantagioni di eucalipto di circa dieci anni di età, in Sicilia. È perciò necessario verificare, per le SRF di eucalipto, l'effetto sulla produttività, in particolare per quanto riguarda i tagli effettuati nei periodi estivi.

Mezzi. I mezzi utilizzati per la raccolta sono gli stessi descritti nel paragrafo dedicato ai pioppi: infatti per questa specie sono stati realizzati numerosi prototipi e non mancano macchine raccogliatrici già prodotte in serie. Considerando che le caratteristiche degli impianti sono molto simili si ritiene che gli stessi mezzi possano essere utilizzati anche per l'eucalipto (fig. 66).

Figura 66 – Esempio di cantiere con taglio-cippatura-carico contemporanei, particolare del taglio a destra.



Anche per questa specie è stato provato un prototipo progettato e costruito da CRA-ING, una macchina per il taglio e l'abbattimento di SRF con concentrazione del materiale in andane, al fine di accumulare i polloni a bordo campo. Il prototipo nella versione pre-commerciale viene descritto nel dettaglio da Pari *et al.* (2010). In questo contributo vengono individuate le tipologie di impianto per le quali la macchina riesce ad operare in modo efficiente: impianti annuali; impianti biennali di bassa, media ed alta produttività; impianti triennali di produttività bassa e media. In termini di

biomassa, il limite massimo per l'impiego ottimale della macchina risulta pari a circa 60 t a ettaro di sostanza fresca per impianti al primo taglio e 80 t a ettaro per i turni successivi. Il diametro medio, invece, non deve superare indicativamente i 70 mm e, nel caso dei tagli secondari, tale valore deve essere riferito alla media dei soli fusti principali. Impianti con diametri superiori presuppongono l'esistenza di un eccessivo numero di piante particolarmente sviluppate e quindi sollecitazioni nelle fasi di taglio e di trasporto superiori a quelle che la macchina è in grado di tollerare.

Stoccaggio. Nel caso dell'eucalipto si può supporre, come spiegato in precedenza, di ampliare il periodo di raccolta rispetto al pioppo e quindi di ridurre le spese di stoccaggio. Attualmente, però, la sperimentazione sulle SRF di eucalipto segue gli indirizzi già sperimentati per il pioppo (vedi par. 7). È necessario evidenziare come, nel caso dell'eucalipto, la presenza di foglie verdi (fig. 67) nel cippato possa portare a maggiori problemi per lo stoccaggio del materiale, a causa di processi fermentativi diversi dal pioppo. Una elevata proporzione di foglie e corteccia accelera l'attacco microbiologico, per la particolare presenza di sostanze nutritive in essi contenute.

Figura 67 – Stoccaggio di cippato di eucalipto in cumuli scoperti e particolare a destra.



Produttività

Considerato che in Italia gran parte delle piantagioni realizzate aveva come obiettivi principali quello di protezione e difesa del suolo, ancora poche sono le esperienze di SRF di eucalipto e, in particolare, non sono disponibili dati di lungo periodo. Dai primi risultati sperimentali, si può affermare che operando una rigorosa indagine stazionale ed una scelta oculata della specie, utilizzando materiale d'impianto migliorato ed effettuando una accurata preparazione del terreno le produzioni possono raggiungere risultati interessanti.

Facciotto e Mughini (2003) riportano dati di produzione riguardanti SRF di eucalipto, realizzate a scopo sperimentale in Provincia di Pisa (tab. 15). Le produzioni maggiori vengono raggiunte a densità di 5000 piante ad

162 Le biomasse lignocellulosiche

ettaro arrivando a circa 40 t di sostanza secca per ettaro in tre anni e 17 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹ in due anni. Mughini (2006) invece riferisce di risultati ottenuti in impianti sperimentali con 5000 piante ad ettaro e produzioni che nei siti migliori raggiungono 40 t di sostanza secca per ettaro a due anni.

Tabella 15 – Resa (t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹) al primo taglio, di eucalipto in SRF, in funzione di due diversi cicli di taglio (biennale e triennale) (Fonte: Facciotto, Mughini 2003).

Specie	Densità	Ciclo biennale	Ciclo triennale
<i>E. camaldulensis</i>	5000	9,25	14,21
<i>E. camaldulensis</i>	3300	4,88	8,71
<i>E. bicostata</i>	5000	7,72	12,28

Un'altra esperienza realizzata in una SRF di eucalipto nel comune di Pisa, presso il Centro di Ricerche Agro-Ambientali Enrico Avanzi, riguarda il confronto fra tre diverse specie di eucalipto (qui verranno presentate solo le due specie che hanno riportato i migliori risultati in termini di sopravvivenza) gestite secondo due diverse modalità: educazione alla fine del primo anno, *cut-back* e raccolta dopo due anni o raccolta al secondo anno senza *cut-back* (tab. 16). Considerando che il turno del ciclo produttivo era quello biennale, i risultati produttivi sono stati confrontati quando entrambe le prove hanno raggiunto il secondo anno della parte epigea: F2R2 (senza *cut-back*) e F2R3 (senza *cut-back*), dove *F_n R_n* sono fusto e radici di *n* anni. I risultati, al primo ciclo di taglio, hanno evidenziato alcune differenze fra le specie analizzate, in particolare per F2R3. *E. x trautii* mostra rese in sostanza secca (15,2 t ha⁻¹ anno⁻¹) più elevate rispetto a *E. camaldulensis*, che presenta anche valori più bassi in termini di sopravvivenza e dimensioni diametriche. Inoltre la gestione con *cut-back* sembra aver notevolmente aumentato la produzione di entrambe le specie.

Tabella 16 – Sopravvivenza, diametro alla base e resa (in sostanza secca) in due specie, con due diverse modalità di gestione. La deviazione standard è in corsivo. Le lettere diverse, lungo la colonna, rappresentano differenze significative fra le medie ($P \leq 0,05$) (Fonte: Giulietti et al. 2011).

Primo taglio produttivo senza cut-back (F2R2)			
Specie/ibrido	Sopravv. (%)	D base (mm)	Resa in s.s. (t ha ⁻¹)
<i>E. x trautii</i>	100 a	66,1 (±6,6)	16,3 (±4,2)
<i>E. camaldulensis</i>	73 b	64,8 (±6,3)	9,8 (±2,1)

Primo taglio produttivo con cut-back (F2R3)			
Specie/ibrido	Sopravv. (%)	D base (mm)	Resa in s.s. (t ha ⁻¹)
<i>E. x trautii</i>	91 a	70,8 (±2,1) a	30,4 (±3,4) a

Allo stato attuale tuttavia è indispensabile proseguire una sperimentazione volta anche a verificare la persistenza delle ceppaie sottoposte allo stress di cicli così serrati, specie se coltivati in stazioni non ottimali e sottoposti all'infedeltà del clima mediterraneo.

Usi e qualità della biomassa

Il potere calorifico superiore delle componenti – fusto, corteccia e foglie – della biomassa di *E. globulus* è rispettivamente di 19,7-19,6-24,1 MJ kg⁻¹ con una percentuale di ceneri di 1,0-3,9-5,2. È possibile osservare come, rispetto al pioppo, l'eucalipto presenti una composizione della biomassa più eterogenea fortemente influenzata dalla componente foglie, con un elevato contenuto in ceneri. La componente corteccia è fortemente influenzata dal turno di taglio: Senelwa e Sims (1999) hanno osservato su materiale dai 3 ai 5 anni come in *E. globulus* la percentuale di corteccia si riduce, da un valore del 15%, al 12% a cinque anni.

9. Robinia (*Robinia pseudoacacia* L.)

Valentina Giuliatti

Inglese: *Black locust*

Francese: *Robinier faux-acacia*

Tedesco: *Gewöhnliche Robinie*

Spagnolo: *Robinia/Falsa acacia*

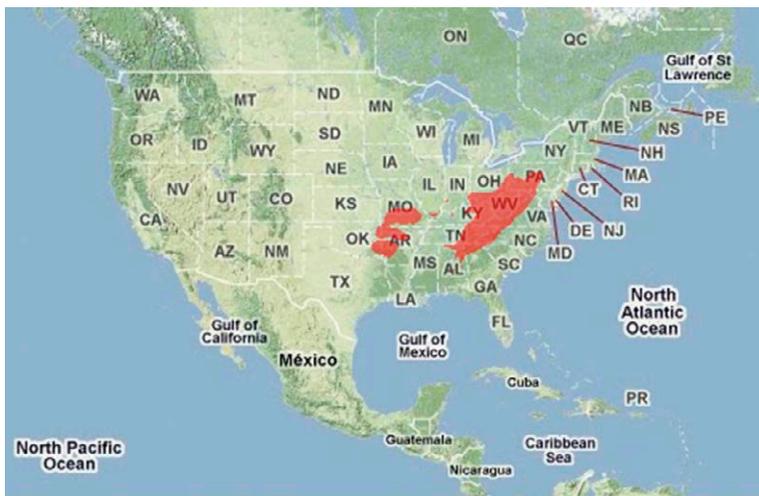
9.1 Generalità

Origine e diffusione

Il genere *Robinia* appartiene alla famiglia delle leguminose e comprende circa 20 specie tutte originarie del nord e centro America. La robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) è originaria degli Stati Uniti occidentali (fig. 68). Nei luoghi d'origine è presente in modo sporadico, dove colonizza prevalentemente terreni marginali.

La specie è stata ampiamente diffusa nel Seicento in tutta Europa come pianta ornamentale. Circa un secolo e mezzo dopo venne impiegata come specie da rimboschimento per scopi prevalentemente idrogeologici. Nel continente europeo la specie è ormai da considerarsi spontanea ed è particolarmente diffusa in Ungheria (circa 4 milioni di ha nel 2005); anche in Italia se ne registra la presenza, soprattutto lungo l'arco collinare e pedemontano del Piemonte e della Lombardia, nonché nel settore di nord-ovest della Toscana.

Figura 68 – Areale di origine della robinia.



Importanza storico-economica

L'impiego in selvicoltura della robinia è piuttosto recente. La sua diffusione, antropica e spontanea, è stata facilitata dal declino patologico del castagno che essa ha sostituito in alcune aree. Ciò nonostante, la sua presenza nelle aree boschive è ormai considerata elemento comune nella vegetazione italiana e, per le sue qualità di pianta consolidatrice del terreno, è stata soprattutto diffusa lungo le scarpate ferroviarie e stradali. In Italia la sua diffusione è avvenuta anche in terreni decisamente marginali, poverissimi e fortemente sassosi, come quelli acidi delle brughiere lombarde. Per quanto concerne i principali utilizzi, la robinia, oltre al già citato impiego a fini idrogeologici e di conservazione del suolo, è utilizzata per la produzione di paleria agricola e di legna da ardere. Come specie di interesse forestale, la forma più comune di governo della robinia è a ceduo con turni di taglio variabili in funzione della destinazione d'uso (3-5 anni per fascine e carbone, 5-7 anni per pali da vigne e 12-15 anni per legna da spacco). In alcuni paesi, la robinia è sfruttata come pianta da destinare all'alimentazione animale. Non meno importante è il ruolo che la specie gioca come pianta mellifera per la produzione del famoso, ma impropriamente detto, 'miele di acacia'.

Più recentemente la robinia ha suscitato un certo interesse anche in ambito agro-energetico come specie da Short Rotation Forestry (SRF) soprattutto come coltura alternativa al pioppo (ed ancor più al salice) negli ambienti meno fertili e con minor disponibilità idrica, in virtù della sua elevata tolleranza alla siccità, della sua elevata rusticità, della rapidità di accrescimento e della buona attitudine del legname alla combustione.

Caratteri botanici e morfologia

La robinia è una specie appartenente alla classe delle dicotiledoni (*Magnoliopsida*), all'ordine delle *Fabales*, alla famiglia delle *Fabaceae*, altrimenti dette *Leguminosae*. Il nome volgare della specie viene detto, in taluni casi, 'acacia' ma in realtà il genere *Robinia* non ha alcuna affinità con il genere *Acacia* (di cui fanno parte, ad esempio, le mimose) né con altre leguminose arboree simili alle acacie propriamente dette (*Sophora*, *Albizzia* ecc.).

La pianta è in grado di sviluppare un sistema radicale molto espanso, tanto che l'ampiezza del raggio su cui si estendono le radici è di 1-1,5 volte l'altezza dell'albero; l'apparato radicale di piante mature sembra essere in grado di spingersi a profondità superiori ai 3-5 m. Relativamente alla struttura epigeica della pianta, la robinia presenta dimensioni medie (altezza 12-18 m, diametro del fusto 30-76 cm). La specie è pollonifera e le giovani piante sono spinose (fig. 69). La corteccia delle giovani piante è piuttosto liscia, mentre a maturità assume un colore grigio-bruno ed è suberosa, caratteristica che le conferisce un'elevata resistenza al fuoco.

La robinia è in grado di riprodursi per via gamica, mediante seme, ma l'alto potenziale di diffusione della specie è principalmente riconducibile alla propagazione vegetativa (agamica) mediante la differenziazione di polloni dalle radici o dalle ceppaie.

Figura 69 – Caratteristiche della chioma e del fusto di robinia.



Esigenze ed adattamento ambientale

La robinia è in grado di adattarsi a regimi ambientali assai diversificati. In particolare la specie è nota per la sua capacità di colonizzare zone antropizzate o abbandonate (bordi stradali e ferroviari, alvei fluviali rimaneggiati dall'uomo, zone edificate ecc.), da cui è poi in grado di diffondersi a zone naturali, quali boschi, foreste e praterie.

La robinia necessita di temperature medie annue comprese tra 10 e 17 °C. Sopporta temperature minime invernali fino a -20 °C, teme però le gelate tardive che possono compromettere i giovani germogli.

La specie non tollera il ristagno idrico. Necessita di precipitazioni medie annue superiori agli 800 mm, di cui almeno 100 mm nel periodo estivo. La notevole profondità dell'apparato radicale ha però consentito alla specie di adattarsi anche a condizioni siccitose; tuttavia, con precipitazioni medie annue inferiori ai 400 mm annui, la robinia tende ad avere un portamento più simile a quello di un arbusto che non di un albero.

La robinia può crescere su un'ampia varietà di suoli; tuttavia predilige quelli permeabili, silicei, freschi rispetto a quelli calcarei, nei quali comunque è in grado di svilupparsi. È inoltre in grado di crescere in terreni salini. I terreni con tessitura estrema (troppo sabbiosi o troppo argillosi) sono i meno indicati allo sviluppo di questa coltura, così come quelli costantemente umidi; anche in fatto di reazione la robinia predilige i terreni subacidi ma si adatta bene anche a quelli acidi e a quelli con pH superiore a 7.

Per quanto concerne le esigenze nutrizionali della specie, essendo una leguminosa, essa è in grado di fissare azoto grazie alla simbiosi con batteri azoto fissatori. Esperienze condotte in Nord Carolina hanno messo in evidenza come le piantagioni di robinia siano in grado di determinare un miglioramento della qualità del suolo in termini di sostanza organica, azoto totale e azoto nitrico, rispetto ai boschi misti di *Quercus* ed hanno fatto registrare un tasso orientativo di fissazione dell'azoto pari a circa a 50, 80 e 30 kg N ha⁻¹ rispettivamente in piantagioni di 4, 17 e 33 anni, anche in condizioni di limitata disponibilità idrica.

Figura 70 – Impianto di robinia a turno biennale (Foto: Gianni Picchi CNR-IVALSA).



Tecnica colturale

Per la realizzazione di un impianto di SRF di robinia (fig. 70), le operazioni di preparazione del terreno da eseguire sono le medesime in precedenza descritte per il pioppo. In merito al materiale di propagazione da impiegare per lo stesso, possono essere utilizzate talee sia di radice che di fusto, semenzali di un anno a radice nuda o plantule micropropagate, anche se quest'ultime, ad oggi, non risultano economicamente convenienti. Il materiale d'impianto deve avere dimensioni tali da consentire il trapianto meccanico, altrimenti è necessario eseguire potature dell'apparato aereo e radicale. Si possono usare le trapiantatrici citate per il salice o quelle impiegate in orticoltura. L'impianto deve essere realizzato prima della ripresa vegetativa.

Per quanto riguarda la densità d'impianto, questa deve essere decisa in funzione del turno di ceduzione. Sembra, infatti, che densità troppo elevate (maggiori di 10000 piante a ettaro) possano influire negativamente sulla capacità di ricaccio della coltura (tab. 17). Di contro, impianti con densità pari a 1500 piante ad ettaro e turno quinquennale hanno fatto registrare rese medie annue pari a circa 7 t s.s. ha⁻¹ anno⁻¹.

Tabella 17 – Produzione annua di biomassa (ciclo biennale): confronto fra impianti a due diverse densità (Fonte: Bergante, Facciotto 2006).

Densità piante ha ⁻¹	1° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹	2° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹
12000	12,5	9,1
8000	11,1	12,5

Gli impianti a breve rotazione hanno di norma un turno di taglio variabile tra i 2 e i 4 anni con densità tra 5000 a 8000 piante ad ettaro; la spaziatura tra le file non dovrebbe scendere al disotto di 1,8 m e lungo le file mantenersi di inferiore a 1 m. Per gli impianti a rotazione media il turno si aggira intorno ai 5 -7 anni, quando i fusti hanno raggiunto un diametro di circa 15 cm. In quest'ultimo caso il taglio si realizza con attrezzature forestali tradizionali. Il turno medio presenta alcuni vantaggi rispetto alla rotazione breve: (i) dal punto di vista qualitativo i fusti raccolti presentano una minore percentuale di corteccia (le ceneri derivano per gran parte da questa); (ii) dal punto di vista quantitativo, risulta maggiore la quantità di biomassa ottenibile per unità di superficie. In questo senso, l'allungamento del turno di taglio rende economicamente conveniente anche la raccolta dei piccoli appezzamenti, perché consente di distribuire il costo di trasferimento del cantiere su una maggiore quantità di prodotto anche con superfici di raccolta esigue e permette, inoltre, di diversificare la filiera attraverso la produzione di legna da ardere.

Concimazione. Per la robinia viene effettuata una concimazione di fondo con 150 unità ad ha di P₂O₅ e K₂O. Per quanto riguarda l'azoto, è una spe-

cie autosufficiente perché, come per tutte le leguminose, sulle sue radici si sviluppano in simbiosi colonie di batteri del genere *Rhizobium* in grado di fissare l'azoto atmosferico.

Irrigazione. Essendo l'irrigazione un'operazione molto costosa, va presa in considerazione solo per favorire l'attecchimento e per interventi così detti di soccorso.

Controllo delle infestanti. È fondamentale per determinare il successo della piantagione intervenire: alcune settimane prima della preparazione del terreno con prodotti non residuali o in post emergenza precoce con sarchiature. Nell'interfila si effettua generalmente una lavorazione superficiale con estirpatori, erpici o frese che, oltre all'azione dissodante, permette l'eliminazione della flora infestante. Negli anni prima della raccolta, se lo sviluppo delle piante è stato discreto, non è necessario alcun intervento diserbante.

Il controllo chimico delle malerbe è nuovamente necessario dopo ogni ceduzione. Nell'interfila va effettuata una lavorazione con mezzi meccanici sia per interrare eventuali infestanti sia per ripristinare la sofficità del terreno compresso dal passaggio delle macchine e dei carri utilizzati durante le operazioni di raccolta; allo scopo si prestano in modo particolare gli estirpatori.

Raccolta

Periodo. La raccolta va eseguita durante il periodo di riposo vegetativo (novembre-marzo), in modo da non compromettere la vitalità delle ceppaie. Tenendo conto del contenuto idrico del materiale raccolto risulta più opportuno eseguire il taglio nel periodo invernale. Alcuni autori prevedono un'adeguata stagionatura naturale delle piante in pieno campo per facilitare la perdita di umidità prima della sminuzzatura che, se eseguita contemporaneamente al taglio, produrrebbe cippato con elevato contenuto idrico e, quindi, con alto rischio di innesco di deleteri fenomeni di fermentazione. Altri autori, invece, osservano come la robinia fornisca un combustibile molto più asciutto rispetto al pioppo, e quindi con minori problemi di stoccaggio, nella raccolta meccanica con falciatrinziacaricatrice, anche senza la preventiva stagionatura del prodotto.

Mezzi. Anche per la robinia sono utilizzabili le macchine e i tipi di cantieri già proposti per il pioppo a turno biennale (fig. 71). Nuove ricerche sono state svolte invece per turni più lunghi, 4 anni. Le falciatrinziacaricatrici modificate, attualmente in commercio, tuttavia, hanno notevoli difficoltà a raccogliere materiale legnoso con diametro superiore a 7 cm al piede, che sfugge ai convogliatori, causando inceppamenti e determinando la rapida usura della macchina. Per questo motivo è stata sviluppata una nuova macchina (BioPoplar): i fusti vengono tagliati da dischi rotanti e convogliati verso i rulli di alimentazione della falciatrinziacaricatrice da sottili barre metalliche applicate direttamente sulla faccia superiore dei dischi; la testa-

ta è progettata per lavorare su file singole e cippare fusti con un diametro basale di oltre 15 cm.

Il cantiere completo si compone quindi della falciatrinciacaricatrice e di 2-4 trattori con rimorchio per il carico del cippato e la sua movimentazione al punto di raccolta. Nella robinia la produttività oraria lorda della macchina è inferiore, circa 15 t, a quella del pioppo (31-42 t), questo è dovuto al legno più duro della robinia e alla minore distanza tra le ceppaie.

Figura 71 – Raccolta robinia a turno biennale (Foto: Gianni Picchi CNR-IVALSA).



Un problema che si può riscontrare nella raccolta della robinia è dovuto allo sviluppo di polloni al di fuori della file, a causa dell'elevata capacità pollonifera radicale.

Produttività

In condizioni di pieno campo, in zone marginali, con materiale d'impianto non selezionato sono state osservate produzioni medie di circa 5 t ha⁻¹ anno⁻¹ (dal 2° taglio) per i tre cicli di taglio analizzati (tab. 18).

Tabella 18 – Produzione annua di biomassa per tre diversi cicli di taglio: biennale, triennale e quadriennale in più di 10 anni di osservazioni (Fonte: Paris et al. 2006).

Turno di taglio	1° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹	2° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹	3° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹	4° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹	5° taglio t s.s. ha ⁻¹ anno ⁻¹
Biennale	2,2	5,7	5,3	4,8	5,7
Triennale	2,6	5,4	4	4,9	
Quadriennale	4,4	4,4	5		

Utilizzando materiale selezionato, di provenienza ungherese, la produzione media sembra poter raggiungere le 10 t ha⁻¹ anno⁻¹. Inoltre, in impianti di robinia con caratteristiche stazionali e cure colturali simili a quelle del pioppo si raggiungono produzioni maggiori con valori di 12,5 t ha⁻¹ anno⁻¹ al secondo taglio (*vedi* tab. 17).

Usi e qualità della biomassa

La biomassa legnosa di robinia, per il suo elevato potere calorifico inferiore, è considerata una buona fonte di energia e diverse ricerche hanno evidenziato valori pari a 18,2-19,8 KJ/Kg, nonché un basso contenuto di ceneri.

Il contenuto di umidità del legno alla raccolta, taglio invernale, nella robinia risulta inferiore (41%) rispetto al pioppo (53%) nelle stesse condizioni.

Considerando che legno e corteccia presentano una diversa resa energetica è importante valutare il rapporto esistente fra le due componenti nelle specie. Nella robinia la corteccia ha un'incidenza inferiore, rispetto al pioppo, sul peso dei rami e nel fusto.

10. Salice (*Salix spp.*)

Valentina Giuliatti

Inglese: *Willow*

Francese: *Saule*

Tedesco: *Weide*

Spagnolo: *Sauce*

10.1 Generalità

In questa scheda saranno illustrate le specie che risultano interessanti per la produzione da biomassa in coltivazioni specializzate in Italia. Principalmente vengono utilizzati cloni ed ibridi di *Salix alba* L. ed anche gli ibridi derivanti da *Salix babylonica* L. e *S. matsudana* Koidz. L., quest'ultime di origine asiatica.

Origine e diffusione. Il genere *Salix* comprende circa 500 specie: in Italia ne sono presenti circa 40, alle quali si aggiungono gli ibridi. L'areale del genere si estende nella zona temperata dell'emisfero settentrionale, da cui si origina gran parte delle specie, ma si trovano anche nelle Ande, Africa meridionale, Madagascar e Indonesia. L'areale di *Salix alba* L. è molto vasto: nordafricano, europeo e asiatico. In Italia è uno dei salici più comuni della fascia basale, sia allo stato spontaneo che coltivato. *Salix babylonica* e *S. matsudana* sono presenti nelle regioni a clima temperato della Cina. Quest'ultima è considerata da molti autori come una varietà o una sottospecie di *Salix babylonica*.

Importanza storica. I salici della fascia basale (di cui fa parte *S. alba*) comprendono alberi e arbusti che si addensano lungo i corsi d'acqua e che vengono coltivati come piante sparse nei campi, a filari o localmente, in impianti specializzati. Il salice bianco è da sempre largamente coltivato per la produzione di vimini, viene inoltre utilizzato per cassette ed imballaggi e nell'industria della carta.

Questa specie risulta interessante anche per interventi di ingegneria naturalistica. L'impiego dei salici nelle opere di bioingegneria è garantito dalla facilità di molte specie a riprodursi vegetativamente. A tale scopo vengono utilizzate talee legnose, prelevate direttamente in natura nel periodo invernale o allevate in vivaio per ottenere materiale omogeneo.

I salici, insieme ai pioppi, costituiscono le specie più diffusamente impiegate, in Europa ed in Italia, nei cedui a corta rotazione (SRF) da biomassa. Molta importanza, negli ultimi anni, è stata data alla selezione del materiale di propagazione, impiegando cloni selezionati per tali coltivazioni. Nell'Italia centro-settentrionale interessanti risultati di attecchimento, produzione e resistenza, sia in impianti biennali che quinquennali, si stanno ottenendo, con genotipi di *S. alba* e *S. matsudana*, oltre che con i loro ibridi. Due ibridi di *S. matsudana*, Drago e Levante per la produzione di biomassa sono stati brevettati dal CREA-PLF (Unità di ricerca per le Produzioni Legnose Fuori Foresta).

Recentemente si sta esplorando la possibilità di impiegare i salici in interventi di fitodepurazione, dove le piante sono utilizzate per ridurre la quantità di metalli pesanti o di altri elementi presenti in eccesso nel suolo. I salici sono, insieme ai pioppi, le specie che maggiormente si prestano per ottenere insieme alla funzione di fitodepurazione anche soddisfacenti produzioni di biomassa in piantagioni specializzate (Progetto BIOPROS: <http://www.biopros.info>). Associando le due funzioni si è in grado di consentire il realizzarsi di un processo positivo sia dal punto di vista ambientale che economico, portando ad una riduzione dei costi di produzione delle biomassa.

Caratteri botanici e morfologia

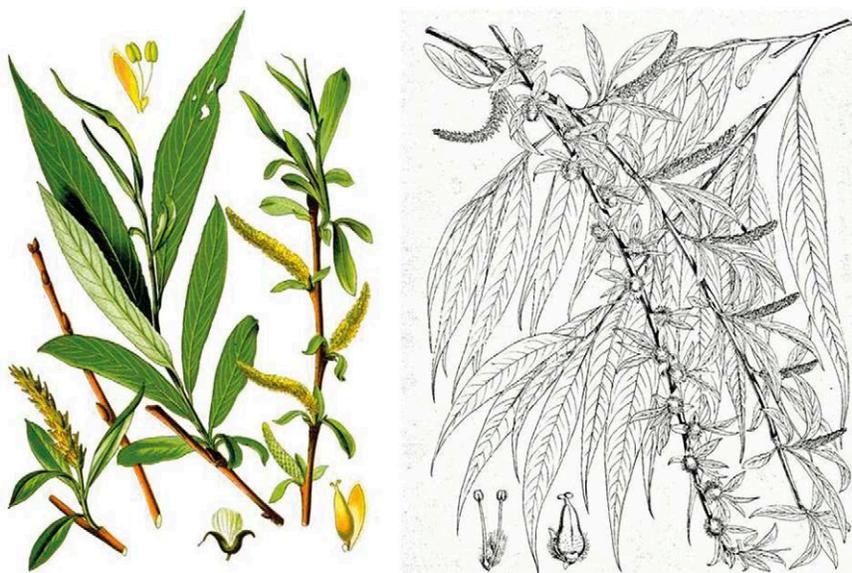
Il genere *Salix* è caratterizzato da foglie sempre indivise e bratee presenti. Le piante sono dioiche, con fiori a sessi separati riuniti in infiorescenze ad amento, talora formati fin dall'anno precedente (fig. 72).

Salix alba è un albero alto fino a 20 m e presenta una chioma solitamente ampia e leggera. La specie è provvista di corteccia grigia che a maturità mostra larghe costolature separate da profondi solchi. I rami sono eretti e i ramoscelli sono sottili e flessibili. Le foglie sono brevemente picciolate e lanceolato-acuminate. I fiori si sviluppano su brevi rami assieme alle foglie. Le brattee fiorali sono di colore giallo. L'ovario è quasi sessile e glabro.

Salix babylonica raggiunge normalmente l'altezza di 10-15 m (può arrivare a 25). I rami sono penduli e sottili, caratteristica esaltata nelle varietà

ornamentali. Le foglie sono disposte a spirale, di colore verde chiaro, strette e lunghe, appuntite, con margini finemente seghettati. fiori, come in tutti i salici, sono riuniti in amenti, che appaiono precocemente in primavera. I frutti sono capsule, con molti piccoli semi provvisti ciascuno di un ciuffo di peli bianchi e setosi.

Figura 72 – Caratteristiche botaniche di *S. alba* e *Salix babylonica* (da sinistra a destra).



Esigenze ed adattamento ambientale

Per i salici vale in generale quanto detto per i pioppi, rispetto ai quali manifestano semmai esigenze superiori in acqua, non tollerano periodi prolungati di carenza idrica, mentre sopportano maggiormente l'asfissia radicale e si adattano anche a terreni con tessitura fine. Le *Salicacee* sono specie pioniere in grado di utilizzare suoli minerali, trovano quindi un ambiente ottimale in prossimità dei corsi d'acqua.

Esigenze termiche. Valgono quelle già riportate per il genere *Populus*.

Esigenze idriche. I salici possono senz'altro valorizzare terreni frequentemente esondabili, non utilizzabili per le colture agrarie. Un studio svolto da Minotta *et al.* (2008) evidenzia come, fra i fattori analizzati, sono le precipitazioni ad influenzare maggiormente la produttività di impianti di SRF di salice (durante il primo ciclo colturale biennale). L'effetto dei parametri pedologici, anche se importanti, sembra subordinato a quello delle piogge.

Suolo. I salici ripariali, colonizzano i depositi recenti dei corsi d'acqua e dimostrano una grande rusticità, variabile da specie a specie. *S. alba* è il me-

no rustico e si allontana di poco da terreni alluvionali e ricchi di sostanza organica, evitando i terreni argillosi.

Tecnica colturale

Preparazione del terreno. La preparazione del terreno deve essere accurata, essendo una fase molto importante per la buona riuscita degli impianti di SRF. La procedura seguita è la stessa già illustrata nella scheda del pioppo. I lavori di affinamento, eseguiti appena prima dell'impianto, non devono essere troppo spinti in quanto, per i salici, si utilizzano le talee come materiale di propagazione.

Materiale di propagazione. Il materiale utilizzato per l'impianto ha le stesse caratteristiche di quello previsto per il pioppo. Si possono utilizzare sia talee che astoni, in base alle modalità e al tipo di macchina impiegato per la messa a dimora.

Densità di impianto. Densità elevate come quelle usate in Svezia per il salice, fino a 20.000 piante ad ettaro, non vengono adottate in Italia. Considerando turni da uno a tre anni, le densità variano da circa 12.000 a 7.000 piante per ettaro. Con turni di 5-6 anni la densità scende a 1.000-1.500 piante ad ettaro (fig. 74).

Figura 74 – SRF di salice (Foto: Rothamsted Research).



Le talee (o astoni) possono essere disposte in campo su file singole o binate (con distanza fra le due file intorno ai 0,75 m), a seconda del tipo di macchine utilizzate sia per le cure colturali che per la raccolta. La pri-

ma soluzione consente una migliore meccanizzazione nel controllo delle infestanti mentre la fila binata massimizza la resa delle macchine falciatrici-caricatrici semoventi. Il sesto d'impianto a fila binata non sembra apportare notevoli vantaggi da un punto di vista produttivo, come descritto da prove realizzate a Casale Monferrato (AL) (tab. 19).

Tabella 19 – Produttività in piantagioni sperimentali di salice. Confronto impianto a fila singola con fila binata (Fonte: Bergante, Facciotto 2006).

Tipo fila	Densità (piante ad ettaro)	Prod. 1° turno (t ss ha ⁻¹ anno ⁻¹)	Prod. 2° turno (t ss ha ⁻¹ anno ⁻¹)
Fila singola	10.000	13,6	10,8
Fila binata	10.000	12,2	10,7

Concimazione. Le asportazioni della SRF di salice – pur con differenze per specie ed ambienti diversi – sono ridotte, rispetto a quelle delle colture erbacee. Le reintegrazioni per mantenere la fertilità da apportare al terreno variano dai 40 agli 60 kg ha⁻¹ anno⁻¹ per i tre elementi N, P e K, in funzione della produzione annua. Fosforo e potassio vanno interrati con le lavorazioni di preparazione del terreno, mentre l'azoto va distribuito in copertura sia dopo l'impianto che dopo ogni ceduzione.

Irrigazione. L'irrigazione, essendo un'operazione molto costosa, va presa in considerazione solo per interventi di soccorso o per favorire l'attecchimento delle talee dopo l'impianto.

Controllo delle infestanti. Per il controllo delle erbe infestanti si rimanda a quanto già indicato nella scheda del pioppo.

Avversità. L'alta densità e il microclima che si crea all'interno delle SRF di salice sono condizioni favorevoli allo sviluppo di parassiti. Danni all'apparato fogliare possono essere provocati da insetti (*Asymmetrasca decedens* e *Hyphantria cunea*) e ruggini (*Melampsora* spp.), che possono provocare importanti perdite di produzione. Le frequenti ceduzioni favoriscono l'insediamento sulle ceppaie di consistenti popolazioni di insetti corticicoli e xilofagi (*Cryptorhynchus lapathi*). Importanti misure per prevenire tali attacchi sono la scelta di cloni resistenti alle principali malattie e la scelta accurata del sito d'impianto; inoltre è necessario praticare adeguate cure colturali per mantenere le piante in condizioni di buona vigoria.

Turno di taglio. I turni di taglio più diffusi negli impianti di SRF di salice sono quello biennale e triennale, anche se la sperimentazione italiana si è occupata anche di turni di ceduzione fino a 5 anni. Spesso viene praticato un taglio nell'inverno successivo all'impianto (*cut back*), per favorire la produzione di un elevato numero di polloni (fig. 75), si prosegue poi con il turno prestabilito.

Ripristino del terreno. Le difficoltà di ripristino del terreno alla fine del ciclo colturale riguardano tutte le SRF e quindi anche quelle di salice. Come

già descritto in modo dettagliato nella scheda del pioppo le migliori tecniche sono due: estirpazione o devitalizzazione delle ceppaie. Questo secondo metodo è senz'altro più economico, ma il tempo necessario per rendere il terreno disponibile per una nuova coltura è notevolmente superiore.

Figura 75 – Ricaccio di una ceppaia di salice, polloni di un anno di età (Foto: Pelleri F., CRA-SEL).



Raccolta

Periodo. La raccolta viene eseguita in un periodo limitato di tempo, da novembre a marzo, quando le piante sono in completo riposo vegetativo. Il taglio durante il periodo vegetativo potrebbe compromettere la vitalità delle ceppaie.

Mezzi. La biomassa prodotta viene raccolta e sminuzzata in modo da renderla omogenea e gestibile automaticamente dai sistemi di alimentazione delle caldaie. Si utilizzano macchine combinate in grado di eseguire contemporaneamente entrambe le operazioni, oppure cantieri separati in cui è prevista la sminuzzatura dopo l'abbattimento e l'esbosco degli alberi interi (fig. 76). Per i dettagli si rimanda alla scheda del pioppo.

Stoccaggio. Per quanto riguarda questo aspetto la metodologia adottata è la stessa prevista e già descritta per il pioppo.

Figura 76 – Taglio di una SRF di salice di due anni (Foto: Picchi G., CNR-IVALSA).



Produttività

In Italia, la produttività delle piantagioni è molto variabile oscillando da 3 a 20 t/ha/anno di s.s. alla fine del primo taglio produttivo (biennale). Per provare a risolvere tale variabilità la ricerca si è principalmente concentrata sulla selezione di cloni ad elevata produttività, ma più di recente si è riconosciuta l'importanza di indagare come le caratteristiche ambientali, quali clima e suolo, influiscono sulla crescita. Facciotto e Bergante (2011) riportano i risultati di una sperimentazione svolta a casale Monferrato (AL), su terreni sabbiosi, in SRF di salice e pioppo a ciclo biennale. Da questi risultati si osserva la maggiore produttività dei salici al secondo ciclo di taglio, rispetto al primo ciclo. Inoltre la produttività dei due cloni di salice supera, in F2R4, quella del pioppo grazie alla produzione di un elevato numero di polloni a seguito del primo taglio (tab. 20).

Tabella 20 – Produttività in piantagioni sperimentali a ciclo biennale. Confronto fra cloni di pioppo e salice, dove F_n R_n sono fusto e radici di n anni (Fonte: Facciotto, Bergante 2011).

Cloni	Sopravvivenza (%) F2R4	Resa F2R2 (t ss ha ⁻¹)	Resa F2R4 (t ss ha ⁻¹)
Orion (pioppo)	87	12,1	18,4
Levante (salice)	88	12,9	28,1
S76-008 (salice)	91	13,1	32,5

Usi e qualità della biomassa

Come riportato da Senelwa e Sims (1999), il potere calorifico superiore delle componenti legno e corteccia di *S. matsudana* x *S. alba* (1148) è rispettivamente di 19,6 e 18,7 MJ kg⁻¹, con una percentuale di ceneri di 1,1 e 5,7. Un'importante caratteristica della biomassa legnosa è il basso contenuto di ceneri rispetto alla biomassa delle erbacee, che la rende più interessante da un punto di vista qualitativo per la combustione. La corteccia, però, presenta un alto valore di ceneri e di metalli alcalini che possono incrostare la caldaia. Alder *et al.* (2005) evidenziano come la porzione di corteccia in giovani polloni (rapporto fra peso secco della corteccia e dell'intero pollone) con diametri <20 mm (a 55 cm d'altezza) è relativamente alta e varia dallo 0,2 allo 0,4 mentre nel caso di diametri >20 mm la proporzione di corteccia tende a rimanere costante intorno allo 0,2. Questo risultato dimostra come sia possibile influire sulla proporzione di corteccia con la gestione del ceduo e quindi sulla distribuzione diametrica dei polloni.

RESIDUALI

II. Disponibilità potenziali ed effettive dei residui colturali

Marco Mancini, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini

Il settore agroforestale produce una grande quantità di residui organici che in parte rientrano nei cicli produttivi come sottoprodotti, in altri casi vanno a costituire scarti di processo che devono essere gestiti e/o smaltiti. Il problema del loro riutilizzo in agricoltura è sentito già da molto tempo, tanto che nel 1915 la casa editrice Hoepli pubblicava un manuale intitolato *Residui Agricoli – utilizzazione e recuperi – cascami di fibre tessili, residui vegetali, residui animali* per suggerire le possibili utilizzazioni dei residui e dei sottoprodotti derivanti da agricoltura e agroindustria. Nel panorama attuale le biomasse costituiscono un'interessante prospettiva per la produzione di energia e per il raggiungimento dell'obiettivo strategico nazionale di produzione del 17% di energia da fonti rinnovabili come stabilito nella direttiva 2009/28/CE.

Le fonti di provenienza possono essere molteplici e le caratteristiche chimico-fisiche delle varie tipologie di biomasse sono estremamente differenti, ma questo elemento attualmente non costituisce un limite alla loro trasformazione attraverso processi di conversione energetica, siano essi di tipo fisico, biochimico o termochimico.

Il principale limite in agricoltura è attualmente rappresentato dall'elevata polverizzazione delle proprietà e quindi dei residui che ciascun

azienda ha a disposizione, che spesso riduce la convenienza economica di un recupero sistematico effettuato con appropriate macchine operatrici e con sistemi logistici di movimentazione organizzati. In tal senso è auspicabile la nascita di un mercato organizzato con lo stesso modello utilizzato per le biomasse alimentari, quindi con molti punti di ritiro e concentrazione delle produzioni ben distribuiti nel territorio. Per i residui delle coltivazioni può essere auspicabile anche la nascita di una figura nuova, quale il contoterzista, che si dedica a questa attività e che ricava parte della marginalità dalla valorizzazione economica del sottoprodotto e parte dal servizio di gestione dei residui reso all'azienda.

11.1 Le tipologie e le fonti di provenienza

Le principali fonti di provenienza sono costituite dall'attività forestale, agricola di coltivazione e allevamento oltre che dall'industria di trasformazione. In particolare possiamo riassumere le principali categorie nel modo seguente:

- Agricoltura:
 - residui delle coltivazioni erbacee (paglie cereali, paglie colza, stocchi girasole, stocchi e tutoli mais, foglie barbabietola da zucchero, steli tabacco ecc.);
 - residui delle coltivazioni arboree (potature di fruttiferi, olivo, fruttiferi a guscio, sarmenti vite ecc.);
 - deiezioni degli allevamenti (letame e liquami di suini, bovini, ovini, caprini, avicoli, cunicoli ecc.).
- Foreste:
 - residui delle utilizzazioni destinate a legna da ardere (ramaglia, cimoli ecc.);
 - residui della prima lavorazione del legno da opera (segatura, trucioli, refili, sciaveri ecc.).
- Industria agroalimentare:
 - residui oleifici (sanse, foglie);
 - residui cantine (vinacce, raspi);
 - residui industria conserviera (semi, buccette, foglie, gusci, noccioli ecc.);
 - residui zuccherifici (melasso, fettucce).

Tutte le categorie di biomassa elencate sono una risorsa distribuita sul territorio e ciò può rappresentare un punto di forza per lo sviluppo di un sistema di microgenerazione distribuita, oppure necessitano di essere concentrate per essere utilizzate da impianti di dimensioni maggiori.

Per una corretta valutazione delle risorse presenti occorre effettuare prima una stima delle potenzialità, ossia della quantità totale che annualmente viene prodotta, per poi quantificare quanta di questa può essere effettivamente resa disponibile dal comparto agroforestale.

La stima delle potenzialità può essere fatta quantificando le superfici medie coltivate, le produzioni medie che annualmente si hanno nelle differenti aree vocazionali ecc. I valori ottenuti prescindono da fattori variabili, quali l'influenza climatica sul ciclo vegeto-produttivo delle piante, le superfici annualmente coltivate e quindi le politiche di mercato. Il valore stimato fornisce quindi un'indicazione di massima che, per molte colture, può variare notevolmente di anno in anno.

Anche il passaggio a biomasse effettivamente disponibili risente di molte variabili, spesso non prevedibili, quali l'attuale utilizzo del sottoprodotto, il prezzo per impieghi alternativi, il costo di recupero e del trasporto, il frazionamento delle proprietà e quindi la difficoltà nel recupero di piccole quantità ecc.

Una stima delle biomasse residuali lignocellulosiche, di coltivazioni arboree ed erbacee, è stata effettuata a partire dalle superfici coltivate riportate nelle statistiche Istat per il periodo 2006-2010, al fine di ottenere un valore medio rappresentativo e legato da eventi climatici o economici che hanno influito sulla diffusione delle diverse colture.

I valori di produttività ad ettaro ricavati da studi bibliografici ed in particolare dal CESTAAT (Centro Studi sull'Agricoltura, l'Ambiente e il Territorio) sono stati, quindi, utilizzati per calcolare le produzioni potenziali per ciascuna provincia italiana. Per alcune colture è poi possibile legare la produttività dei residui a quella della produzione primaria sempre ricavabile dai dati Istat. Quest'ultimo passaggio consente di tenere conto della produttività delle differenti aree (province) e quindi di valutare meglio le vocazionalità territoriali.

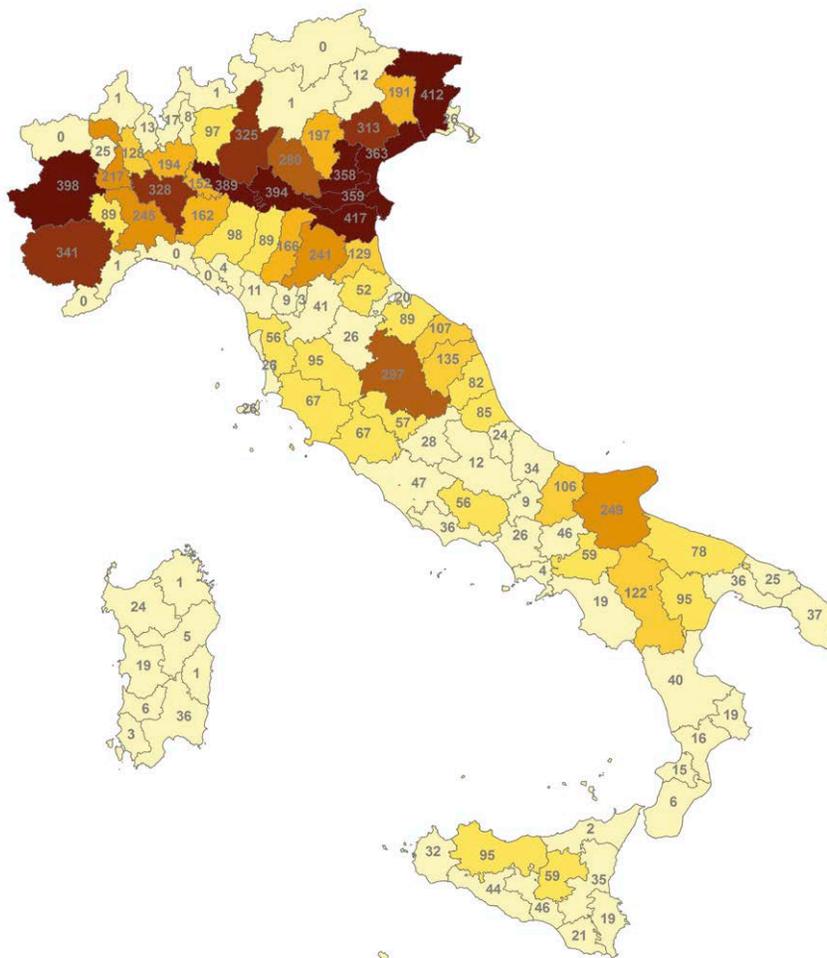
Per standardizzare le informazioni, tutti i valori di produzione sono riportati in termini di unità di peso di sostanza secca (s.s.). Le potenzialità produttive sono, quindi, state espresse in tonnellate di sostanza secca lignocellulosica (tss/anno) producibili ogni anno in ciascuna provincia o comune.

Le categorie analizzate, e di seguito riportate in forma cartografica, sono:

- residui di colture erbacee (frumento, segale, orzo, avena, riso, sorgo, cereali minori, mais, girasole, soia, colza);
- sarmenti di vite;
- potature di olivo;
- potature di fruttiferi (comprendente melo, pero, albicocco, susino, pesco, ciliegio, nettarina, nocciolo, mandorlo, actinidia, arancio, mandarino, clementina, limone).

180 Le biomasse lignocellulosiche

Figura 77 – Residui potenziali di colture erbacee: frumento, segale, orzo, avena, riso, sorgo, cereali minori, mais, girasole, soia, colza. I numeri indicano le kton/ha di sostanza secca lignocellulosica.



Vocazionalità delle aree applicata alle colture da energia

I. Aspetti generali

Giorgio Ragolini, Ricardo Villani, Federico Triana

Un aspetto saliente delle filiere agrienergetiche basate sulle colture lignocellulosiche è la loro stretta interdipendenza con il territorio e gli attori locali. Tale peculiarità rende il settore delle biomasse bisognoso di strumenti di supporto, programmazione ed incentivazione, ma al contempo costituisce un punto di forza poiché lo sfruttamento delle agrienergie può rappresentare un'opportunità per valorizzare le risorse locali, coinvolgendo il mondo agricolo, la pubblica amministrazione e l'imprenditoria. Il successo delle filiere agrienergetiche dipende infatti anche dalla presenza di un forte coordinamento tra le varie fasi produttive e i vari attori coinvolti. Infatti, l'avvio di una trasformazione degli ordinamenti produttivi a favore di filiere innovative e poco diffuse come quelle basate sulle colture dedicate da energia dipende non solo da un'adeguata maturità tecnica e tecnologica dei singoli processi, ma anche da una opportuna pianificazione territoriale basata sulla valutazione del potenziale contributo energetico che potrà derivare dall'introduzione di tali specie, quantificabile solo attraverso una stima della loro diffusione e della loro produttività.

In questo contesto si rende necessario disporre di strumenti di analisi che permettano di studiare l'attitudine di un determinato territorio ad ospitare filiere basate sulle colture dedicate da energia. A questo riguardo è necessario considerare sia l'adattabilità delle colture alle condizioni ambientali dell'area di riferimento, sia aspetti legati tanto all'uso del suolo quanto alle politiche agricole in vigore. La determinazione dell'attitudine del territorio alla coltivazione di una specie è stata affrontata, sin dalle sue prime applicazioni quali la *land capability* e la *land suitability*, comparando la natura dei fattori climatici, pedologici e topografici che caratterizza-

no l'areale, con le esigenze attribuibili alla singola coltura e valutandone il livello di compatibilità conseguente, ma nel caso di specie di nuova introduzione, come lo possono essere alcune delle colture dedicate da energia, fattori politici e economici e sociali possono essere rilevanti nella stima dell'adattabilità e spesso sono considerati a completamento dell'analisi.

Questo tipo di studi, denominato anche con il termine italiano 'analisi di vocazionalità', è stato oggetto di un crescente interesse in ambito scientifico, sia italiano che internazionale, come dimostrano i numerosi contributi prodotti in questo settore. Di seguito saranno esaminati le metodologie e gli approcci utilizzati in questo ambito di studi e successivamente sarà presentato un caso studio riguardante la Toscana.

2. Metodologie e approcci impiegati negli studi di vocazionalità

Giorgio Ragolini, Ricardo Villani, Federico Triana

2.1 La componente territoriale e la tecnologia GIS

Una discussione riguardante studi svolti a scala territoriale, come quelli trattati nel presente capitolo, non può prescindere da un riferimento alla tecnologia GIS. Nell'accezione più comunemente accettata nel nostro paese, i GIS (Geographical Information System) si configurano come software dedicati all'analisi territoriale e rappresentano uno strumento essenziale quando si intende procedere a realizzare analisi di vocazionalità.

Ciò che contraddistingue il modello di dati nella logica GIS è la possibilità, da una parte, di associare a elementi geometrici rappresentanti aree sul territorio informazioni descrittive (ad esempio, dati alfanumerici, testi, foto, disegni ecc.), dall'altra di georeferenziare ogni tipo di dato acquisito. Riguardo al primo punto si deve precisare che l'archiviazione dei dati in un sistema GIS avviene tramite il ricorso a un formato composto, grafico-tabellare, che consente di legare intimamente la geografia che delimita l'oggetto con gli attributi che gli sono propri, integrando le informazioni in un database unico. Per quanto riguarda il secondo punto, in un sistema GIS ciascun singolo oggetto viene invece delimitato in modo univoco dalle coordinate dei punti che lo descrivono; questa caratteristica, nota come 'georeferenziazione' dei dati, permette di confrontare ed eventualmente di correlare fra loro strati informativi indipendenti, purché riferibili a un medesimo sistema di riferimento geografico. Queste due caratteristiche del GIS possono essere sintetizzate nella definizione di un elaborato GIS quale 'database georeferenziato'.

La tecnologia GIS risulta fondamentale perché grazie alle caratteristiche sopra descritte permette di analizzare sinergicamente i diversi fattori che insistono su una data area attraverso la sovrapposizione di differenti tematismi, laddove per tematismo si deve intendere uno 'strato informativo' caratterizzante un dato territorio e avente una duplice natura: geometrica

nella raffigurazione grafica degli elementi presenti, e tabellare nella connessione a un database per gli attributi descrittivi degli elementi stessi.

2.2 Fasi metodologiche

Gli studi di vocazionalità richiedono dati e informazioni molto diversi a seconda della scala e del livello di dettaglio dell'analisi. Inoltre, nella letteratura scientifica è possibile trovare approcci molto diversi nell'affrontare il problema. È possibile però individuare un percorso metodologico comune, seguito a prescindere dalla complessità dello studio. Infatti uno studio di vocazionalità ripercorre normalmente le seguenti fasi:

- a. selezione delle specie oggetto di studio e definizione dei parametri bioclimatici di adattabilità;
- b. determinazione della disponibilità di superfici potenzialmente destinabili alle colture dedicate, talvolta definita come 'superficie lorda', e delle superfici effettivamente vocate alla coltivazione (superficie netta);
- c. distribuzione delle superfici vocate tra le colture prese in esame nel caso siano più di una, ovvero, processo di assegnazione di superfici a ciascuna delle colture che vengono prese in considerazione (*land-assingment*);
- d. stima del potenziale produttivo.

Il primo passaggio consiste nella selezione delle specie più promettenti per l'area di riferimento e la raccolta di informazioni sulla biologia e le esigenze ambientali caratteristiche di ognuna di queste. Le informazioni raccolte vengono sintetizzate mediante la definizione di parametri soglia legati alle principali variabili pedo-climatiche, e inserite in un database.

Nella seconda fase viene calcolata, in primo luogo, la frazione della superficie agricola potenzialmente destinabile alle colture da energia, che possiamo denominare 'superficie lorda'. A questo scopo vengono impiegati database di uso del suolo, cartografia dei limiti amministrativi e informazioni sulle aree agricole sottoposte a restrizioni legali (ad esempio, parchi naturali). Inoltre, in questa fase può risultare necessario considerare eventuali vincoli politici e sociali. Successivamente, per determinare la superficie effettivamente adatta a ospitare le colture (superficie netta) viene costruito un database cartografico contenente informazioni sulla morfologia, la pedologia e gli aspetti climatici rilevanti dell'area di studio. Questi dati consentono di valutare in quali aree vengono soddisfatti i parametri bioclimatici di adattabilità previamente definiti. È necessario ricordare che le varie informazioni territoriali impiegate per il calcolo della superficie lorda e della superficie netta sono comunemente disponibili sotto forma di cartografia digitale, e vengono gestiti ed analizzati usando la tecnologia GIS. Per poter effettuare questo tipo di analisi è necessario però definire le unità territoriali minime di studio. Quindi, in funzione del dettaglio e della qualità dei dati

cartografici disponibili e in base alla precisione richiesta dallo studio, l'area di riferimento viene suddivisa in parcelle, che costituiscono le unità geografiche a cui si riferiscono i risultati. La dimensione delle parcelle può coincidere con enti amministrativi quali i Comuni, oppure rappresentare frazioni di territorio, ad esempio corrispondere ad aree di 1 km x 1 km.

È possibile che una singola parcella risulti adatta per più specie, per cui è necessario definire dei criteri per la distribuzione della superficie tra le specie che risultano adatte alla coltivazione nella medesima unità. La terza fase di analisi consiste infatti nella definizione di criteri di 'preferenza'. Questi criteri possono basarsi, ad esempio, sulla produttività o sulla qualità della biomassa prodotta e/o su previsioni riguardanti il grado di accettabilità della coltura da parte degli agricoltori. In funzione dei criteri definiti si ottiene quindi la superficie totale che può essere attribuita a ciascuna coltura.

Questo ultimo passaggio costituisce solitamente l'ultima fase dell'analisi di vocazionalità vera e propria; tuttavia, attualmente sono sempre più comuni gli studi che si occupano anche di stimare la potenzialità produttiva delle colture dedicate nell'area di riferimento e, successivamente, considerando specifiche tecnologie di trasformazione basate sullo sfruttamento delle biomasse, arrivano anche a stime dell'energia potenzialmente ricavabile. Di fatto, oltre a conoscere come sono distribuite sul territorio le potenziali fonti di biomassa è fondamentale determinare la quantità complessiva che può essere prodotta in un dato ambito territoriale. Conoscendo 'dove' e 'quanto' è infatti possibile pianificare il dimensionamento degli impianti, così come programmare adeguatamente le fasi di stoccaggio, trasporto e logistica.

2.3 Approcci per la stima della produttività delle colture dedicate

La produzione complessiva di biomassa è funzione dell'area impiegata e della resa unitaria. A questo riguardo bisogna considerare che la resa delle colture è una variabile complessa, dipendente da numerosi fattori ambientali e agronomici. A seconda della metodologia impiegata per stimare la resa il volume di informazioni richieste può variare considerevolmente, aumentando di conseguenza la complessità globale dello studio. Infatti quello della valutazione del potenziale produttivo è il passaggio che manifesta differenze metodologiche più marcate. A questo riguardo gli approcci impiegati possono essere suddivisi in quattro gruppi:

- a. impiego di rese unitarie fisse;
- b. uso di coefficienti di resa relativa;
- c. definizione di relazioni empiriche basate sulla regressione statistica;
- d. simulazione con modelli di crescita (*crop growth models*).

La prima tipologia di studi si basa su una resa fissa, determinata sulla base del giudizio di esperti, studi del settore o dalla letteratura scientifica.

A titolo di esempio, Fiorese e Guariso (2010) hanno realizzato uno studio a scala regionale per valutare il potenziale produttivo della coltivazione di SRF di pioppo, robinia, salice e sorgo nella Regione Emilia-Romagna. Nel loro studio una volta determinata la superficie disponibile è stata definita l'attribuzione della superficie disponibile alle singole colture in base ad una regola di massimizzazione della produzione di energia attesa. Per questo scopo hanno ipotizzato percorsi specifici di conversione, considerando il costo energetico del trasporto della biomassa all'impianto di trasformazione e l'efficienza dell'impianto. In questo caso la produttività delle colture è stata considerata omogenea nell'area di studio nel tempo e ad ogni coltura è stata attribuita una resa unitaria derivata dalla letteratura.

Lo stesso approccio è stato impiegato in uno studio condotto a scala europea dalla Agenzia Europea per l'Ambiente (2006). In questo caso, l'area di studio è stata suddivisa in zone con caratteristiche pedo-climatiche omogenee e alle colture dedicate è stata assegnata una resa unitaria in relazione ad ognuna di queste. I valori di resa sono stati ricavati dalle statistiche FAO se disponibili, o in alternativa dalla letteratura dedicata. Questo studio ha fornito scenari di previsione futura per i quali le rese unitarie sono state incrementate ad un tasso annuale assumendo progressi nel miglioramento genetico delle colture.

La seconda tipologia di approccio metodologico prevede la stima delle rese unitarie basata su l'impiego di un 'coefficiente di resa relativa'. Secondo questo approccio, la resa unitaria di colture poco diffuse, come lo possono essere le colture lignocellulosiche da energia, ottenute in un contesto limitato (ad esempio centro sperimentale, parcelle dimostrative ecc.) vengono messe in relazione alla resa di colture tradizionali ampiamente diffuse nel territorio di riferimento.

In uno studio a scala regionale realizzato per la Toscana da Ragolini *et al.* (2009), il coefficiente è stato elaborato a partire dalle rese medie unitarie di frumento duro e girasole, calcolate in base ai dati Istat dal 2000 al 2007 nelle diverse province della Regione. Tale coefficiente è servito a rappresentare le 'attitudini produttive' delle dieci province, rispetto a quelle direttamente rilevate per le medesime colture nell'ambito della pianura pisana (Centro di Ricerche Agro-Ambientali "E. Avanzi" - CIRAA di San Piero a Grado). Quindi, le rese medie delle colture lignocellulosiche considerate nello studio, coltivate presso il CIRAA, sono state moltiplicate per il coefficiente di resa stimato per ogni provincia. Come risulta da questo esempio, la metodologia del coefficiente di resa relativo consente di estrapolare le conoscenze sperimentali prodotte localmente ad un territorio più ampio, impiegando dati di facile accesso (statistiche relativi alle colture tradizionali) e consentendo di simulare in parte la variabilità spaziale attesa della produttività.

La terza tipologia di studi consiste nell'impiego di modelli di regressione, detti anche modelli empirici.

In generale, i modelli di regressione sono costruiti con lo scopo di descrivere il comportamento di un sistema e di dimostrare l'esistenza di relazioni tra alcune variabili selezionate, senza però cercare di spiegare il funzionamento del sistema. Nel caso specifico, attraverso questi modelli viene stimata la produzione di una coltura come funzione di variabili ambientali chiave (ad esempio temperatura, precipitazioni, tessitura del terreno).

In questo tipo di modelli il tempo non è considerato tra le variabili, per cui le variabili ambientali considerate sono riferite all'intera stagione di crescita. Infatti variabili come quelle meteorologiche, che presentano un'alta variabilità temporale, vengo spesso considerate sotto forma di cumulata stagionale.

I modelli empirici vengono costruiti utilizzando i dati di uno o più esperimenti. Da questi dati, attraverso dei procedimenti matematici o statistici, si ricavano le equazioni del modello. Dato che le relazioni così ottenute sono pienamente valide solo per ambienti uguali o simili a quello sperimentale, la costruzione di modelli robusti per la stima delle rese colturali applicabili ad uno studio di larga scala richiede un ampio database di dati di partenza, in modo che venga tenuto in considerazione un ampio range di variazione delle variabili ambientali considerate.

Con questo metodo è possibile ottenere previsioni della produttività all'interno dell'area di studio, riflettendo la variabilità spaziale delle variabili pedo-climatiche considerate. Rispetto ai due approcci precedentemente illustrati, questo metodo consente dunque di realizzare stime specifiche per diversi areali, aumentando la precisione della stima.

Questo approccio viene spesso impiegato quando l'analisi si estende alla scala nazionale o continentale. Ad esempio Bauen *et al.* (2010) hanno realizzato uno studio di vocazionalità applicato alla coltivazione di miscanto, salice e pioppo nel Regno Unito. Lo studio ha considerato nell'analisi la produttività delle tre colture stimata per il territorio di riferimento attraverso modelli empirici previamente sviluppati da altri autori (Aylott *et al.* 2008; Richter *et al.* 2008). Lo sviluppo di questi modelli si è basato su un'analisi di regressione con il metodo dei minimi quadrati. La loro costruzione si è basata, nel caso della SRF di pioppo e salice, su dati provenienti da un network di prove sperimentali che ha coinvolto 49 località del Regno Unito, mentre nel caso del miscanto sono stati impiegati dati derivanti da 14 prove sperimentali.

Questi modelli mettono in relazione la resa alla raccolta con alcuni fattori rilevanti in termini di produttività, legati principalmente alla qualità del suolo e alle condizioni climatiche. Di seguito vengono elencate le principali variabili tenute in considerazione:

- capacità di ritenzione idrica del suolo;
- temperatura, precipitazione e radiazione incidente durante la stagione;
- numero di giorni con verificarsi di gelate;
- altitudine e pendenza.

Nello studio di vocazionalità, i modelli sono stati impiegati per realizzare mappe dettagliate di produttività, con unità minima territoriale pari a 1 km x 1 km. La metodologia impiegata in questo studio consente di tenere in considerazione la variabilità spaziale a un buon livello di dettaglio in termini di produttività.

Il principale limite di questo tipo di approccio è determinato dalla necessità di aggregare le variabili ambientali per l'intera stagione di crescita, mascherando possibili influenze di eventi localizzati nel tempo ma che possono avere un impatto rilevante sulla produttività finale della coltura (ad esempio temperature o precipitazioni estreme).

Una metodologia che permette di considerare un gran numero di fattori d'influenza sulla performance colturale è costituita dall'impiego di modelli meccanicistici per simulare lo sviluppo della coltura, questi vengono comunemente chiamati 'modelli di crescita colturale' (*crop growth models*).

Rispetto ai modelli empirici, a cui si è fatto accenno precedentemente, nei modelli meccanicistici il sistema viene descritto attraverso relazioni che hanno validità generale e che tentano di dare una spiegazione del funzionamento del sistema modellato. Un modello meccanicistico scompone il sistema nei suoi singoli processi e li descrive attraverso le equazioni più adeguate a rappresentarli. Un modello si compone quindi di un insieme di equazioni e di relazioni che le collegano. Occorre sottolineare, però, che i modelli di questo tipo normalmente contengono equazioni di tipo meccanicistico associate con equazioni empiriche in varia misura. Di fatto nei modelli meccanicistici, la rappresentazione dei livelli inferiori di organizzazione del sistema è empirica; ciò può accadere o perché non sono chiari i meccanismi che governano i processi al livello inferiore o per una scelta deliberata in rapporto agli scopi o alla facilità d'uso che si vuole abbia il modello.

I modelli meccanicistici impiegati per simulare la crescita delle colture sono di tipo dinamico, vale a dire che contengono il tempo come variabile esplicita. Questo tipo di modelli si presentano come una serie di equazioni differenziali che definiscono il tasso di cambiamento di ogni variabile di stato in funzione del tempo.

Il vantaggio dei modelli meccanicistici è che in questi le equazioni hanno un significato biologico e forniscono dunque alcune conoscenze sul sistema. Dividendo il sistema in processi ognuno caratterizzato da vari elementi è possibile sapere come ogni processo ed ogni elemento influenza il sistema. Inoltre, dato che le variabili sono calcolate in funzione del tempo, comunemente con passo temporale di un'ora o un giorno, il modello può tenere in considerazione le influenze ambientali in modo accurato.

Come ricordato in precedenza non vi è però una netta divisione tra approccio empirico e meccanicistico. Con l'aumentare del livello di utilizzo dell'approccio meccanicistico il modello riesce a migliorare la comprensione del funzionamento del sistema. Sintetizzando possiamo dire che, per previsioni di tipo interpolativo (previsione del sistema entro una ben

definita serie di dati), i modelli completamente empirici sono sufficienti (regressioni multiple). Per scopi di ricerca (identificare le aree in cui le conoscenze sono lacunose) e per previsioni estrapolative (previsioni sul sistema al di fuori dei dati utilizzati per costruirlo) i modelli devono essere meccanicistici, con alcuni elementi empirici.

Nell'ambito delle colture lignocellulosiche i modelli di crescita sono stati impiegati per realizzare studi a scala territoriale e valutare le potenzialità produttive, spesso anche in areali in cui le colture non sono state impiegate ancora in modo diffuso. In questo caso si è trattato dunque di previsioni estrapolative, necessarie in quanto alcune delle più promettenti colture lignocellulosiche sono state coltivate solo in ambito sperimentale. A tal proposito, molti studi hanno riguardato il miscanto, ritenuta una delle specie più promettenti in Europa. Ad esempio, recentemente Hastings *et al.* hanno impiegato un modello meccanicistico sviluppato per simulare la crescita del miscanto (MISCANFOR) per determinare le aree geografiche potenzialmente destinabili alla coltura in Europa (EU-27) e stimare l'energia potenzialmente ricavabile. In questo studio il modello di crescita della coltura è stato integrato con un modello volto a determinare le emissioni di gas a effetto serra e il costo energetico della coltivazione e impiego del miscanto come coltura da energia, basandosi su due diversi scenari di produzione e impiego. Lo studio è stato condotto sull'intero territorio europeo, suddividendolo in parcelle minime di studio di dimensione 5' x 5'. L'analisi è stata condotta su uno scenario di base per il periodo 1960-1990, e per 4 scenari climatici futuri.

Per ogni parcella è stato calcolato dunque la resa della coltura e le emissioni di gas a effetto serra. Nel modello colturale sono stati considerati le condizioni di carenza idrica e gelo che possono determinare il fallimento della coltura, delimitando quindi l'areale potenziale di coltivazione. Sono stati inoltre fissati dei limiti di emissioni al di sopra dei quali la coltivazione e impiego del miscanto è stato considerato non sostenibile, riducendo in questo modo l'area ritenuta idonea alla coltivazione.

I risultati così ottenuti per ogni parcella sono stati successivamente aggregati per ogni paese, fornendo quindi delle indicazioni sul potenziale della coltura attualmente e in possibili scenari climatici futuri.

3. Caso studio Regione Toscana

Giorgio Ragolini, Ricardo Villani, Federico Triana

Allo scopo di agevolare l'interpretazione dei diversi passaggi che portano alla stima delle aree vocate per la coltivazione di specie lignocellulosiche da energia, e che nell'insieme possono risultare piuttosto complessi, di seguito si riporta un esempio di analisi che utilizza l'approccio delle rese fisse, riferito all'ambito territoriale della Regione Toscana.

Nei più recenti lavori condotti dal nostro gruppo di lavoro, la determinazione dell'attitudine del territorio alla coltivazione di una coltura viene

realizzata comparando la natura dei fattori climatici, pedologici e topografici che caratterizzano l'areale di studio, con le esigenze attribuibili alla singola specie e valutando il livello di compatibilità conseguente. In considerazione però della novità rappresentata da alcune specie, pressoché sconosciute alla maggioranza degli agricoltori, si ritiene utile introdurre adeguati fattori di riduzione riguardanti l'incidenza delle superfici concretamente disponibili, nel medio-lungo termine, per una effettiva conversione alla coltivazione di specie lignocellulosiche a destinazione energetica di parte della produzione.

I lavori condotti dagli autori in questo ambito hanno spesso riguardato casi di studio relativi alla Regione Toscana, considerando un novero relativamente ampio di specie lignocellulosiche che ha incluso il pioppo (*Populus spp.*), la canna comune (*Arundo donax L.*), il miscanto (*Mischantus x giganteus Greef et Deuter*), ed il cardo (*Cynara cardunculus L.*). In questo modo si è inteso esplorare il ventaglio pressoché completo delle possibili 'colture lignocellulosiche dedicate' in Toscana, verificando anche le potenzialità di diffusione di specie meno conosciute.

3.1 Il metodo

Il processo di individuazione delle superfici occupabili dalle colture da energia da noi proposto in alcuni lavori recenti è suddivisibile in tre fasi: la prima relativa alla selezione delle superfici potenzialmente convertibili (SPC), la seconda riguardante l'attribuzione di tali superfici alla/e specie più idonee alle condizioni pedo-climatiche rilevate e la terza riguardante la definizione di una quota parte destinabile da subito alla loro coltivazione, ovvero la definizione delle superfici effettivamente convertibili (SEC). Per quanto riguarda i criteri necessari per valutare l' 'idoneità' del territorio agricolo ad ospitare le colture da energia menzionate in precedenza, si è fatto riferimento a cinque strati informativi (SI) noti per tutto il comprensorio di studio: pendenza, uso del suolo, deficit idrico potenziale, capacità di ritenzione idrica e tessitura dei terreni e utilizzati in tre successive fasi dell'analisi di vocazionalità.

Nella prima fase di selezione (fig. 1) vengono escluse le porzioni di superficie agricola che non possiedono i pre-requisiti indispensabili alla riconversione produttiva, procedendo all'esclusione di tutte le aree caratterizzate da una pendenza superiore al 15%; oltre questo limite infatti non si è ritenuto possibile ipotizzare una adeguata trafficabilità delle macchine (spesso anche piuttosto pesanti), che renderebbe di fatto impraticabile la completa meccanizzazione delle operazioni colturali. La seconda limitazione riguarda la decisione di includere come idonee le sole aree catalogate come seminativi non irrigui. Tale scelta è giustificata da due ordini di motivi: *i*) la convinzione che molto difficilmente gli agricoltori decideranno di riconvertire le aree più produttive delle proprie aziende

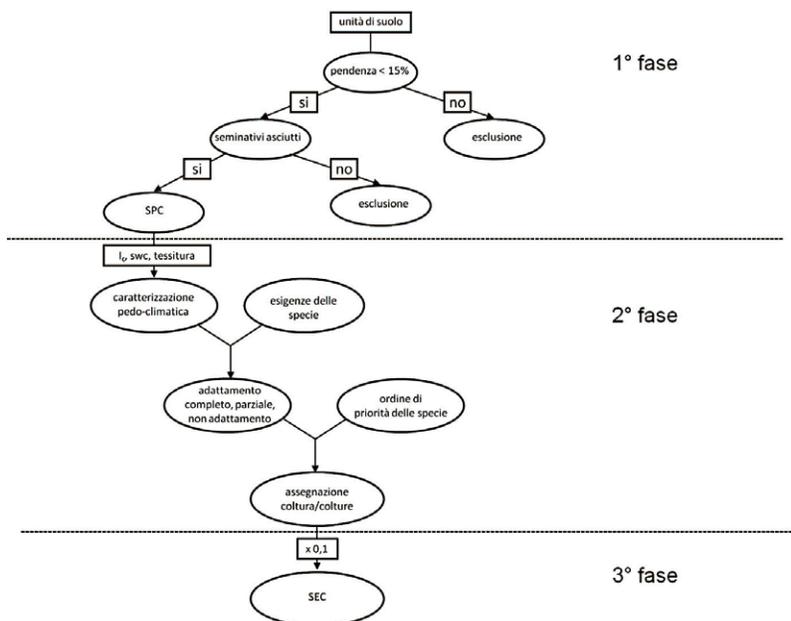
(seminativi irrigui, superfici a vite, olivo, orti, vivai ecc.); *ii*) l'assunto che non è da considerare ecologicamente proponibile l'utilizzo di una risorsa preziosa come l'acqua per la coltivazione di specie non destinate all'alimentazione umana.

La seconda fase di attribuzione di terreni all'eventuale introduzione di colture lignocellulosiche da energia consiste nella caratterizzazione delle aree che avevano superato la prima fase (SPC) sulla base dei rimanenti SI (deficit idrico potenziale, capacità di ritenzione idrica e tessitura dei terreni) da considerare determinanti nel modulare sul territorio la potenziale diffusione delle diverse specie.

Per quanto riguarda il deficit idrico potenziale (I_c), esso viene calcolato come la differenza tra sommatoria delle piogge cadute in una località in un dato periodo e la sommatoria dell'evapotraspirazione potenziale fratta la sommatoria dell'evapotraspirazione potenziale. Il deficit idrico potenziale fornisce quindi una stima orientativa dei rischi di carenza idrica attribuibili ad un dato territorio.

La possibilità di poter sfruttare le riserve d'acqua che si formano nella prima parte dell'anno (o altre che si formassero anche successivamente quando $I_c > 0$) in una località è valutata invece dalla capacità di ritenzione idrica del terreno (SWC) calcolata come la differenza tra capacità di campo e punto di appassimento moltiplicata per la profondità del suolo.

Figura 1 – Schema concettuale della metodologia adottata per l'identificazione delle superfici destinabili a colture dedicate.



Infine, la tessitura dei terreni può costituire un fattore di preferenza di tipo meccanico in relazione all'ottenimento di un adeguato investimento delle colture (a causa delle difficoltà di emergenza/attecchimento) e/o alla resistenza che può opporre al completo sviluppo degli apparati radicali.

Per quanto riguarda le esigenze delle colture prese in considerazione, queste sono state valutate sulla base dei risultati di ricerche plurienali svolte presso il Centro di Ricerche Agro-Ambientali "E. Avanzi" dell'Università di Pisa, in considerazione della varietà delle condizioni pedo-colturali che presenta e della bibliografia di settore. Sono state così esplicitate, per ciascuna specie, le esigenze espresse rispetto ai tre SI 'vocazionali' (deficit idrico potenziale, capacità di ritenzione idrica del terreno e tessitura) definendo di conseguenza le condizioni, per ciascuna località studiata, di completo adattamento, di parziale adattamento o di non adattamento alla coltivazione.

L'incrocio fra le informazioni relative alle caratteristiche del territorio regionale e quelle riguardanti il possibile adattamento delle singole specie rende possibile l'attribuzione degli ettari di superficie disponibile alla coltivazione delle colture secondo tre regole di assegnazione: *i*) in condizioni di completo adattamento di una coltura, rispetto ai tre SI 'vocazionali', si procede all'introduzione della specie caratterizzata da livelli quali-quantitativi di produzione più elevati secondo l'ordine di priorità riportato in tabella 1; *ii*) in condizioni di parziale adattamento di una coltura la superficie attribuita viene ridotta del 50% a favore della specie che occupa lo stesso ordine di priorità (se presente) o quello immediatamente seguente, andando a costituire una classe mista di coltivazione di quell'areale; *iii*) in condizioni di non adattamento della coltura anche a carico di un solo SI 'vocazionale', non viene assegnata a tale specie alcuna superficie di coltivazione.

Tabella 1 – Ordine di assegnazione delle colture (a parità di condizioni di adattamento) e caratteristiche quali-quantitative delle diverse colture.

coltura	ordine	resa areica ¹	contenuto energetico ²
pioppo	I	15.00	20.0
canna	II	24.00	18.0
miscanto	II	21.00	17.0
cardo	III	12.00	14.0

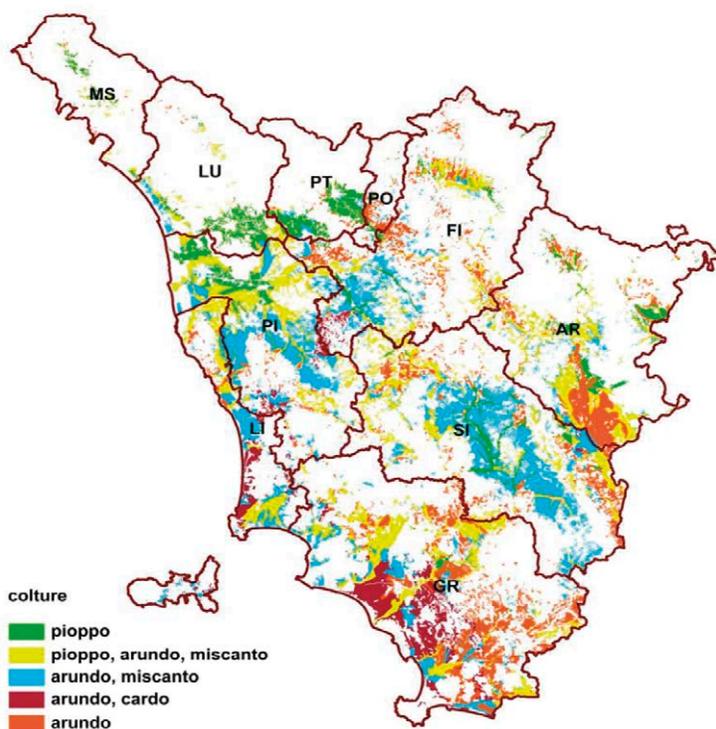
Note: ¹ Media dell'intero territorio regionale espressa in t ha⁻¹ di sostanza secca; ² Espresso in GJ t⁻¹ di sostanza secca.

Infine la terza fase di stima, introdotta per considerare i limiti imposti dalle difficoltà di operare significativi cambiamenti degli ordinamenti colturali all'interno delle aziende agricole, ma soprattutto per tenere conto di un limite massimo di sfruttamento delle SPC definendo quindi l'entità dell'effettivo tasso di conversione alla coltivazione di colture ligno-

cellulosiche da energia che è lecito attendersi. Nello scenario proposto si è assunto che l'estensione delle superfici effettivamente convertibili alla coltivazione di ogni specie ligno-cellulosica (SEC) dovesse essere stimata come pari al 10% delle rispettive aree potenzialmente convertibili. Tale percentuale è pari all'incidenza occupata in passato dal *set-aside* obbligatorio, che costituendo una porzione della SAU aziendale non coltivata, potrebbe essere verosimilmente riconvertita senza eccessive preoccupazioni da parte dell'agricoltore.

La figura 2 mostra l'elaborazione su base cartografica dei risultati ottenuti in Toscana seguendo la metodologia appena descritta.

Figura 2 – Distribuzione delle superfici assegnate alle colture dedicate risultata dall'applicazione della metodologia illustrata.



Lo sviluppo di modelli geografici integrati è parte fondamentale dei processi di pianificazione del territorio su vasta scala. Nel caso delle colture da energia tale tipo di approccio è decisivo non solo ai fini della determinazione dei possibili areali di coltivazione, ma anche per l'elaborazione di scenari di produzione finalizzati alla stima del potenziale agro-energetico dei possibili bacini di approvvigionamento.

La sostenibilità delle colture dedicate ad uso energetico

I. Aspetti generali

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Neri Roncucci

È già stato ricordato come i profondi cambiamenti che in questi ultimi decenni hanno caratterizzato la politica degli interventi al settore primario, sia a livello europeo che nazionale, abbiano sostanzialmente modificato anche la gestione effettiva dei sistemi agricoli a scala aziendale e, se in precedenza la pratica agricola si esercitava attraverso un impiego più o meno massiccio di input esterni finalizzati alla massimizzazione della produzione areica delle colture (politica comunitaria incentivante il livello delle rese), più recentemente gli agricoltori sono stati indirizzati verso un modello di sviluppo e di innovazione di processo e di prodotto che metta maggiormente in risalto la necessità di garantire la sostenibilità complessiva del sistema agricolo nel lungo periodo. Per raggiungere tale obiettivo, assumono un ruolo fondamentale non solo gli aspetti legati alla produzione primaria tradizionalmente destinata all'approvvigionamento di cibo, ma anche il complesso delle indicazioni progettuali insite nel termine di 'agricoltura multifunzionale' e, quindi, la valutazione dell'eventuale utilizzazione *no-food* delle produzioni agricole, la difesa dell'ambiente, della salute umana e, in sintesi, della qualità della vita (aspetti sociali).

Tenendo conto di quanto sopra, appare evidente che un simile progetto è senz'altro valido anche per i sistemi agricoli che si aprono alle colture agrarie a prevalente destinazione energetica nei quali è intuitivo come la biomassa, dovendo essere impiegata come alternativa alle fonti energetiche non rinnovabili, debba essere prodotta ancor più ottimizzando gli input colturali che derivano e/o necessitano del consumo di combustibili fossili (concimi, impiego di macchine agricole ecc.); e garantendo quindi la massima efficienza energetica e la riduzione delle emissioni di gas serra, senza tralasciare l'economicità del sistema.

In questo contesto, l'applicazione dei bilanci agro-ambientali ai sistemi colturali (considerati questi ultimi come l'interazione completa fra le colture dell'ordinamento produttivo ed il livello degli input a queste applicato) come il bilancio energetico, il bilancio idrico e quello dei gas serra, unitamente a quello economico, forniscono senz'altro una serie di informazioni di fondamentale importanza per pianificare l'impiego delle risorse dell'agroecosistema e per operare in proposito una più attenta analisi della sostenibilità effettiva dei processi produttivi a scala diversa.

Di seguito, vengono sinteticamente presentate le principali metodologie che è possibile seguire per rendere effettivamente valutabili le colture da energia a scala diversa e attraverso le differenti possibili chiavi di lettura. È opportuno ricordare che, nella valutazione della sostenibilità dei sistemi colturali, i risultati dell'analisi sono inevitabilmente influenzati dalla scala di riferimento prescelta e dagli interessi del decisore che è chiamato a utilizzarli. Con questa prospettiva è possibile, per ogni scala di interesse, individuare un pool d'indicatori capace di evidenziare la sostenibilità del sistema. È evidente quindi che se i destinatari della valutazione a scala globale sono organizzazioni sovranazionali, come ad esempio la Comunità Europea, saranno privilegiate le informazioni riguardanti gli effetti dell'impiego delle biomasse a destinazione energetica in termini di bilancio della CO₂ e di riduzione di altre emissioni nocive nell'atmosfera, di incremento della biodiversità, di minor ricorso a fonti di energia non rinnovabile. A scala territoriale l'approccio di interesse è quello del governo del territorio. In questo caso tendono ad essere privilegiati indicatori tipicamente agronomici, quali la conservazione del suolo, la salvaguardia delle risorse idriche o gli aspetti paesaggistici. Infine, a livello aziendale, sono inevitabilmente prioritarie le valutazioni concernenti il bilancio economico delle colture, il mantenimento della fertilità del suolo, la necessità di riorganizzazione aziendale, la stabilità delle rese (tab. 1).

Tabella 1 – Esempi di indicatori di sostenibilità agroambientale a differente 'scala' (Bonari et al. 2004b).

Scala globale	Biodiversità
	Bilancio CO ₂
	Riduzione altre emissioni
	Bilancio energetico
Scala territoriale	Conservazione del suolo
	Tutela risorse idriche
	Valori ricreativi e paesaggistici
Scala aziendale	Bilancio economico
	Conservazione fertilità terreno
	Fabbisogno di lavoro umano e meccanico
	Stabilità delle rese
	Flessibilità ordinamento produttivo

2. I bilanci agroambientali

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Neri Roncucci

Un elemento di sostanziale importanza per la valutazione dell'accettabilità ecologica di un processo produttivo agricolo è il bilancio energetico, attraverso il quale vengono valutate a livello di produzione primaria e adeguatamente ponderate anche nell'ambito della filiera sia l'energia complessivamente ottenuta (output) come prodotto utile (o come biomassa totale) che quella non rinnovabile (input) consumata per ottenere quella stessa produzione. Se per i sistemi agricoli tradizionali la redazione del bilancio energetico è uno strumento ideale anche per l'ottimizzazione della gestione tecnica delle colture per limitare il consumo di energia fossile e ridurre così sia l'impatto ambientale che i costi colturali, per i sistemi agricoli a destinazione energetica, chiamati a sostituire/integrare le fonti fossili di energia, esso assume un'ulteriore importanza in quanto appare in questo caso ancor più necessario conoscere le effettive potenzialità produttive ricavabili dal sistema in termini di energia netta. Inoltre, le informazioni riguardanti il flusso di energia che caratterizza sistemi produttivi agricoli a destinazione energetica possono essere impiegate anche come strumento decisionale da parte dei diversi soggetti coinvolti nella filiera (agricoltori, produttori di energia, decisori politici ecc.) sia in termini di presenza e scelta delle colture che di definizione della strategia produttiva a livello aziendale, sia per le scelte a livello territoriale allorché si impieghi nella definizione di differenti scenari alternativi finalizzati al miglioramento dell'efficienza energetica di un'area d'interesse, sia – infine – a livello nazionale allorché può servire come strumento di valutazione per le diverse scelte possibili nella definizione delle linee politiche di intervento in materia.

La valutazione dell'energia immessa nel sistema produttivo agricolo prende in esame sia quella relativa ai diversi mezzi tecnici impiegati (concimi, fitofarmaci, sementi ecc.), sia quella consumata nel complesso degli interventi e delle lavorazioni meccaniche (consumi di gasolio e per la costruzione delle macchine agricole) previste dal sistema produttivo adottato. In generale, poi, gli input energetici che caratterizzano un sistema sono classificati in diretti ed indiretti: *i*) i diretti, nel caso di un sistema colturale, sono rappresentati dall'energia spesa direttamente in azienda durante le diverse operazioni colturali (consumi di gasolio e olio lubrificante); *ii*) gli indiretti sono invece quelli relativi all'energia consumata al di fuori dell'azienda agricola per realizzare i mezzi tecnici impiegati nelle diverse operazioni colturali (ad esempio, manifattura delle macchine agricole).

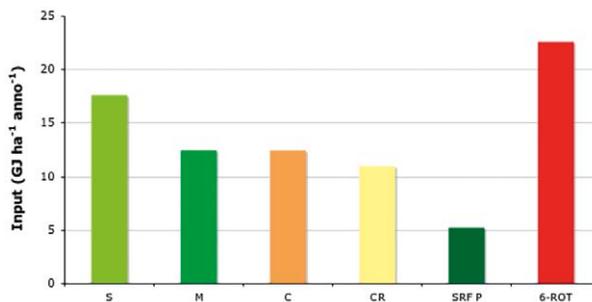
Per quanto concerne la stima dei costi energetici relativi alla produzione dei mezzi tecnici, sono spesso utilizzati dei coefficienti che tengono in considerazione l'energia consumata per unità di peso del mezzo tecnico prodotto, siano essi sementi fertilizzanti o diserbanti. A questi devono es-

sere sommati i costi energetici relativi ai consumi di gasolio per le diverse operazioni colturali che, a loro volta, sono influenzati da molteplici fattori (tipologia di suolo, pendenza, livello di umidità ecc.).

Alcune recenti valutazioni inerenti il bilancio energetico di differenti colture dedicate alla produzione di biomassa di possibile introduzione in sistemi colturali a destinazione energetica (sorgo, miscanto, canna, cardo e SRF di pioppo) sono state eseguite utilizzando dati ricavati da sperimentazioni di lungo periodo realizzate nella pianura pisana a partire dai primi anni Novanta.

Queste hanno evidenziato risultati di notevole interesse sia in ordine alla quantità netta di energia prodotta per unità di superficie, sia in termini di efficienza energetica assoluta delle differenti colture, sia – infine – per quanto riguarda la ‘redditività’ delle une rispetto alle altre. Di seguito sono riportati i valori degli input colturali necessari per la coltivazione di alcune tra le principali colture a destinazione energetica annuali (sorgo), perenni erbacee (miscanto, canna comune e cardo) e arboree (SRF di pioppo gestita con turno di ceduzione triennale T3) a confronto con una rotazione sessennale (barbabietola, frumento, sorgo zuccherino, girasole, frumento e set aside) in coltura asciutta (fig. 1).

Figura 1 – Valore medio annuo degli input totali impiegati per la coltivazione di una rotazione sessennale (6-ROT) a confronto con quelli relativi a pioppo (SRF-P), cardo (CR), canna comune (C), miscanto (M) e sorgo da fibra (S); per il pioppo è stato preso in considerazione un turno di ceduzione triennale.



Dai dati di cui sopra emerge chiaramente come le colture erbacee annuali cerealicole ed industriali, di norma inserite nei nostri sistemi colturali come colture a destinazione alimentare (e talvolta considerate anche come potenziali specie a destinazione energetica), richiedano mediamente un più elevato consumo di energia (> 20 GJ ha⁻¹ anno⁻¹) rispetto alle colture erbacee annuali e poliennali specifiche per la produzione di biomassa (con le quali si realizza un risparmio di circa il 20% per il sorgo da fibra e del 45% per canna comune e miscanto). Un livello di impiego degli input ancora minore si può registrare con il cardo (-50%) e ancor più (di oltre il 70%)

nel caso della SRF di pioppo con turno di ceduzione triennale. Com'è evidente, le differenze aumentano passando da colture annuali a colture poliennali come conseguenza di molteplici fattori: *i*) nelle pluriennali i costi energetici legati alla preparazione del suolo e alle operazioni d'impianto della coltura vengono distribuiti sull'intero ciclo colturale (mediamente 12 anni), mentre nelle colture annuali questi sono una voce di costo che si presenta ad ogni ciclo di crescita; *ii*) come colture da biomassa a destinazione energetica sono state selezionate soprattutto specie, sia erbacee che legnose, più rustiche, con un elevato ritmo di accrescimento e con esigenze nutrizionali piuttosto limitate; il che consente di ridurre i costi energetici nell'uso dei fertilizzanti, di registrare quasi sempre una buona competitività nei confronti della flora spontanea ed una adeguata resistenza agli attacchi patogeni e, quindi, di limitare molto l'impiego ordinario di prodotti chimici per la difesa delle colture. Tutti questi fattori, oltre a garantire una riduzione degli input colturali, permettono anche di limitare i rischi di impatto ambientale delle coltivazioni a tutto vantaggio del loro eventuale inserimento nei sistemi agricoli.

Per quanto riguarda la suddivisione tra costi energetici diretti ed indiretti è emerso come tendenzialmente i diretti rappresentino più del 50% dei costi totali con percentuali maggiori nelle colture annuali rispetto alle perenni (65-80% vs 50-60%).

La quantità di energia ricavabile dai diversi sistemi colturali analizzati (output) è di norma calcolata come prodotto della resa utile della coltura per il suo potere calorifico inferiore; quest'ultimo è determinato attraverso un'analisi specifica che misura la quantità di calore prodotta dalla biomassa sottoposta a combustione in condizioni date di pressione e temperatura (tab. 2).

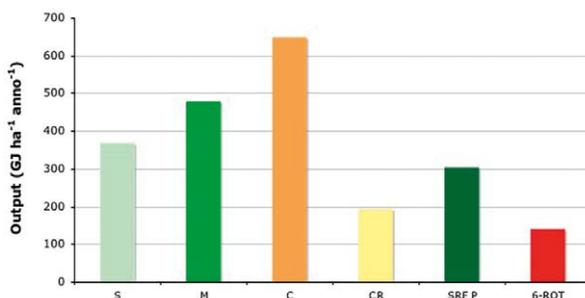
Tabella 2 – Potere calorifico di alcune biomasse ottenute da colture a destinazione energetica e da altre colture *food* tipiche della pianura pisana.

Coltura	Potere calorifico (MJ kg ⁻¹)	Coltura	Potere calorifico (MJ kg ⁻¹)
Sorgo da fibra	16	Barbabietola	radici 2,9
Cardo	15		residui 11,7
Canna comune	17,6	Fumento	granella 13,4
Miscanto	17,7		paglia 17,6
Pioppo	18,5	Sorgo	granella 12,4
		zuccherino	stocchi 16
		Girasole	granella 21,8
			residui 15,8

Gli studi di lungo periodo condotti nella pianura pisana sui sistemi colturali descritti in precedenza in coltura asciutta, ha mostrato valori di output (fig. 2) decrescenti passando dalla canna comune (oltre 600 GJ ha⁻¹

anno⁻¹) alla rotazione sessennale (circa 140 GJ ha⁻¹ anno⁻¹); questi sono risultati piuttosto elevati sia per il miscanto che per il sorgo - rispettivamente 480 e 370 GJ ha⁻¹ anno⁻¹ - mentre valori più bassi, più vicini a quelli delle colture annuali (circa 190 e 300 GJ ha⁻¹ anno⁻¹) sono stati registrati per il cardo e per la SRF di pioppo.

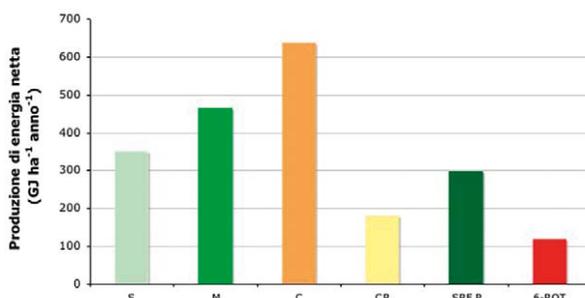
Figura 2 – Valori medi annui di output ricavabili dalla coltivazione di una rotazione sessennale (6-ROT) a confronto con quelli relativi a pioppo (SRF-P), cardo (CR), canna comune (C), miscanto (M) e sorgo da fibra (S); per il pioppo è stato preso in considerazione un turno di ceduzione triennale.



Come in precedenza accennato, l'energia impiegata per la realizzazione di un sistema colturale e quella che è possibile ricavarne non possono essere i soli indici energetici utilizzati per operare delle valutazioni esauritive in merito alla sostenibilità delle proposte alternative. L'entità dell'energia spesa per la realizzazione di una coltura agraria fornisce senz'altro indicazioni utili per la stima dell'impatto ambientale di questa in termini di sfruttamento di fonti fossili di energia, ma nelle colture dedicate ad uso energetico questo indice deve necessariamente essere affiancato anche dalla stima della produzione di energia netta (output-input) e dalla valutazione dell'efficienza energetica (output/input), che forniscono entrambe ulteriori informazioni in merito alla capacità del sistema di produrre energia in senso assoluto (fig. 3).

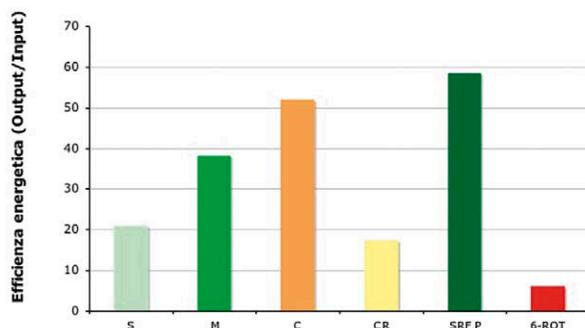
I valori di energia relativi alle differenti colture evidenziano come l'energia netta aumenti, anche notevolmente, passando dalla rotazione sessennale *food* alle colture da biomassa a destinazione energetica e come, anche tra queste ultime, si riscontri un ampio *range* di variazione. Infatti, se il cardo presenta valori piuttosto bassi (circa 180 GJ ha⁻¹ anno⁻¹), maggiori solo del 35% rispetto alla rotazione sessennale, e la SRF di pioppo e il sorgo da fibra - rispettivamente con 300 e 350 GJ ha⁻¹ anno⁻¹ - dimostrano di essere in grado di incrementare la produzione netta di energia del 60-65%, le *performances* delle erbacee poliennali appaiono ancora una volta notevolmente superiori, con una produzione media di energia netta di oltre 450 GJ ha⁻¹ anno⁻¹ per il miscanto e di oltre 600 GJ ha⁻¹ anno⁻¹ per la canna comune.

Figura 3 – Valore medio di energia netta prodotta attraverso la coltivazione di una rotazione sessennale (6-ROT) a confronto con quelli relativi a pioppo (SRF-P), cardo (CR), canna comune (C), miscanto (M) e sorgo da fibra (S); per il pioppo è stato preso in considerazione un turno di ceduzione triennale.



Fondamentale, per il confronto tra diversi sistemi colturali, risulta essere anche la stima dell'efficienza energetica, ovvero della quantità di energia prodotta per unità di energia immessa nel sistema (output/input); ed a tale proposito anche l'attività sperimentale sin qui condotta ha reso evidente come rispetto alle tradizionali colture annuali l'adozione di specifiche colture da biomassa a destinazione energetica possa comportare un aumento dei valori di questo parametro (fig. 4).

Figura 4 – Valore di efficienza energetica relativo alla coltivazione di una rotazione sessennale (6-ROT) a confronto con quelli relativi a pioppo (SRF-P), cardo (CR), canna comune (C), miscanto (M) e sorgo da fibra (S); per il pioppo è stato preso in considerazione un turno di ceduzione triennale.

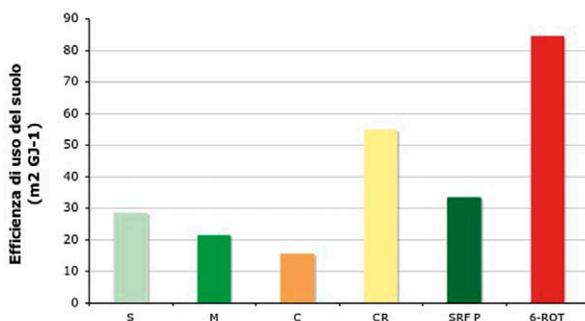


L'efficienza energetica cresce di circa 3 volte passando dalla già ricordata rotazione sessennale alle colture annuali da biomassa come il sorgo e/o alle perenni come il cardo ed ancor più se confrontata con quella del miscanto; appare evidente però che la canna comune e la SRF di pioppo sono caratterizzate da una efficienza energetica ancora più elevata (con un rap-

porto output/input di oltre 50). E ciò avviene per cause diverse: nella canna comune questo è determinato prevalentemente dalle elevate capacità produttive di questa coltura che ha fatto registrare rese medie intorno alle 37 t ha⁻¹ anno⁻¹ di sostanza secca, mentre per la SRF di pioppo l'adozione di un turno di ceduzione triennale permette di contenere molto i costi energetici (le operazioni di raccolta e la fertilizzazione azotata vengono in questo caso effettuate ogni tre anni e non annualmente come per la canna comune) e quindi di aumentare l'efficienza energetica del sistema.

Nel caso delle colture da energia assume un ruolo fondamentale nella valutazione della sostenibilità di queste anche l'uso del suolo (inteso come quantità di terreno agrario consumato per produrre l'unità di energia) associato a un dato sistema culturale. Infatti, essendo il suolo una risorsa limitata e dovendo essere comunque garantita la superficie da destinare alla produzione di colture *food*, è sempre più opportuno individuare sistemi culturali in grado di ottimizzarne l'impiego. I valori riportati in figura 5 mettono in evidenza come una rotazione ampia comprendente colture annuali a destinazione cerealicolo-industriale ma potenzialmente impiegabili anche per la produzione di energia come barbabietola, frumento, sorgo zuccherino e girasole richieda più di 80 m² per produrre un GJ di energia, mentre sempre per una coltura annuale da biomassa, come il sorgo da fibra, questo valore si riduce drasticamente a circa 28 m² GJ⁻¹. Nel caso delle colture pluriennali, appare evidente come il cardo sia caratterizzato da un valore di efficienza dell'uso del suolo inferiore alla canna comune ed al miscanto (rispettivamente pari a circa 50, 16 e 20 m² GJ⁻¹). Tale differenza è dovuta principalmente alle modeste capacità produttive fatte registrare da questa specie nella pianura pisana dove la resa è stata mediamente inferiore di oltre il 50% rispetto alle altre.

Figura 5 – Efficienza dell'uso del suolo di colture dedicate ad uso energetico quali pioppo (SRF-P), cardo (CR), canna comune (C), miscanto (M) e sorgo da fibra (S) a confronto con una rotazione sessennale (6-ROT); per il pioppo è stato preso in considerazione un turno di ceduzione triennale.



Per quanto sin qui esposto, sembra, quindi, che l'adozione di colture erbacee pluriennali permetta non solo di ottimizzare meglio la produzione di energia garantendo una più elevata efficienza energetica rispetto alle annuali ma garantisca anche un'ottimizzazione dell'uso del suolo per unità di energia prodotta.

I rischi connessi con l'esauribilità delle fonti fossili di energia insieme all'ormai consolidata evidenza scientifica del legame tra il loro eccessivo utilizzo e i rischi di cambiamenti climatici hanno fatto sì che, nella ricerca di fonti di energia alternative in grado di ovviare agli inconvenienti precedentemente descritti, anche la attenta valorizzazione delle biomasse agricole (comprese le diverse biomasse residuali di origine forestale ed agroindustriale) ed in questo contesto anche le colture dedicate, potessero emergere come una opportunità da non sottovalutare per le aziende agricole, assumendo tra l'altro un ruolo di notevole importanza nel conferire nuovo lustro alle aree rurali e nel contribuire allo sviluppo di nuove tecnologie.

Numerosi sono gli autori che confermano la concreta possibilità per l'agricoltura italiana di contribuire alla riduzione delle emissioni di gas serra prevista per il nostro paese e – all'interno di questo contesto – di conseguire una riduzione delle emissioni stesse anche attraverso l'impiego di colture dedicate per la produzione di biomasse a destinazione energetica al posto di combustibili fossili. Tali valutazioni sono state supportate anche da analisi LCA (Life Cycle Assessment) realizzate sulle potenzialità di alcune tra le più promettenti colture impiegabili in diverse tipologie di filiere 'energetiche' (combustione, gassificazione, produzione di biocarburanti ecc). Al momento i risultati disponibili, pur concordando sull'effetto benefico delle biomasse, non permettono di quantificare perfettamente tale riduzione in quanto risentono della mancanza di una metodologia definita e perché, a loro volta, sono influenzati: dalla filiera di riferimento, dalla scelta dei confini del sistema analizzato, dalla tipologia di biomassa impiegata e dalla tecnica colturale con cui essa è stata prodotta. Una particolare attenzione è stata riservata alla SRF di pioppo, evidenziando come questa sia in grado di ridurre mediamente le emissioni di circa 24 volte rispetto all'impiego del carbone.

Quando si fa riferimento alle emissioni di gas ad effetto serra legate al settore agricolo, non ci possiamo comunque limitare alla sola anidride carbonica; in particolare, a livello nazionale, l'agricoltura contribuisce alla produzione di circa il 7% delle emissioni totali, dove i principali gas serra sono il metano (CH_4) ed il protossido di azoto (N_2O).

In estrema sintesi si può rilevare che: *i*) l'agricoltura rilascia nell'atmosfera significativi quantitativi di CO_2 , in gran parte dovuti alla degradazione della sostanza organica presente nel suolo ad opera dei microrganismi tellurici; *ii*) il metano è prodotto dalla decomposizione della materia organica in condizioni di anaerobiosi, come avviene nel processo digestivo dei ruminanti o nel terreno sottoposto alla coltivazione del riso e, quindi, in condizioni di allagamento; *iii*) il protossido d'azoto è generato dalla trasformazione mi-

crobica dell'azoto derivante dai concimi impiegati, o naturalmente presente nel suolo agricolo, e tale fenomeno aumenta nel caso in cui gli apporti siano superiori al fabbisogno delle colture e in condizioni di elevata umidità. Le emissioni di gas serra sono quindi strettamente correlate alla gestione agronomica delle diverse colture: l'aumento del livello di intensificazione colturale, infatti, se da un lato permette di incrementare la produttività del sistema produttivo, dall'altro lato comporta un aumento delle emissioni di gas serra ed in quest'ottica, la riduzione degli input legati alle lavorazioni del terreno e l'impiego di minori quote di fertilizzanti appaiono fondamentale per contenere le emissioni stesse per unità di superficie e per unità di prodotto.

Anche a questo proposito abbiamo voluto confrontare le emissioni di gas serra legate alla sola fase di coltivazione delle diverse tipologie di sistemi colturali già presentati e discussi: colture annuali e colture perenni erbacee ed arboree a destinazione energetica rispetto ad una rotazione sessennale con colture annuali da seminativo non irriguo tipiche della pianura pisana (fig. 6). Per ciascuna delle operazioni colturali sono stati registrati i consumi di gasolio e, nel caso delle concimazioni, le quantità di fertilizzanti effettivamente distribuite ed i relativi dati sono stati successivamente convertiti in equivalenti di CO_2 utilizzando come base metodologica le *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006 Guidelines)*. Osservando i primi risultati della stima relativa alla quantità di emissioni di gas serra annualmente immesse in atmosfera dai diversi sistemi colturali posti a confronto, emerge – anche in questo caso – una notevole differenza fra le colture, con valori che vanno da 1400 a poco più di 400 $\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. Le colture annuali 'tradizionalmente food' inserite nella rotazione sessennale sono caratterizzate da valori in media leggermente più alti rispetto ad una coltura energetica annuale come il sorgo (-16%); nelle colture pluriennali da biomassa tali emissioni tendono a diminuire fortemente (nella canna si scende a circa 800 $\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ e per la SRF di pioppo a circa 460 $\text{kg CO}_2 \text{ eq ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$). Come è già stato posto in evidenza in termini di bilancio energetico, la differenza sostanziale tra la coltura arborea e quella erbacea è imputabile alla diversa gestione colturale: il turno di ceduzione triennale del pioppo fa ridurre le operazioni (raccolta meccanica e concimazione) che più contribuiscono alle emissioni di gas serra, mediamente costituite per il 67% da protossido di azoto (N_2O) e per il restante 33% da anidride carbonica (CO_2) (fig. 7).

I risultati relativi al bilancio energetico combinati con quelle derivanti dalle emissioni di gas permettono di osservare (fig. 8) come le tradizionali colture cerealicolo-industriali siano caratterizzate da una più elevata produzione di gas serra per Giga joule di energia prodotta (circa 12 $\text{kg CO}_2 \text{ GJ}^{-1}$) rispetto alla coltura, sempre annuale, del sorgo da biomassa (3,4 $\text{kg CO}_2 \text{ GJ}^{-1}$); relativamente alle colture da biomassa a ciclo poliennale, invece, si registra che tale indice scende vertiginosamente al di sotto dei 2 $\text{kg CO}_2 \text{ GJ}^{-1}$ con valori di poco inferiori nella canna comune rispetto alla SRF di

pioppo. Le considerazioni esposte permettono di affermare che anche in ambiente mediterraneo la produzione di biomassa attraverso l'impiego di colture dedicate, in particolare colture a ciclo pluriennale, sia arboree che erbacee come il pioppo e la canna comune, può rappresentare un valido contributo alla riduzione delle emissioni di gas serra nell'atmosfera, anche in virtù delle loro elevate capacità produttive anche in condizioni di limitati input culturali. I risultati sin qui esposti concordano con quanto riportato da studi condotti in Europa, in cui colture a destinazione energetica annuali e perenni sono state messe a confronto valutando l'entità delle emissioni di gas serra attraverso misure dirette dei flussi provenienti dal suolo.

Figura 6 – Confronto tra valori di emissioni di gas serra di una rotazione sessennale (6-ROT) con sorgo da fibra (S), canna comune (C), SRF di pioppo (SRF-P) a confronto con quello caratteristico.

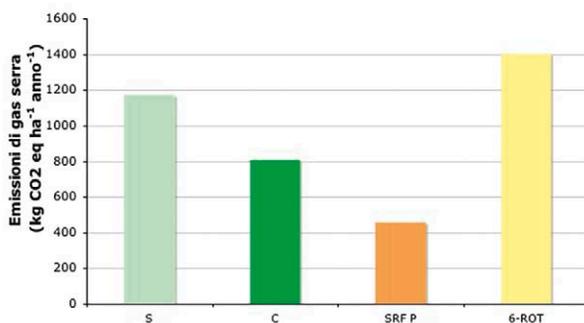
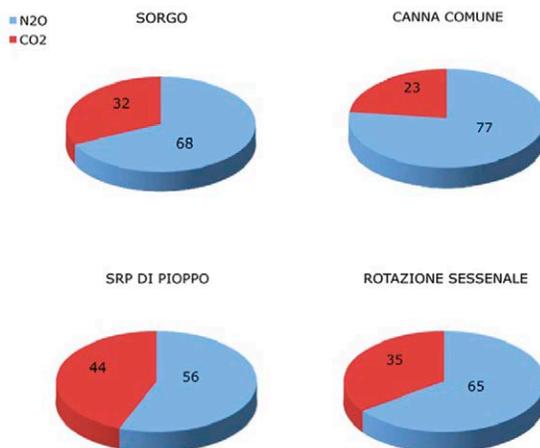


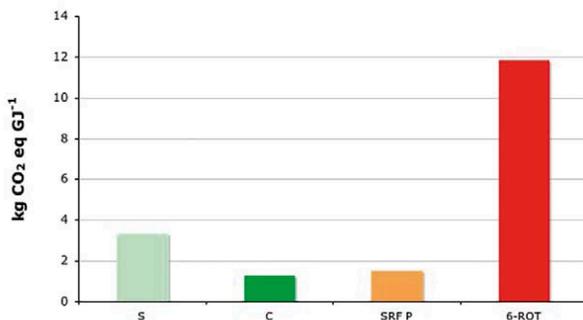
Figura 7 – Ripartizione percentuale delle emissioni di protossido di azoto (N₂O) e di anidride carbonica (CO₂) per diversi sistemi culturali.



Tra i diversi aspetti della pratica agronomica che influenzano le emissioni di GHG, di notevole interesse anche in ambiente mediterraneo, risulta – più nello specifico – la fertilizzazione azotata in quanto, principale causa delle emissioni di N_2O derivanti dal suolo e per le ulteriori emissioni generate durante le fasi di produzione e trasporto del fertilizzante stesso. La somministrazione di concimi azotati a sua volta dipende da fattori di carattere ambientale ed è pertanto soggetta a variazioni in funzione dell'areale di coltivazione. Tuttavia, il fabbisogno di concimi azotati di colture perenni come la canna comune, il miscanto o il pioppo risulta inferiore rispetto alle colture annuali. Infatti, le colture perenni risultano caratterizzate da un'elevata efficienza di uso dell'azoto che consente loro di limitare le perdite di azoto dovute sia a fenomeni di lisciviazione che alla produzione di N_2O . Studi condotti in Europa, in cui colture a destinazione energetica annuali e perenni sono state messe a confronto per valutare l'entità delle emissioni di gas serra attraverso misure dirette dei flussi provenienti dal suolo, hanno messo in luce proprio i ridotti flussi di protossido di azoto associati alle colture perenni rispetto alle annuali (tab. 3).

Inoltre, le necessità nutritive di queste colture sono notevolmente ridotte grazie al riciclo dell'azoto che si determina a seguito della traslocazione dei nutrienti dalla parte aerea della pianta verso il sistema rizomatoso nella canna comune e nel miscanto, e attraverso la caduta delle foglie nel pioppo. Tutto questo rappresenta oltre che un vantaggio di carattere ambientale anche un vantaggio economico: scegliendo l'epoca di raccolta anche in funzione del contenuto di azoto della biomassa è infatti possibile preservare l'azoto disponibile nell'agroecosistema, ridurre gli apporti futuri di concimi e conseguentemente contenere i costi colturali.

Figura 8 – Confronto tra i chilogrammi di CO_2 emessi per gigajoule di energia prodotta in una rotazione sessennale (6-ROT), SRF di pioppo (SRF-P), canna comune (C) e sorgo da fibra (S).



Le colture energetiche perenni possono inoltre svolgere un ruolo attivo nello stoccaggio del carbonio nel terreno; si stima che una parte sostanziale del carbonio assimilato dalla coltura (circa il 50%) venga utilizzato per lo svi-

luppo delle radici e quindi sia conservato in modo durevole nel suolo. Questa capacità rappresenta senz'altro un punto di forza delle colture poliennali da biomassa lignocellulosica non solo nei confronti dei combustibili fossili ma anche rispetto alle colture annuali; è stato infatti stimato che la quantità di anidride carbonica che può sequestrare una coltura erbacea perenne è mediamente 25 volte superiore rispetto ad una coltura annuale (tab. 3).

Tabella 3 – Indicazioni in merito alle emissioni di gas serra ed al bilancio del carbonio di alcune colture annuali e perenni a destinazione energetica.

Coltura	Emissioni N ₂ O (kg CO ₂ eq ha ⁻¹ anno ⁻¹)	Fattore di emissioni di N ₂ O (%N ₂ O per N somministrato)	Incremento di C organico nel suolo (kg CO ₂ eq ha ⁻¹ anno ⁻¹)
Miscanto	Basso	Basso	Guadagno (circa 2500)
Panico	Basso	Basso	Guadagno
Salice	Basso	Basso	Guadagno (valore medio 1600)
Mais	Alto	Alto	Perdita (da -2959 a -2050)
Colza	Alto	Alto	Perdita (da -1500 a -1250)
Fruento	Alto	Alto	n.d.

La conservazione della sostanza organica nel suolo e quindi il suo contenuto di carbonio infatti sono influenzati non solo dalle condizioni ambientali e dal contenuto di argilla del terreno ma anche dalla tipologia e frequenza delle lavorazioni del suolo, dalla copertura vegetale, e dall'entità e dalla struttura dell'apparato radicale. Infatti terreni sottoposti a lavorazione ridotta aumentano il contenuto di sostanza organica così come l'apporto di residui al terreno e il turn over radicale. Pertanto colture perenni come la canna comune, il miscanto il panico ed il pioppo, limitando le lavorazioni del suolo all'anno d'impianto, grazie ad un buon sviluppo dell'apparato rizomatoso e radicale e ad un elevato apporto di residui colturali (foglie caduche) possono garantire un buon stoccaggio di carbonio.

Più nel dettaglio, alcuni autori hanno riportato come la biomassa radicale e la distribuzione delle stesse radici vari considerevolmente tra specie erbacee a destinazione energetica sia annuali che perenni. A tal proposito, la canna comune sembrerebbe in grado di produrre un quantitativo di biomassa radicale pari a 13,7 Mg ha⁻¹ di sostanza secca contro 8 Mg ha⁻¹ del miscanto, 8,5 Mg ha⁻¹ del panico e 2,1 Mg ha⁻¹ del sorgo. Inoltre, per quanto riguarda la distribuzione delle radici lungo il profilo del terreno, è stato messo in evidenza come il miscanto sviluppi il 90% del suo apparato radicale nei primi 35 cm di suolo, mentre la canna comune ed il sorgo sviluppano le loro radici anche in profondità. Di conseguenza, considerando

che mediamente il contenuto di carbonio degli apparati radicali di queste colture varia dal 42 al 44%, il sorgo ed il panico sembrerebbero in grado di garantire un più elevato stoccaggio del carbonio, non solo in virtù di un maggior sviluppo delle proprie radici, ma anche in relazione alla loro capacità di accumulare un elevato quantitativo di biomassa radicale negli strati di suolo più profondi.

A conferma di ciò studi di lungo periodo condotti nella pianura pisana mettono in luce come il pioppo siano in grado non solo di incrementare il contenuto di carbonio nel suolo ma anche di conservarne la fertilità. Nello specifico dopo dieci anni di coltivazione di canna comune è stato possibile riscontrare un incremento pari al 10% rispetto alle condizioni iniziali del contenuto di azoto e di carbonio organico e di circa il 30% per quanto concerne il potassio.

Inoltre, lo stesso tipo di indagine è stata realizzata confrontando impianti di SRF di pioppo gestiti per un decennio con diversi turni di ceduzione rispetto ad una rotazione biennale mais – frumento e ad un terreno incolto (tab. 4); l'adozione di turni di ceduzione più ampi ha comportato un incremento del contenuto di azoto e di carbonio organico nel suolo. Inoltre, confrontando l'SRF di pioppo con un sistema coltura intensivo (MF) ed un terreno incolto (IN) emerge come l'inserimento nei sistemi culturali di colture perenni sia di notevole vantaggio per la conservazione del suolo tanto che – per ciascuno dei tre turni di taglio – i parametri migliorano rispetto al sistema intensivo. Al contrario, se confrontato con il terreno incolto – estremamente conservativo – possiamo vedere come il turno triennale sia in grado di migliorare ulteriormente le caratteristiche chimiche del suolo.

Tabella 4 – Parametri chimici del suolo misurati ad inizio (1996) e fine ciclo (2006) di una coltura di SRF di pioppo gestita con tre turni di ceduzione in confronto ad una rotazione biennale ed un terreno incolto.

Parametro	1996	2006				
		T ₁	T ₂	T ₃	MF	IN
P (mg kg ⁻¹)	8,8	12,00	12,20	15,90	9,30	12,20
N _{TOT} (g kg ⁻¹)	1,3	1,44	1,37	1,65	1,16	1,34
SOC (g kg ⁻¹)	10,4	12,37	13,50	16,07	10,03	12,07
C/N	8,4	8,95	10,23	10,13	8,98	9,33

3. Le colture dedicate e la biodiversità

Neri Roncucci, Nicoletta Nassi o Di Nasso

Il termine biodiversità, o diversità biologica, indica la misura della varietà della vita sulla Terra. Secondo la Convezione delle Nazioni Unite sul-

la Diversità Biologica del 1992, la biodiversità comprende la variabilità tra gli organismi viventi di qualsiasi origine (terrestre, marina, acquatica ecc.) e i complessi ecologici dei quali sono parte: ciò include la diversità all'interno delle specie (genetica), tra le specie e degli ecosistemi.

La diversità biologica è a fondamento di tutti gli organismi vegetali e animali presenti in agricoltura; è ben noto come, attraverso la domesticazione, la selezione e l'ibridazione, l'uomo abbia selezionato la variabilità naturalmente esistente a proprio vantaggio. Oltre a ciò, la biodiversità contribuisce al mantenimento di numerosi 'servizi ecologici': prevenzione dei fenomeni erosivi, regolazione dei processi idrologici, riciclo dei nutrienti, controllo del microclima locale, detossificazione di inquinanti ecc.

Figura 9 – *Biodiversity hotspot*, ovvero aree ad alta densità di specie endemiche a elevato rischio di scomparsa (Myers *et al.* 2000).



A livello globale nel corso degli ultimi decenni la biodiversità è stata drasticamente ridotta (fig. 9) a seguito di uno sfruttamento indiscriminato di ampie zone naturali e delle strategie di politica agricola soprattutto indirizzate, almeno fino a pochi anni fa, verso l'esclusivo aumento della produttività e, quindi, verso una progressiva semplificazione e specializzazione degli ordinamenti produttivi agricoli.

Anche l'eventuale passaggio da un sistema culturale aziendale basato sulle differenti specie erbacee ed arboree, tradizionalmente abbastanza diversificato (seminativo, frutteto, vigneto, oliveto, prato pascolo ecc.), o – all'opposto – da un ecosistema scarsamente antropizzato (terreni marginali o abbandonati), ad un ipotetico sistema culturale 'bioenergetico', implicherebbe necessariamente, oltre all'introduzione in coltura di specie diverse, dei cambiamenti sia a livello gestionale, per la modifica della tecnica culturale, che a livello delle componenti dell'ecosistema interessato. È infatti

verosimile supporre come tali alterazioni possano non solo incidere sulla biodiversità, ma anche sulla qualità e quantità delle acque disponibili, sulle condizioni del suolo, sulla qualità dell'aria, sull'emissione di gas serra ecc.; il problema è quello di valutare se ciò può aver luogo modificando in senso negativo o positivo gli assetti al momento determinatisi negli areali agricoli di riferimento.

Figura 10 – Componenti, funzioni e strategie di miglioramento della biodiversità legata agli ecosistemi agricoli (Altieri 1999).



Pertanto, secondo alcuni autori, la scelta di usi alternativi del suolo dovrebbe avvenire in maniera gerarchica: nelle condizioni ideali, si dovrebbe attribuire interesse prioritario alla risorsa idrica e alla biodiversità, secondariamente prevedere le produzioni primarie di cibo e di altre materie prime (fibre, legno, foraggio ecc.), ancor dopo lasciare spazio ai rifiuti e agli altri scarti e, in ultimo, prevedere il consumo di suolo per l'edificazione (abitazioni e siti industriali). In questo contesto, le decisioni circa le colture da energia dovrebbero essere prese solo successivamente ed in maniera residuale rispetto a quelle riservate alla protezione delle risorse naturali e della biodiversità e all'approvvigionamento di materie prime alimentari e non.

Al momento, però, il livello delle conoscenze scientifiche in grado di supportare la scelta di una dovuta serietà una posizione piuttosto che l'altra sul legame tra le colture a destinazione energetica e la biodiversità dell'agroecosistema è ancora assai modesto e, in proposito, dalla bibliografia esistente è possibile trarre solo alcune indicazioni di massima sulle esternalità positive e negative delle produzioni bioenergetiche.

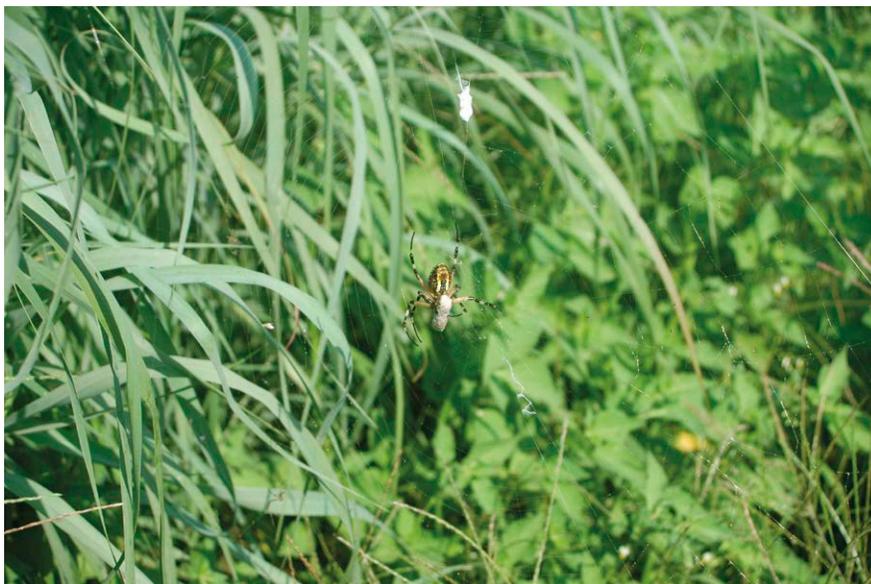
Alcuni studi condotti nel Regno Unito hanno messo in luce come l'aumento della complessità strutturale del paesaggio agricolo realizzata con l'introduzione della SRF di specie legnose favorisca l'incremento della diversità faunistica (tab. 5); inoltre si sostiene che oltre il 60% dei nutrienti assorbiti dalla pianta venga riciclato attraverso la caduta delle foglie al suolo, stoccato nella sostanza organica e rilasciato gradualmente nella soluzione circolante nel terreno, con positivi effetti sulla fauna, sull'attività microbica e sulla struttura del suolo.

Tabella 5 – Densità e composizione di specie ornamentiche in un impianto di SRF nel Sud del Regno Unito (Coates and Say 1999).

Specie	1° anno		2° anno		3° anno		4° anno		5° anno		
	Habitat ha ⁻¹	Specie	Habitat ha ⁻¹	Specie	Habitat ha ⁻¹	Specie	Habitat ha ⁻¹	Specie	Habitat ha ⁻¹	Specie	
<i>Alectoris rufa</i>	0,06	<i>Alectoris rufa</i>	0,07	<i>Phasianus colchicus</i>	0,21	<i>Phylloscopus trochilus</i>	0,40	<i>Phylloscopus trochilus</i>	1,04	<i>Phylloscopus trochilus</i>	0,97
<i>Alauda arvensis</i>	0,04	<i>Alauda arvensis</i>	0,07	<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	0,16	<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>	0,21	<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	0,38	<i>Turdus merula</i>	0,41
<i>Phasianus colchicus</i>	0,02	<i>Phasianus colchicus</i>	0,04	<i>Emberiza schoeniclus</i>	0,16	<i>Emberiza schoeniclus</i>	0,21	<i>Emberiza schoeniclus</i>	0,38	<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	0,41
<i>Vanellus vanellus</i>	0,02	<i>Emberiza schoeniclus</i>	0,04	<i>Phylloscopus trochilus</i>	0,14	<i>Phasianus colchicus</i>	0,19	<i>Erithacus rubecula</i>	0,27	<i>Fringilla coelebs</i>	0,41
<i>Motacilla flava</i>	0,02	<i>Phylloscopus trochilus</i>	0,03	<i>Sylvia borin</i>	0,09	<i>Erithacus rubecula</i>	0,15	<i>Turdus merula</i>	0,27	<i>Phasianus colchicus</i>	0,28
<i>Miliaria calandra</i>	0,02	<i>Miliaria calandra</i>	0,01	<i>Turdus merula</i>	0,09	<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	0,11	<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>	0,22	<i>Emberiza schoeniclus</i>	0,28

Ulteriori indagini riportano un effetto positivo sulla biodiversità di colture erbacee perenni in termini di aumento delle popolazioni di microrganismi tellurici e formazione di sistemi micorrizici tra funghi e coltura, essenzialmente ascrivibili al miglioramento delle caratteristiche chimico-fisiche del terreno. Analogamente su miscanto e canna comune è stato riscontrato un incremento del numero di specie vegetali spontanee, di invertebrati, di mammiferi e di uccelli rispetto a colture cerealicole annuali (fig. 11).

Figura 11 – A sinistra: aracnide rinvenuto in panico.



Più in generale, se prendiamo a riferimento sia la riduzione nell'utilizzo totale di agrofarmaci (diserbanti ed antiparassitari) per unità di superficie, che la diversa tipologia ed epoca di esecuzione delle lavorazioni del terreno e/o la densità di impianto delle stesse e la loro poliannualità, appare evidente che la biodiversità dell'agroecosistema in cui si inseriscono colture da biomassa lignocellulosica ne trae senz'altro beneficio. Tuttavia, qualora terreni aziendali a regime prativo, o a riposo o non coltivati, quindi già generalmente ricchi in biodiversità, dovessero venire convertiti nuovamente alla coltivazione si potrebbero presentare problemi di conservazione dell'esistente. Inoltre, è altrettanto noto che la coltivazione di specie erbacee (oleaginose e/o zuccherine e/o amilacee) destinate produzione di biocarburanti di prima generazione comporta spesso l'uso di pratiche colturali decisamente più intensive e può determinare un grado di biodiversità che sostanzialmente non differisce dalle colture *food* tradizionali. È pertanto evidente

come una gestione intensiva del sistema colturale tenda a comportare effetti negativi sulla biodiversità, a prescindere dalla combinazione di colture (e specie, e varietà diverse) che caratterizza l'ordinamento produttivo aziendale.

Infine, l'introduzione su larga scala di colture da bioenergia, sia legnose che erbacee, potrà verosimilmente comportare cambiamenti su scala paesaggistica, con effetti sulla biodiversità anche a livello territoriale. Pertanto, considerando che la biomassa che alimenta un potenziale impianto dovrà essere reperita quanto più vicino possibile al fine di contenere i costi di approvvigionamento, è auspicabile l'impiego di più colture onde evitare una drastica riduzione del livello di biodiversità. Un approccio innovativo potrebbe essere rappresentato dall'introduzione di mix di specie diverse, al fine di garantire il mantenimento della biodiversità e allo stesso tempo ridurre i problemi legati alle fitopatie ed alla fertilità dei suoli. A riguardo una sperimentazione, condotta da Tilman e coll. (2006) in Nord America, ha confrontato una monocoltura di panico e una consociazione di più specie erbacee perenni, in assenza di input culturali su suoli degradati (sabbiosi e con basso contenuto in azoto). L'impiego del mix ha in effetti permesso di ottenere un bilancio produttivo molto migliore di quello della semplice monocoltura; ciò sembra legato all'incremento di diversità (morfologica, genetica, fisiologica) e quindi della complessità colturale del sistema.

4. Considerazioni economiche

Nicoletta Nassi o Di Nasso, Neri Roncucci

Per quanto concerne l'analisi economica, i prezzi delle diverse operazioni colturali, ad eccezione delle spese relative alla raccolta, sono stati ricavati dalla versione più aggiornata del tariffario delle lavorazioni meccanico-agricole e dal prezzario per la realizzazione e la manutenzione di impianti di arboricoltura da legno della Regione Toscana. I costi della raccolta, invece, sono stati determinati sulla base di valutazioni pregresse riguardanti l'impiego dei cantieri di lavoro precedentemente decritti per le diverse colture. Infine, i prezzi dei mezzi tecnici (talee, concimi, diserbanti e carburante) sono stati stabiliti in base ai prezzi di mercato in vigore nel 2011. In tabella 6 sono riportati i costi colturali dal primo al dodicesimo anno d'impianto per la realizzazione di impianti di canna comune e SRF di pioppo; tali colture sono state scelte come le più rappresentative rispettivamente tra le perenni erbacee ed arboree fra quelle adattabili alle condizioni ambientali dell'Italia centrale. Tale valutazione non ha la pretesa di essere un'analisi economica in quanto non vengono considerate le passività annuali e costanti (beneficio fondiario e spese generali), così come l'attualizzazione dei costi, ma vuole fornire uno strumento di valutazione e comparazione delle spese da sostenere per la realizzazione di diverse tipologie di sistemi colturali.

216 Le biomasse lignocellulosiche

Tabella 6 – Costi colturali (€ ha⁻¹) dal 1° al 12° anno di impianto per canna comune e SRF di pioppo.

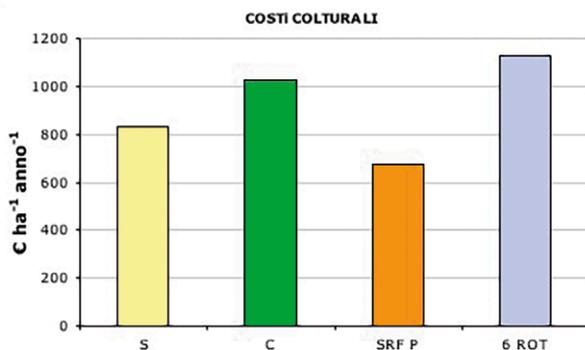
ANNO	CANNA COMUNE	SRF PIOPPO
1° anno	5337	3863
2° anno	613	112
3° anno	613	781
4° anno	613	112
5° anno	613	112
6° anno	613	781
7° anno	613	112
8° anno	613	112
9° anno	613	781
10° anno	613	112
11° anno	613	112
12° anno	873	1081
TOTALE	12340	8071
<i>Costo medio annuo</i>	<i>1028</i>	<i>673</i>

Come emerge dalla tabella 6 i costi più elevati dovrebbero essere sostenuti nell'anno d'impianto in cui, il potenziale agricoltore si troverebbe ad anticipare oltre il 40% dei costi previsti per i dodici anni d'impianto. Questo è dovuto solo in minima parte alle operazioni di preparazione del terreno, mentre dipende principalmente dall'elevato costo delle operazioni di messa a dimora del materiale di propagazione; però – nel momento in cui la diffusione di queste colture dovesse prendere piede – il passaggio ad economie di scala, così come il miglioramento della meccanizzazione di questa fase, potrebbero generare un effetto di contenimento dei costi.

Negli anni successivi, nei quali la coltura è considerata ormai matura, i costi della canna comune sono rappresentati esclusivamente dalla fertilizzazione, dal controllo meccanico delle infestanti e dalla raccolta della biomassa; anche in questo caso potrebbe essere auspicabile una riduzione dei costi valutando l'opportunità di ridurre in numero e quantità gli interventi di fertilizzazione monitorando adeguatamente la conservazione della qualità del suolo. Per il pioppo, invece, negli anni in cui non viene effettuata la ceduzione abbiamo solo il costo relativo al controllo meccanico delle infestanti, mentre nell'anno di taglio i costi relativi alla raccolta e alla concimazione azotata. Andando a valutare il costo medio annuo delle due colture su un periodo di dodici anni, possiamo osservare come la canna comune presenti un costo di poco oltre i 1000 € ha⁻¹ contro i circa 670 € ha⁻¹ del pioppo, con una riduzione pari a circa il 35%. Tale costo, tuttavia, non considera le spese da sostenere per la movimentazione, lo stoccaggio e il trasporto della biomassa alla bocca dell'impianto. Tale importo può sembrare ele-

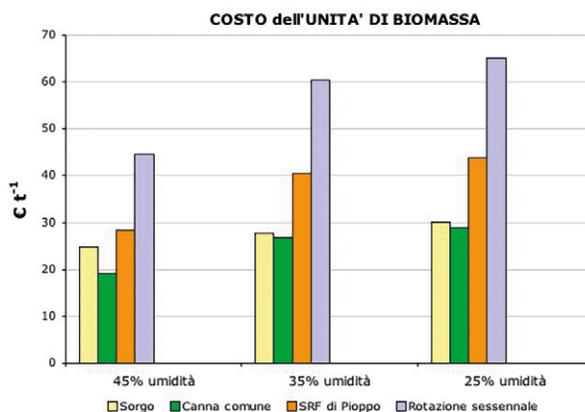
vato, tuttavia se lo confrontiamo con quello del sorgo da fibra (circa 800 € ha⁻¹) e quello di una rotazione sessennale (circa 1100 € ha⁻¹) (fig. 12), possiamo osservare come al momento le colture da energia siano caratterizzate da costi competitivi nei confronti delle tradizionali colture *food*.

Figura 12 – Confronto tra i costi colturali annuali di sorgo da fibra (S), canna comune (C), SRF di pioppo (SRF-P) ed una rotazione sessennale (6-ROT).



Ciò nonostante, il costo colturale non può essere l'unico indicatore utile a valutare la convenienza economica di un sistema colturale. Di fondamentale importanza è anche il costo per unità di prodotto (fig. 13) e, nel caso di sistemi a destinazione energetica, il costo dell'unità di energia (fig. 14).

Figura 13 – Costo dell'unità di biomassa di sorgo da fibra, canna comune, SRF di pioppo e rotazione sessennale a diversi livelli di umidità.



In merito al costo per tonnellata di sostanza secca, la canna comune, vista le sue elevate capacità produttive, riesce a contenere tale valore al di

218 Le biomasse lignocellulosiche

sotto dei 20 € t⁻¹ se venduta subito dopo la raccolta (45% di umidità), ma, anche diminuendone il contenuto di acqua, il suo costo per unità di prodotto si mantiene al di sotto dei 30 € t⁻¹. Allo stesso modo il sorgo varia il suo costo a tonnellata tra i 25 e i 30 € t⁻¹; di contro il pioppo mostra un costo intorno ai 30 € t⁻¹ alla raccolta che però sale intorno ai 40 € t⁻¹ nel caso di più bassi livelli di umidità. Infine, per quanto riguarda la rotazione sessennale i valori variano tra i 45 e i 65 € t⁻¹. Per le medesime ragioni, il costo per unità di energia – riferito alla biomassa secca – è più basso nella canna comune (1,6 € GJ⁻¹) rispetto a pioppo e sorgo (oltre 2 € GJ⁻¹) (fig. 14).

Tali costi, se prendiamo a riferimento i prezzi riscontrati attraverso una serie di interviste realizzate con produttori di cippato di origine forestale – l'unico per il quale al momento esista un mercato italiano – (tab. 7), sembrerebbero identificare una potenziale convenienza economica nell'investire in colture dedicate ad uso energetico e come questo possa rappresentare – quindi – un'importante opportunità di sviluppo per il settore agricolo.

Figura 14 – Costo dell'unità di energia di sorgo da fibra (S), canna comune (C), SRF di pioppo (SRF-P) e di una rotazione sessennale (6-ROT).

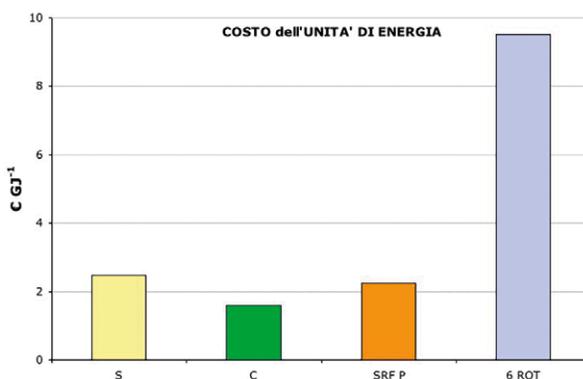


Tabella 7 – Prezzi medi, massimi e minimi del cippato per le diverse categorie qualitative. (Fonte: Cavalli et al. 2011)

Qualità cippato (UNI EN 14961)		Prezzo di vendita (€ t ⁻¹)		
		Medio	Massimo	Minimo
B	Scarsa (45-50%)	49	58	36
A2	Media (35%)	67	78	55
A1	Alta (20-25%)	105	126	84

Infatti, se osserviamo il margine di guadagno per le diverse colture in relazione ai prezzi di mercato, emerge come sembrano esserci margini di guadagno tali da poter coprire le voci di costo non considerate in questa se-

de e garantire comunque un reddito al produttore di biomassa. Prendendo a riferimento il prezzo minimo della biomassa di qualità B – cui potrebbero far riferimento le colture erbacee in conseguenza del loro elevato contenuto in ceneri che ne declassano il livello qualitativo – per la canna comune sarebbero disponibili mediamente 30 € t⁻¹ sui quali ripartire l'aggiustamento dei costi di produzione valutati secondo un'analisi economica più completa e dettagliata e il ricavo del produttore.

5. Water footprint

Anna Dalla Marta, Marco Mancini, Simone Orlandini

L'acqua è una risorsa unica e fondamentale per la vita e lo svolgimento delle attività dell'uomo e rappresenta per questo un elemento estremamente critico per il benessere dell'intera società. Una gestione sostenibile ed efficiente della risorsa idrica deve quindi essere una priorità fondamentale nelle politiche di tutti i paesi. L'agricoltura, che rappresenta uno dei principali settori in quanto a consumo di acqua, è in grado di influenzare le risorse idriche ed entra quindi spesso in conflitto con molti altri settori chiave, come ad esempio la produzione industriale, il trasporto e il turismo. L'aumento della popolazione e il conseguente incremento nella domanda globale di prodotti alimentari sta comportando un bisogno sempre maggiore di un'agricoltura più efficiente e di conseguenza l'irrigazione sta diventando una pratica sempre più necessaria al soddisfacimento di tali condizioni.

Come sappiamo, accanto ai fabbisogni alimentari a cui l'agricoltura deve far fronte, negli ultimi anni l'opportunità di utilizzare colture dedicate per la produzione di biocarburanti ha destato un crescente interesse in virtù della potenziale riduzione delle emissioni di gas serra associata ad un loro utilizzo. Ciononostante molti studi evidenziano che una sostituzione dei carburanti fossili a larga scala con i biocarburanti derivati da colture dedicate potrebbe portare a una pressione eccessiva sulla richiesta di produttività delle coltivazioni e conseguentemente sulla risorsa idrica, a seconda del clima, delle tecniche agronomiche applicate, del tipo di coltura e di suolo. Per queste ragioni, gli studi inizialmente dedicati al calcolo dei bilanci emissivi dei gas serra, si stanno ora spostando verso la valutazione della sostenibilità basata anche sulla quantificazione dei volumi di acqua consumati durante la fase di coltivazione delle colture energetiche dedicate.

In questo contesto, la metodologia più utilizzata si basa sul calcolo del *water footprint* (WF) definito come il volume totale di acqua utilizzato per produrre un bene o un servizio, che nel caso di una coltura rappresenta il volume di acqua evapotraspirato e/o inquinato durante il processo di coltivazione. Il WF si compone di tre parti: *green*, *blue* e *gray*. La prima parte è rappresentata dall'acqua immagazzinata nel suolo (precipitazione) e

resa disponibile dall'ambiente, la seconda dall'acqua superficiale o di falda somministrata attraverso l'irrigazione e la terza rappresenta il volume di acqua necessario a diluire l'eventuale inquinamento prodotto nel corpo acquifero. In agricoltura la fonte principale di inquinamento delle acque è rappresentata dai fertilizzanti azotati, per cui il gray WF viene normalmente calcolato sulla base dei limiti imposti dalla legge sul contenuto massimo di composti azotati nelle acque di superficie e di falda. La green WF, ossia l'acqua disponibile nel suolo legata principalmente alle precipitazioni, è una variabile che di anno in anno, per ogni ciclo colturale, si differenzia fortemente a causa del peculiare andamento climatico e conseguentemente ai cambiamenti climatici sta diventando uno dei fattori che più incide nelle variazioni temporali del WF.

Il WF non si vuole sostituire ad analisi specifiche e complesse quali, ad esempio, il bilancio idrico, ma vuole rappresentare un indicatore del consumo di acqua potabile, inteso non come il semplice prelievo ma, come un utilizzo che non preveda una restituzione all'ecosistema. Una delle caratteristiche principali dell'indice di WF è la sua multidimensionalità. Infatti, esso non solo può essere utilizzato per calcolare il consumo idrico ma fornisce anche informazioni sul tipo di risorsa usata. L'utilizzo dell'irrigazione piuttosto che lo sfruttamento delle sole precipitazioni, infatti, comporta un impatto diverso non solo dal punto di vista ambientale ma anche sociale ed economico. In questo senso, l'analisi della sostenibilità rappresenta una fase importante nella valutazione globale del WF di un prodotto, poiché attraverso il confronto tra i volumi di acqua utilizzati e quelli disponibili è possibile individuare alcuni punti critici. Questi possono essere rappresentati sia da aree geografiche e/o periodi dell'anno in cui il WF della produzione non è sostenibile (periodi siccitosi o eccesso di precipitazioni, abbassamento della falda, zone aride ecc.), sia da fasi non sostenibili nel processo produttivo (coltivazione, trattamento della materia prima, trasformazioni, trasporto ecc.). In questa fase è inoltre molto importante identificare i criteri di sostenibilità più adatti, siano essi ambientali (qualità delle acque, portate dei fiumi, altezza della falda ecc.), sociali (allocazione della risorsa idrica nei diversi prodotti e settori) ed economici (analisi costi-benefici).

Anche se negli ultimi anni diversi sono stati gli studi riguardo al WF di molti prodotti agricoli, quali cotone, tè e caffè, pomodoro, riso e grano, poco ancora è stato fatto sul fronte delle bioenergie. Alcuni lavori hanno esplorato le implicazioni di una produzione globale di biocarburanti in Cina e India, dimostrando come la continua espansione della coltivazione di mais da bioetanolo in US abbia implicazioni anche pesanti sulla risorsa idrica e sulla sostenibilità del suo utilizzo. Altri hanno portato le evidenze dei forti legami che esistono tra consumo di acqua e produzione di biocarburanti che sarebbe necessaria affinché vengano rispettati i target dettati dall'Unione Europea, e recepiti da Stati Membri e regioni, in termi-

ni di produzione e uso di biocarburanti per il settore dei trasporti. A tutto questo si aggiunge l'incertezza legata al cambiamento e alla variabilità climatica che stanno portando verso un aumento della temperatura, una riduzione della radiazione solare e un cambiamento nella distribuzione delle precipitazioni. Questi fattori influenzano in larga parte la produzione agricola e l'efficienza dell'uso dell'acqua delle colture. In questo contesto, l'utilizzo di indici specifici quali il WF può essere di supporto ad una gestione efficiente della risorsa idrica necessaria ad evitare situazioni di insostenibilità o di conflitto derivanti da scelte poco oculate. La coltivazione di colture da biomassa, infatti, ha sicuramente un ottimo potenziale per quanto riguarda la produzione di energia rinnovabile ma per rispettare i criteri di sostenibilità, questa attività deve essere pianificata con attenzione e rigore tecnico-scientifico e solo laddove siamo in presenza di aree idonee e non vulnerabili.

Bibliografia

- Accordo di Copenhagen (2010), Comunicato stampa del 4 febbraio.
- Addario E. (2007), *Il controllo di specie forestali invasive in un'area protetta*, «L'Italia Forestale e Montana», 7, pp. 267-281.
- Alden H.A. (1995), *Hardwoods of North America*, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-83. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Alexopoulou E., Sharma N., Christou M., Piscioneri I., Mardikis M., Pignatelli V. (2003), *Switchgrass in the Mediterranean region*, in *Switchgrass (Panicum virgatum L.) as an alternative energy crop in Europe. Initiation of a productivity network*, FAIR 5-CT97-3701, pp. 13-20.
- Allegro G., Giorcelli A., Deandrea G., Bazzani R. (2011), *Damage assessment of the leafhopper *Asymmetrasca decedens* (Paoli, 1932) (Homoptera: Cicadellidae) on *Salix* spp. in Italy*, Terceer Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina, 16-19 marzo 2011, Tabajo Técnico.
- Altieri M.A. (1999), *The ecological role of biodiversity in agroecosystems*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 74, pp. 19-31.
- Anderson G.Q.A., Fergusson M.J. (2006), *Energy from biomass in the UK: sources, processes and biodiversity implications*, «Ibis», 148, pp. 180-183.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Bonari E. (1999), *Resa, composizione chimica e valutazione energetica della biomassa di specie erbacee annuali per la produzione di energia*, in Atti XXXIII Convegno Annuale Società Italiana di Agronomia "Le colture non alimentari"; Legnaro (PD), 20-23 settembre 1999.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Bonari E. (2005), *Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices*, «European Journal of Agronomy», 22, pp. 375-389.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Nasso N., Bonari E. (1999), *Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (*Cynara cardunculus* L.) cultivars for energy use*, «Biomass and Bioenergy», 23, (2002) pp. 33-46.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Nasso N., Bonari E. (2007), *Differences in biomass yield, chemical characteristics and energy balance between two Giant reed*

- (*Arundo donax* L.) genotypes, in *Proceeding of 15th European Biomass Conference*, edited by A. Grassi, K. Maniatis, Berlin (Germany) 7-11 May 2007, ETA S.r.l., Florence, Italy, pp. 607-612.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Nasso N., Bonari E. (2009a), *Comparison of Arundo donax L. and Miscanthus × giganteus in a long term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance*, «Biomass and Bioenergy», 33, pp. 635-643.
- Angelini L.G., Ceccarini L., Nasso N., Bonari E. (2009b), *Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (Cynara cardunculus L.) cultivars for energy use*, «Biomass and Bioenergy», 33(5), pp. 810-816.
- Angelini L.G., Nasso N., Masoni A., Bonari E. (2007), *Differences in chemical characteristics of Miscanthus sinensis feedstocks for conversion to biofuel as affected by nitrogen and water supply*, 1st Conference of SIBA – Società italiana Bioenergie e Agroindustria, Salerno.
- Archontoulis S.V., Struik P.C., Yin X., Bastiaans L., Vos J., Danalatos N.G. (2010), *Influences of fluorescence characteristics, seed composition, and allometric relationships predicting seed yields in the biomass crop Cynara cardunculus*, «Global Change Biology Bioenergy», 2-3, pp. 113-129.
- ARSIA (2004), *Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy farm*, «Quaderno ARSIA», 6.
- ARSIA (2009a), *La filiera legno-energia – Risultati del progetto Interregionale Woodland Energy*.
- ARSIA (2009b), *Stima della potenzialità produttiva delle agrienergie in Toscana*.
- Aylott M.J., Casella E., Tubby I., Street N.R., Smith P., Taylor G. (2008), *Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK*, «New Phytologist», 178(2), pp. 358-370.
- Baertsche S.R., Yokoyama M.T., Hanover J.W. (1986), *Short rotation, hardwood tree biomass as potential ruminant feed-chemical composition, nylon bag ruminal degradation and ensiling of selected species*, «J. Animal Sci.», 63, pp. 2028-2043.
- Bagnoli B., Roversi P.F. (2004), *Annotazioni morfologiche e biologiche su un Eulofide di recente introduzione in Italia galligeno fogliare su Eucalipto*, in *Atti XIX Congresso Nazionale Italiano di Entomologia*, Catania, 10-15 giugno 2002, pp. 955-960.
- Baldini S., Kellezi M., Kortoçi Y. (2009), *Caratterizzazione della biomassa di pioppo e robinia a ciclo breve (Short Rotation Forestry)*, vol. 3, *Atti del Terzo Congresso di Selvicoltura per il miglioramento e la conservazione dei boschi italiani*, Taormina (Messina), 16-19 ottobre 2008, pp. 276-278.
- Balsari P., Airoidi G., Facciotto G. (2002), *Preparazione di talee di pioppo per biomassa*, «Sherwood», 76, pp. 39-44.
- Barrett R.P., Mebrahtu T., Hanover J.W. (1990), *Black locust: A multi-purpose tree species for temperate climates*, in *Advances in new crops*, a cura di Janick J., Simon J.E., Timber Press, Portland, OR, pp. 278-283.
- Bauen A.W., Dunnett A.J., Richter G.M., Dailey A.G., Aylott M., Casella E., Taylor G. (2010), *Modelling supply and demand of bioenergy from short rotation coppice and Miscanthus in the UK*, «Bioresource Technology», 101, pp. 8132-8143.

- Beale C.V., Long S.P. (1997), *Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C4-grasses Miscanthus × giganteus and Spartina cynosuroides*, «Biomass and Bioenergy», 12, pp. 419-428.
- Beccali M., Columba P., D'Alberti V., Franzitta V. (2009), *Assessment of bioenergy potential in Sicily: A GIS based support methodology*, «Biomass and Bioenergy», 33(1), pp. 79-87.
- Bell G.P. (2002), *Ecology and management of Arundo donax, and approaches to riparian habitat restoration in southern California*, The Nature Conservancy of New Mexico, Santa Fe, NM 87501 USA.
- Bentini M., Zucchelli M. (2008), *Biomasse per la combustione diretta in caldaie*, «Mondo macchina», 1, pp. 32-39.
- Berardo N., Bonardi P., Habyarimana E., Lorenzoni C. (2005), *Potenzialità produttiva e qualità del trinciato integrale di sorgo*, «L'Informatore Agrario», 11, pp. 53-56.
- Berg A. (2002), *Breeding birds in short-rotation coppices on farmland in central Sweden—the importance of Salix height and adjacent habitats*, «Agric Ecosyst Environ», 90, pp. 265-276.
- Bergante S., Facciotto G. (2006), *Impianti annuali, biennali, quinquennali. Produttività e costi in alcune realtà del Nord Italia*, «Sherwood» 128, pp. 25-30.
- Bergante S., Facciotto G., Minotta G. (2010), *Identification of the main site factors and management intensity affecting the establishment of Short-Rotation-Coppice (SRC) in Northern Italy through Stepwise regression analysis*, «Central European Journal of Biology», 5(4), pp. 522-530.
- Bernetti G. (1995), *Selvicoltura Speciale*, Utet, Torino.
- Bernetti I., Fagarazzi C. (2003), *BIOSIT: una metodologia GIS per lo sfruttamento efficiente esostenibile della "risorsa biomassa" a fini energetici*, Brochure Progetto LIFE 2003.
- Bertolini M., Lorenzoni C., Marocco A., Maggiore T. (1993), *Soluble solids content in the stalk of maize (Zea mays L.) lines and hybrids*, «Maydica», 38, pp. 321-324.
- Biagini E. (2008), *Dispense di combustione eterogenea*, Materiale didattico a.a. 2008/2009, Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Chimica, Università degli Studi di Pisa.
- Biomasse ad uso energetico – Principali aspetti per la valorizzazione energetica delle biomasse coltivate e residuali*, ASSAM, Ancona, 2010.
- Biemans M., Waarts Y., Nieto A., Goba V., Jones-Walters L., Zöckler C. (2008), *Impacts of biofuel production on biodiversity in Europe*, ECNC-European Centre for Nature Conservation, Tilburg, the Netherlands.
- Bisoffi S., Minotta G., Paris P. (2009), *Indirizzi culturali e valorizzazione delle produzioni legnose fuori foresta*, Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina (ME), 16-19 ottobre 2008, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, pp. 729-736.
- Bonari E., Jodice R., Masini S. (a cura di) (2009), *L'impresa agro energetica. Ruolo e prospettive nello scenario "2 volte 20 per il 2020"*, Edizioni Tellus, Roma.
- Bonari E., Pampana S. (2002), *Biomasse agricole e lignocellulosiche*, in *Biomasse agricole e forestali ad uso energetico*, a cura di S. Baldini, Agra Editrice, Roma, pp. 81-97.

- Bonari E., Picchi G., Ginanni M., Guidi W., Piccioni E., Fraga A., Villani R. (2004), *Le colture da energia*, in Quaderno ARSIA, *Le colture dedicate ad uso energetico: il progetto Bioenergy Farm*, Firenze, pp. 29-78.
- Bordoni A. et al. (2010), *La filiera olio-energia – Aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive*, ASSAM, Ancona.
- Bordoni A. et al. (2011), *La filiera legno-energia – Aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive*, ASSAM, Ancona.
- Boring L.R., Swank W.T. (1984a), *The role of black locust (Robinia pseudoacacia) in forest succession*, «Journal of Ecology», 72 (3), pp. 749-766.
- Boring L.R., Swank W.T. (1984b), *Symbiotic Nitrogen Fixation in Regenerating Black Locust (Robinia pseudoacacia L.) Stands*, «Forest Sci.», 30 (2), pp. 528-537.
- Börjesson P.I.I. (1996), *Energy analysis of biomass production and transportation*, «Biomass and Bioenergy», 11, pp. 305-318.
- Bosch L., Casañas F., Ferret A., Sánchez E., Nuez F. (1994), *Screening tropical maize populations to obtain semiexotic forage hybrids*, «Crop Science», 34, pp. 1089-1096.
- Bossard C.C., Randall J.M., Hoshovsky M.C. (a cura di) (2000), *Invasive plants of California's wildlands*, University of California Press, Berkeley, CA.
- Braun E.L. (1989), *The woody plants of Ohio*, Ohio State University Press, Columbus, OH.
- Bunger M.T., Thomson H.J. (1938), *Root development as a factor in the success or failure of windbreak trees in the southern high plains*, «Journal of Forestry», 36, pp. 790-803.
- Burke D.A. (2001), *Diary waste anaerobic digestion handbook – Options for recovering beneficial products from dairy manure*, Environmental Energy Company, June.
- Burner D.M., Pote D.H., Ares A. (2005), *Management effects on biomass and foliar nutritive value of Robinia pseudoacacia and Gleditsia triacanthos f. inermis in Arkansas, USA*, «Agroforestry System», 65, pp. 207-214.
- Cadoux S., Vanderdriessche V., Machet J.M., Mary B., Beaudouin N., Lemaire G., Gosse G. (2008), *Potential yield and main limiting factors of Miscanthus giganteus in France. Identification of the needs for further research*, 16th European Biomass Conference and Exhibition, Valence.
- Camera di Commercio di Firenze (2013), *Le biomasse. Un'analisi su caratteristiche e prospettive del settore rivolta agli operatori agricoli della Toscana*.
- Candolo G. (2005), *Biomasse vegetali: i possibili processi di conversione energetica*, «Agronomica», 5, pp. 31-38.
- Canesin C. (2009), *La Short Rotation Forestry in Nord Italia. Limiti e potenzialità del suo impiego sotto differenti scenari: produzione di biomassa e prove di fertilizzazione*, Tesi di Dottorato, Anno Accademico 2009-2010, Scuola di Dottorato di Ricerca in Territorio, Ambiente, Risorse e Salute, Università degli Studi di Padova.
- Caslin B., Finnan J., Easson L. (2011), *Miscanthus Best Practice Guidelines*, disponibile su <<http://www.teagasc.ie/publications/2011/315/MiscanthusBestPractice.pdf>> (04/16).
- CETA (Centro di ecologia Teorica ed Applicata) (2007), *Dennis Picco 2007. Progetto Biocolt: "Colture energetiche per il disinquinamento della laguna di Venezia"*.

- Christian D.G., Elbersen H.W. (1998), *Switchgrass (Panicum virgatum L.)*, in N. El Bassam, *Energy plant species. Their use and impact on environment and development*, James and James publishers, London, pp. 257-263.
- Christou M., Mardikis M., Alexopoulou E. (2001), *Propagation material and plant density effects on the Arundo donax yields*, in *Biomass for Energy and Industry: Proceeding of the First World Conference*, edited by Kyritsis S., Beenackers A.A.C.M., Helm P., Grassi A., Chiamonti D., Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, London, James & James (Science Publishers) Ltd, 2001, pp. 1622-1628.
- Christou M., Mardikis M., Kyritsis S., Cosentino S., Jodice R., Vecchiet M., Gosse G. (2001), *Screening of Arundo donax L. populations in South Europe*, in *Biomass for Energy and Industry: Proceeding of the First World Conference*, edited by Kyritsis S., Beenackers A.A.C.M., Helm P., Grassi A., Chiamonti D., Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, London, James & James (Science Publishers) Ltd, pp. 2048-2051.
- Ciancio O., Nocentini S. (2004), *Il bosco ceduo. Selvicoltura Assestamento Gestione*, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze.
- Coffman G.C., Ambrose R.F., Rundel P.W. (2004), *Invasion of Arundo donax in river ecosystems of Mediterranean climates: causes, impacts and management strategies*, edited by Arianoutsou M., Papanastasis W., Proceedings of the 10th MEDECOS Conference, 25 April-1 May 2004, Rhodes Island, Greece, Millpress Science Publishers, Rotterdam, pp. 1-8.
- Commissione Europea (2007), *Limiting Global Climate Change to 2 degree Celsius: the way ahead for 2020 and beyond*, Communication to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, 10 January 2007, Brussels.
- Commissione Europea (2010), *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social committee and the committee of the regions International climate policy post-Copenhagen: Acting now to reinvigorate global action on climate change*, 9 March 2010, Brussels.
- Commissione Europea (2011), *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and social committee and the committee of the regions A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*, 8 March 2011, Brussels.
- Copani V., Patanè C., Tuttobene R. (1989), *Potenzialità produttive del sorgo zuccherino (Sorghum bicolor) quale fonte di biomassa a fini energetici*, «Rivista di Agronomia», 23, pp. 428-434.
- Cosentino S.L. (1996), *Crop physiology of sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench)*, Proc. "First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry", Toulouse, 1-3 April, pp. 30-41.
- Cosentino S.L., Copani V., D'Agosta G. (1999a), *Valutazione di popolazioni di Arundo donax L. reperite in Sicilia e in Calabria*, in *Le colture non alimentari*, Atti XXXIII Convegno Annuale Società Italiana di Agronomia, a cura di Bona S., Legnaro (Pd), 20-23 settembre 1999.
- Cosentino S.L., Copani V., D'Agosta G.M., Sanzone E., Mantineo M. (2006), *First results on evaluation of Arundo donax L. clones collected in Southern Italy*, «Industrial Crops and Products», 23, pp. 212-222.

- Cosentino S.L., Copani V., Mantinei M., Foti S. (2002), *Risposta di una coltura di sorgo a diversi livelli di energia ausiliaria*, «Rivista di Agronomia», 36, pp. 357-365.
- Cosentino, S.L., Patanè C., Guarnaccia P. (1996), *Biomass, leaf area index and water use efficiency of sweet sorghum in limited water availability in Mediterranean environment*, Proc. "First European Seminar on sorghum for energy and industry", Toulouse, 1-3 April, pp. 228-235.
- Cosentino S.L., Patanè C., Sanzone E., Copani V., Foti S. (2007), *Effects of soil water content and nitrogen supply on the productivity of Miscanthus × giganteus Greef et Deu*, «Mediterranean environment Industrial Crops and Products», 25, pp. 75-88.
- Cosentino S.L. Riggi E., Mantineo M. (1997), *Sweet sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench) performance in relation to soil water deficit in the South of Italy*, Proceedings First international sweet sorghum conference, Li Dajue Ed., pp. 430-442.
- Cosentino S.L., Sanzone E., Bellomia L., Sortino O., Belligno A. (2007), *Chemical composition and energetic value of perennial ligno-cellulosic species (Miscanthus × giganteus Greef and Deu. and Arundo donax L.) grown in Mediterranean region*, 15th European Biomass Conference & Exhibition, 7-11 May, Berlin.
- CRA-ING (2010), *Polo agricoltura non alimentare colture energetiche alternative (PANACEA)*, Roma.
- Czarapata E.J. (2005), *Invasive plants of the Upper Midwest: An illustrated guide to their identification and control*, The University of Wisconsin Press, Madison, WI.
- Dahl J., Obernberger I. (2004), *Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (Arundo donax, Cynara cardunculus, Miscanthus x giganteus and Panicum virgatum)*, 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Roma.
- Dale V.H., Lowrance R., Mulholland P., Robertson G.P. (2010), *Bioenergy Sustainability at the Regional Scale*, «Ecology and Society», 15, p. 23.
- DEFRA (2007), *Planting and growing miscanthus. Best practice guidelines for applicants to DEFRA'S energy crops scheme*, Department for Environment, Food and Rural Affairs, London.
- Delmas M. (1994), *Sweet sorghum: A sustainable crop for energy production in Europe: agricultural, industrial improvement, optimisation and implementation*, in *Sweet sorghum*, AIR1 Reoprt CT92-0041.
- Destremau D.X. (1983), *Variabilité de l'Eucalyptus gunni dans l'ouest de la France*, Atti Convegno IUFRO, 26-30 settembre, Bordeaux.
- Di Bene C., Bosco S., Nasso N., Coli A., Bonari E. (2009), *How crop management intensities influences GHG emissions and production costs?*, Proceeding of "8th International Carbon Dioxide Conference" September 13-19 Jena, Germany, CD Proceeding Abstract n. T3-041.
- Dien B.S., Cotta M.A., Jeffries T.W. (2003), *Bacteria engineered for fuel ethanol production: current status*, «Applied Microbiology and Biotechnology», 63, pp. 258-266.
- Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.

- Don A., Osborne B., Hastings A., Skiba U., Carter M.S., Drewer J., Flessa H., Freibauer A., Hyvönen N., Jones M.B., Lanigan G.J., Mander G.J., Monti A., Njakou Djomo S., Valentine J., Walter K., Zegada-Lizarazu W., Zenone T. (2011), *Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon*, «GCB Bioenergy» pp. 1-20.
- Duke A.J. (1983), *Handbook of energy crops*, disponibile su: <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Arundo_donax.html> (04/16).
- EEA (2006), *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?*, European Environmental Agency.
- EEA (2007), *Estimating the environmentally compatible bioenergy potential from agriculture*, EEA Technical report n. 12/2007.
- EEA (2010), *Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2008 and inventory report 2010 Submission to the UNFCCC Secretariat*, Copenhagen.
- Elbersen H.W., Christian D.G., Yates N.E., El Bassam N., Sauerbeck G., Alexopoulos E. (2003), *Switchgrass nutrient composition, in Switchgrass (Panicum virgatum L.) as an alternative energy crop in Europe. Initiation of a productivity network*, FAIR 5-CT97-3701, pp. 21-32.
- ENEA (2010), *Le fonti rinnovabili – Ricerca e innovazione per un futuro low-carbon*, Roma.
- Ercoli L., Mariotti M., Masoni A., Bonari E. (1999), *Effect of irrigation and nitrogen fertilization on biomass yield and efficiency of energy use in crop production of Miscanthus*, «Field Crops Research», 63, pp. 3-11.
- EU Commission (2005), *Biomass Action Plan*, COM(2005) 628 final.
- EurObserv'ER (2012a); *12th EurObserv'ER Report. The state of renewable energies in Europe*, Observatoire des energies renouvelables, Paris.
- EurObserv'ER (2012b), *Le baromètre biomasse solide*, Observatoire des energies renouvelables, Paris.
- EurObserv'ER (2012c), *Le baromètre biogaz*, Observatoire des energies renouvelables, Paris.
- EurObserv'ER (2013), *Biofuels barometer*, Observatoire des energies renouvelables, Paris.
- European Union (1997), *Publications Office of the European Union, n.d. Giant reed (Arundo donax L.) network: improvement, productivity and biomass quality [WWW]*, disponibile su: <<http://ec.europa.eu/research/agro/fair/en/gr2028.html>> (04/16).
- Eurostat (2010), *Statistiche sull'energia*, <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>> (04/16).
- Evans G. (2007), *Liquid transport biofuels – Technology status report*, The National Non-Food Crops Centre (NNFCC), disponibile su: <<http://www.nnfcc.co.uk/tools/international-biofuels-strategy-project-liquid-transport-biofuels-technology-status-report-nnfcc-08-017>> (04/16).
- Fabricant F. (2003), *Food Stuff; Artichoke's Cousin Gaining Recognition*, «New York Times», January 1, (consultato il 21/02/2009).
- Facciotto G. (2006), *La Short Rotation Forestry con le Salicacee*, «Alberi e Territorio», 10-11, pp. 16-20.
- Facciotto G. (2008), *Cloni coltivati*, in *Il libro bianco della pioppicoltura*, «Agrisole», suppl. n. 26/2008, pp. 25-28.

- Facciotto G., Bergante S. (2011), *Evaluation of poplar and willow performances for biomass production in Northern Italy*, Terceer Congreso Internacional de Saliáceas en Argentina, 16-19 marzo 2011, Tabajo Técnico.
- Facciotto G., Bergante S., Lioia C., Rosso L., Mughini G., Zenone T., Nervo G. (2006), *Produttività di cloni di pioppo e salice in piantagioni a turno breve*, «Forest@», 3(2), pp. 238-252.
- Facciotto G., Mughini G. (2003), *Modelli colturali e produttività della selvicoltura da biomassa*, «L'Informatore Agrario», 10, pp. 95-99.
- FAO (1976), *A framework for land evaluation*, FAO Soils Bulletin, 32, Rome.
- FAO (1983), *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*, FAO Soils Bulletin, 52, Rome.
- FAO (2008), *The state of food and agriculture*.
- Farrar J.L. (1995), *Trees of the northern United States and Canada*, Blackwell Publishing, Ames, IA.
- Fernández J., Curt M., Aguado P. (2006), *Industrial applications of *Cynara cardunculus* L. for energy and other uses*, «Industrial crops and Products», 24, pp. 222-229.
- Fernandez J., Hindago M., Sanchez G., Curt M.D. (1998), *Towards a varietal screening of *Cynara cardunculus* for oil production*, Proc. 10th EU Bioenergy Conference, Biomass for Energy and Industry, Wurzburg (D), June.
- Fernandez J., Manzanares P. (1990), **Cynara cardunculus* L., a new crop for oil, paper pulp and energy*, Proc. 5th European Conference "Biomass for energy and industry", Lisbon (P), 9-13 October 1989, Elsevier Applied Sciences.
- Fernandez J., Marquez L., Venturi P. (1997), *Technical and economic aspects of *Cynara cardunculus* L.*, «An energy crop for Mediterranean region», 1, pp. 48-51.
- Fike J.H., Parrish D.J., Wolf D.D., Balasko J.A., Green J.T., Rasnake M. Jr., Reynolds J.H. (2006), *Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems*, «Biomass and Bioenergy», 30(3), pp. 198-206.
- Fillion M., Brisson J., Guidi W., Labrecque M. (2011), *Increasing phosphorus removal in willow and poplar vegetation filters using arbuscular mycorrhizal fungi*, «Ecological Engineering», 37, pp. 199-205.
- Fiorese G., Guariso G. (2010), *A GIS-based approach to evaluate biomass potential from energy crops at regional scale*, «Environmental Modelling & Software», 25, pp. 702-711.
- Foppa Pedretti E., Toscano G., Rossini G., Riva G.L. (2009), *La filiera del biogas – Aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive*, ASSAM, Ancona.
- Foti S., Cosentino S.L. (2001), *Colture erbacee annuali e poliennali da energia*, «Rivista di Agronomia», 35, pp. 200-215.
- Frison G. (1992), *Choice of site and establishing short rotation forestry*, in *Handbook on How to Grow Short Rotation Forests*, a cura di Ledin S., Alriksson A., Swedish University of Agricultural Sciences/International Energy Agency (IEA), Uppsala.
- Gellini R. (1980), *Botanica Forestale*, vol. II, CLUSF, Firenze, pp. 109-118.
- Germiniani G. (2000), *La coltivazione degli eucalipti in ambiente mediterraneo*, Atti del Convegno *Arboricoltura da legno: quale futuro?*, Nuoro, 30-31 ottobre 1997, pp. 63-75.

- Gherbin P., Monteleone M., Tarantino E. (2001), *Influenza del regime irriguo sulla produzione di biomassa del sorgo da carta in ambiente mediterraneo*, «Rivista di Agronomia» 35, pp. 35-44.
- Gilbert R., Ferrell J., Helsel Z. (2008), *Production of giant reedgrass for biofuel*, Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Giorelli A., Allegro G., Verani S. (2008), *Aspetti fitosanitari in piantagioni da biomassa*, «Sherwood – Foreste ed Alberi Oggi», 143, pp. 11-15.
- Giordano E., Scarascia-Mugnozza G., Valentini R., Kuzminsky E., Angelaccio C. (1990), *Il danno da freddo nel genere Eucalyptus*, IPRA, Incremento Produttività Risorse Agricole.
- Giulietti V., Roncucci N., Nasso N., Tozzini C., Ragaglini G., Guidi W., Taccini F., Bonari E. (2011), *Suitability of Eucalyptus short rotation coppice in the Mediterranean environment: preliminary results*, «Biomass and Energy Crops IV. Aspects of Applied Biology», 112, pp. 279-283.
- Gominho J., Fernandez J., Pereira H. (2001), *Cynara cardunculus L. – A new fibre crop for pulp and paper production*, «Industrial Crops and products», 13, pp. 1-10.
- Gominho J., Lourenço A., Curt M., Fernández J., Pereira H. (2008), *Characterization of hairs and pappi from Cynara cardunculus capitula and their suitability for paper production*, «Industrial crops and Products», pp. 1-10.
- Grieve M. (1931), *“Artichoke, Cardoon”*. *A modern herbal*, «Botanical.com.» (consultato il 18/11/2006).
- Gruppo2013 (2009), *L'impresa agroenergetica. Ruolo e prospettive nello scenario “2 volte 20 per il 2020”*, a cura di E. Bonari, R. Jodice, M. Stefano, Edizioni Tellus, Roma.
- GSE (2012), *Procedure applicative del D.M. 6 luglio 2012 contenenti i regolamenti operativi per le procedure d'asta e per le procedure di iscrizione ai registri*, <http://www.gse.it/it/GSE_Documenti/24082012-DM_6-7-12_-Procedure_applicative_art24.pdf> (04/16).
- Guidi W., Piccioni E., Ginanni M., Bonari E. (2008), *Bark content estimation in poplar (Populus deltoides L.) short-rotation coppice in Central Italy*, «Biomass and Bioenergy», 32, pp. 518-524.
- Gunaseelan V. (1997), *Anaerobic digestion of Biomass for methane production: a Review*, «Biomass and Bioenergy», 13, pp. 83-114.
- Guo L.B., Sims R.E.H, Horne D.J. (2002), *Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation Energy forests in New Zealand. I: biomass and nutrient accumulation*, «Bioresource Technology», 85, pp. 273-283.
- Hahn-Hägerdal B., Galbe M., Growa-Grauslund M.F., Lidén G., Zacchi G. (2006), *Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today*, «Trends in Biotechnology», 24, pp. 549-556.
- Hansen E., Christensen B.T., Jensen L.S., Kristensen K. (2004), *Carbon sequestration in soil beneath long-term Miscanthus plantations as determined by ¹³C abundance*, «Biomass and Bioenergy», 26, pp. 97-105.
- Harris M.S. (2005), *Period artichokes. Recipes. Cardoons*, A collection of recipes from various computer networks, January 15 (consultato il 18/11/2006).

- Hastings A., Clifton-Brown J., Wattenbach M., Mitchell C.P., Stampfl P., Smith P. (2009), *Future energy potential of Miscanthus in Europe*, «GCB Bioenergy», 1, pp. 180-196.
- Heaton E.A., Clifton-Brown J., Voigt T.B., Jones M.B., Long S.P. (2004), *Miscanthus for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois*, «Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change», 9, pp. 21-30.
- Heaton E., Voigt T., Long S.P. (2004), *A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water*, «Biomass and Bioenergy», 27, pp. 21-30.
- Hecker U. (1992), *Latifoglie. Piante legnose spontanee dell'Europa continentale*, Zanichelli, Bologna.
- Herve C., Ceulemans R. (1996), *Short-rotation coppiced vs non-coppiced poplar: a comparative study at two different fields sites*, «Biomass and Bioenergy», 11(2-3), pp. 139-150.
- Himken M., Lammel J., Neukirchen D., Czypionka-Krause U., Olf H.-W. (1997), *Cultivation of Miscanthus under west European conditions: seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization*, «Plant and Soil», 189, pp. 117-126.
- Himmel M.E., Ding S.-Y., Johnson D.K., Adney W.S., Nimlos M.R., Brady J.W., Foust T.D. (2007), *Biomass recalcitrance: engineering plants and enzymes for bio-fuels production*, «Science» 315, pp. 804-807.
- Hodgson E.M., Lister S.J., Bridgwater A.V., Clifton-Brown J., Donnison I.S. (2010), *Genotypic and environmentally derived variation in the cell wall composition of Miscanthus in relation to its use as a biomass feedstock*, «Biomass and Bioenergy», 34, pp. 652-660.
- Hodkinson T.R., Chase M.W., Lledó M.D., Salamin N., Renvoize S.A. (2002), *Phylogenetics of Miscanthus, Saccharum and related genera (Saccharinae, Andropogoneae, Poaceae) based on DNA sequences from ITS nuclear ribosomal DNA and plastid trnL intron and trnL-F intergenic spacers*, «Journal of Plant Research», 115, pp. 381-392.
- Hoshovsky M. (1987), *Element f stewardship abstract: Arundo donax*, The Nature Conservancy, San Francisco, CA.
- Hsu F.H., Nelson C.J., Matches A.G. (1985), *Temperature effects on germination of perennial warmseason forage grasses*, «Crop Sci.», 25, pp. 215-220.
- Huisman W. (2003), *Optimising harvesting and storage systems for energy crops in The Netherlands*, Wageningen University, Netherlands, Dept. Agrotechnology and Food Science, Farm Technology Group, Paper presented at the International Conference on Crop Harvesting and Processing, February 9-11, Louisville, Kentucky, USA.
- Huntley J.C. (1990), *Robinia pseudoacacia L. black locust*, in *Silvics of North America*, a cura di Burns R.M., Honkala B.H., vol. 2, «Hardwoods. Agric. Handb.», 654, pp. 755-761.
- IBIMET (2004), *Dai parametri meteorologici ai modelli per lo sviluppo e la crescita delle colture*, Collana tecnico-scientifica IBIMET, Quaderno n. 12/II.
- IEA (2012), *IEA Statistics. Renewables Information*, <<http://www.iea.org/media/training/presentations/statisticsmarch/RenewablesInformation.pdf>> (04/16).

- IEA Bioenergy Task 37 (2010), *Publications: Member countries, Country reports and Task 37; Case Studies of the Task*, <<http://www.iea-biogas.net/publications.htm>; <http://www.iea-biogas.net/casestudies.htm>> (04/16).
- INFC (2005), *Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio*, Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, Ispettorato Generale – Corpo Forestale dello Stato, CRA – Istituto Sperimentale per l'Assessment Forestale e per l'Alpicoltura.
- Installazione e gestione delle caldaie a legna su piccola scala: aspetti normativi, termotecnica e progettuali*, Atti del convegno Progetto Fuoco, Verona 30 marzo 2004.
- ISPRA (2010), *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2008*, National Inventory Report.
- Jeguirim M., Dorge S., Trové G. (2010), *Thermogravimetric analysis and emission characteristics of two Energy crops in air atmosphere: Arundo donax and Miscanthus giganteus*, «Bioresource Technology», 101, pp. 788-793.
- Johnson M., Dudley T., Burns C. (2006), *Seed production in Arundo donax?*, Cal-IPC News, 12-13.
- Junginger M. et al. (2008), *Developments in international bioenergy trade*, «Biomass and Bioenergy», 32, pp. 717-729.
- Kellezi M. (2009), *L'impiego delle coltivazioni arboree a rapida crescita per produrre energia verde: metodi colturali, raccolta e impieghi*, Tesi Dottorato di Ricerca, Università degli Studi della Tuscia.
- Keresztesi B. (1980), *The black locust*, «Unasylyva», 32, pp. 23-33.
- Khudamrongsawat J., Tayyar R., Holt J.S. (2004), *Genetic diversity of giant reed (Arundo donax) in the Santa Ana river, California*, «Weed Science», 52, pp. 395-405.
- Kiniry J.R., Sanderson M.A., Williams J.R., Tischler C.R., Hussey M.A., Ocum-paugh W.R., Read J.C., Van Esbroeck G.A., Reed R.L. (1996), *Simulating Alamo switchgrass with the ALMANAC model*, «Agron. J.», 88, pp. 602-606.
- Kirmse R.D., Fisher J.T. (1989), *Species screening and biomass trials of woody plants in the semi-arid southwest United States*, «Biomass», 18 (1), pp. 15-29.
- Klinge Biel A., Montgomery P. (1961), *Land-capability classification*, «Agriculture Handbook», 210, Soil Conservation Service, U.S. Dept. of Agriculture.
- Kristensen E.F. (2001), *Harvesting and handling of miscanthus*. Danish Institute of Agricultural Sciences, disponibile su <http://www.shortrotationcrops.org/PDFs/IEA_Miscanthus.pdf> (04/16).
- Lanteri S., Portis E. (2008), *Globe artichoke and Cardoon*, in *Vegetables I: Asteraceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, and Cucurbitaceae*, a cura di Prohens J., Nuez F., Springer, pp. 49-74.
- Leslie A.D., Mencuccini M., Perks M. (2012), *The potential for Eucalyptus as a wood fuel in the UK*, «Applied Energy», 89, pp. 176-182.
- Lewandowski I., Clifton-Brown J.C., Scurlock J.M.O., Huisman W. (2000), *Miscanthus: European experience with a novel energy crop*, «Biomass and Bioenergy», 19, pp. 209-227.
- Lewandowski I., Schmidt U. (2006), *Nitrogen, energy and land use efficiency of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 112, pp. 335-346.

- Lewandowski I., Scurlock J.M.O., Lindvall E., Christou M. (2003), *The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe*, «Biomass and Bioenergy», 25, pp. 335-361.
- Licht L.A., Isebrands J.G. (2005), *Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities*, «Biomass and Bioenergy», 28, pp. 203-218.
- Liesebach M., Von Wuehlich G., Muhs H.J. (1999), *Aspen for short-rotation coppice plantations on agricultural sites in Germany: Effects of spacing and rotation time on growth and biomass production of aspen progenies*, «Forest Ecology and Management», 121, pp. 25-39.
- Lovett A.A., Sunnenberg G.M., Richter G.M., Dailey A.G., Riche A.B., Karp A. (2009), *Land use implications of increased biomass production identified by GIS – based suitability and yield mapping for Miscanthus in England*, «Bioenergy Research», 2(1-2), pp. 17-28.
- Madakadze I.C. (1997), *Physiology, productivity and utilization of warm season (C4) grasses in a short growing season area*, PhD thesis McGill University, Montreal, Quebec, Canada.
- Maetzel F., La Mantia T. (2007), *Produzione e utilizzazione delle biomasse dei rimboschimenti in Sicilia*, «L'Italia Forestale e Montana», 5-6, pp. 437-451.
- Magagnotti N., Spinelli R., Picchi G., Lombardini C. (2010), *Testata di raccolta in prova su pioppo e robinia di 4 anni*, «L'Informatore Agrario», 11, suppl., pp. 24-26.
- Makeschin F. (1994), *Effects of energy forestry on soils*, «Biomass Bioenergy», 6, pp. 63-79.
- Mantineo M., D'Agosta G.M., Copani V., Patanè C., Cosentino S.L. (2009), *Biomass yield and energy balance of three perennial crops for Energy use in the semi arid Mediterranean environment*, «Field Crop Research», 114, pp. 204-213.
- Mariani C., Cabrini R., Danin A., Piffanelli P., Fricano A., Gomasasca S., Dicandido M., Grassi F., Soave C. (2010), *Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (Arundo donax L.): a promising weedy energy crop*, «Ann. Appl. Biol.», 157, pp. 191-202.
- Martínez-Pérez N., Cherryman S.J., Premier G.C., Dinsdale R.M., Hawkes D.L., Hawkes F.R., Kyazze G., Guwy A.J. (2007), *The potential for hydrogen-enriched biogas production from crops: Scenarios in the UK*, «Biomass and Bioenergy», 31, pp. 95-104.
- Mauro R., Portis E., Acquadro A., Lombardo S., Mauromicale G., Lanteri S. (2008), *Genetic diversity of globe artichoke landraces from Sicilian small-holdings: implications for evolution and domestication of the species*, «Conservation Genetics», DOI: 10.1007/s10592-008-9621-2.
- Mavrogianopoulos G., Vogli V., Kyritsis S. (2002), *Use of wastewater as a nutrient solution in a closed gravel hydroponic culture of giant reed (Arundo donax)*, «Bioresource Technology», 82, pp. 103-107.
- Mazzoncini M. (2004), *Valutazione di specie poliennali a corta rotazione (specie annuali)*, Progetto TISEN, Risultati del secondo anno, Istituto Sperimentale per le Colture Industriali, Bologna.
- Mazzoncini M., Di Bene C., Coli A., Bonari E. (2004), *Gestione degli Agroecosistemi e mitigazione dell'effetto serra*, «Informatore Agrario», aprile, pp. 27-32.

- McKendry P. (2002), *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass*, «Bioresource Technology», 83, pp. 37-46.
- McLaughlin S.B., Kszos L.A. (2005), *Development of switchgrass (Panicum virgatum) as a bioenergy feedstock in the United States*, «Biomass and Bioenergy», 28, pp. 515-535.
- Mendel Z., Protasov A., Fisher N., La Salle J. (2004), *Taxonomy and biology of Leptocybe invasa gen. & sp. n. (Hymenoptera: Eulophidae), an invasive gall inducer on Eucalyptus*, «Australian Journal of Entomology», 43, pp. 101-113.
- Michel R., Gruber R., Burg P., Rapagnà S., Mazziotti Di Celso G., Courson C. (2007), *Gasification of Miscanthus x Giganteus in catalytic conditions: Production of syngas, preliminary results*, Names, 3rd France-Russia Seminar, pp. 99-102.
- Minotta G., Facciotto G., Bergante S. (2008), *Indagine sui fattori che influenzano la produttività iniziale di cedui a corta rotazione di pioppo e salice nell'Italia settentrionale*, Atti del Terzo Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina (ME), 16-19 ottobre 2008, Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, pp. 864-868.
- Minotta G., Muzzi E. (2007), *Indagini su cedui di pioppo a turno breve nella pianura ferrarese*, «L'Italia Forestale e Montana», 5-6, pp. 411-419.
- Möller K., Stinner W. (2009), *Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides)*, «European Journal of Agronomy», 30, pp. 1-16.
- Montemurro F., Colucci R., Martinelli N. (2002), *Nutrizione azotata ed efficienza della fertilizzazione del sorgo zuccherino in ambiente mediterraneo*, «Rivista di Agronomia», 35, pp. 313-318.
- Monti A., Di Virgilio N., Venturi G. (2008), *Mineral composition and ash content of six major energy crops*, «Biomass and Bioenergy», 32, pp. 216-223.
- Monti A., Pritoni G., Venturi G. (2004), *Evaluation of productivity of 18 genotypes of switchgrass for energy destination in northern Italy*, Proceedings 2nd World Biomass Conference, Rome, 10-14 May, pp. 240-243.
- Monti A., Pritoni G., Venturi P., Canestrà R. (2006), *Culture da biomassa: panico e canna comune, performance a confronto*, «Agricoltura», 34(11), pp. 80-82.
- Monti A., Venturi G. (2006a), *Panicum virgatum (L): una nuova coltura per energia in Italia. Aspetti generali*, «Dal Seme», 3, pp. 46-56.
- Monti A., Venturi G. (2006b), *Panicum virgatum (L): una nuova coltura per energia in Italia. Agrotecnica*, «Dal Seme», 4, pp. 57-65.
- Monti A., Venturi P., Elbersen H.W. (2001), *Evaluation of the establishment of lowland and upland switchgrass (Panicum virgatum L.) varieties under different tillage and seedbed conditions in northern Italy*, «Soil & Tillage Research», 63, pp. 75-83.
- Monti A., Zatta A. (2009), *Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy*, «Agriculture, Ecosystems and Environment», 132, pp. 252-259.
- Morini M., Pinelli M. (2009), *Produzione di energia da biomasse. Possibilità per produzioni agricole marginali, residui agricoli ed industriali, rifiuti*, Università degli studi di Ferrara. Portomaggiore, 17 febbraio.

- Moser L.E., Vogel K.P. (1995), *Switchgrass, Big Bluestem, and Indiangrass*, in *An introduction to grassland agriculture*, edited by Barnes R.F., Miller D.A., Nelson C., Forages, 5th ed., vol. 1, Ames, IA: Iowa University Press, pp. 409-420.
- Mshandete A., Kivaisi A., Rubindamayugi M., Mattiasson B. (2004), *Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes*, «Bioresource Technology», 95, pp. 19-24.
- Mughini G. (2001), *Selezione di cloni di Eucalyptus grandis W. Hill ed maiden per la produzione di legname di qualità*, «Sherwood», 72, pp. 33-36.
- Mughini G. (2003), *Gli eucalitti*, in *L'arboricoltura da legno: un'attività produttiva al servizio dell'ambiente*, a cura di Minotta G., Edizioni Avenue Media Bologna, pp. 34-38.
- Mughini G. (2006), *L'eucalitto in coltura a turno breve per l'Italia centro-meridionale (Eucalyptus SRC)*, Fiera di Verona, 9-12 febbraio 2006, Bioenergy Word 2006 Exhibition.
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B., Kent J. (2000), *Biodiversity hotspots for conservation priorities*, «Nature», 403, pp. 853-858.
- Nassi o Di Nasso (2008), *Valutazione di alcuni aspetti agronomici ed eco-fisiologici di Arundo donax L., coltura erbacea poliennale per la produzione di biomassa da energia*, PhD Thesis, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Pisa.
- Nassi o Di Nasso N., Angelini L.G., Bonari E. (2009a), *Studio della dinamica dei nutrienti in due ecotipi di canna comune (Arundo donax L.) in Italia centrale*, XXXVIII Convegno Nazionale della Società Italiana di Agronomia (SIA), Firenze, Italy, pp. 141-142.
- Nassi o Di Nasso N., Angelini L.G., Bonari E. (2009b), *Improving energy crop cultivation in the Mediterranean region: nutrient content, uptake and nutrient use efficiency in giant reed (Arundo donax L.)*, 16th Nitrogen Workshop – Connecting different scales of nitrogen use in agriculture, Torino, pp. 321-322.
- Nassi o Di Nasso N., Angelini L.G., Bonari E. (2009c), *Influenza dell'epoca di raccolta sulla resa e sulla composizione della biomassa di canna comune (Arundo donax L.)*, XXXVIII Convegno Nazionale della Società Italiana di Agronomia (SIA), Firenze, Italy, pp. 139-140.
- Nassi o Di Nasso N., Angelini L.G., Bonari E. (2010), *Influence of fertilization and harvest time on fuel quality of giant reed (Arundo donax L.) in central Italy*, «European Journal of Agronomy», 32, pp. 219-227.
- Nassi o Di Nasso N., Bosco S., Di Bene C., Coli A., Mazzoncini M., Bonari E. (2011), *Energy efficiency in long-term Mediterranean cropping systems with different management intensities*, «Energy», 36(4), pp. 1924-1930.
- Nassi o Di Nasso N., Guidi W., Ragaglini G., Tozzini C., Bonari E. (2010), *Biomass production and Energy balance of a 12-year old short-rotation coppice poplar stand under different cutting cycles*, «GCB Bioenergy», 2(2), pp. 89-97.
- Nassi o Di Nasso N., Roncucci N., Triana F., Bonari E. (2010), *Produttività di canna comune (Arundo donax L.) e miscanto (Miscanthus x giganteus Greef et Deuter), colture poliennali dedicate ad uso energetico: parte II – macronutrienti e qualità della biomassa*, XXXIX Convegno Nazionale della Società Italiana di Agronomia (SIA), Roma, Italy, pp. 23-24.

- Nassi o Di Nasso N., Roncucci N., Triana F., Tozzini C., Bonari E. (2011a), *Productivity of giant reed (Arundo donax L.) and miscanthus (Miscanthus x giganteus Greef et Deuter) as energy crops: growth analysis*, «Italian Journal of Argonomy», 6, pp. 141-147.
- Nassi o Di Nasso N., Roncucci N., Triana F., Tozzini C., Bonari E. (2011b), *Seasonal nutrient dynamics and biomass quality of giant reed (Arundo donax L.) and miscanthus (Miscanthus x giganteus Greef et Deuter) as energy crops*, «Italian Journal of Argonomy», 6, pp. 152-158.
- Nassi o Di Nasso N., Roncucci N., Triana F., Tozzini C., Bonari E. (2011c), *Giant reed (Arundo donax L.) and miscanthus (Miscanthus x giganteus Greef et Deuter) as Energy crops in a Mediterranean environment: growth analysis and nutrients content*, «Aspects of Applied Biology», 112, Biomass and Energy Crops IV, pp. 75-82.
- Nocentini S. (2010), *Le specie forestali esotiche: la sperimentazione di Aldo Pavari e le prospettive attuali*, «L'Italia Forestale e Montana», 65 (4), pp. 449-457.
- Obernberger I., Brunner T., Bärnthaler G. (2006), *Chemical properties of solid biofuels – Significance and impact*, «Biomass and Bioenergy», 30, pp. 973-982.
- Onofry A. (1940), *La Canna comune (Arundo donax L.)*, Cremonese Libraio Editore, Roma.
- Ortega G. (2007), *Cynara cardunculus L. Plant Resources, Proceedings of the sixth international symposium on artichoke, cardoon and their wild relatives*, Jeavons-Leler Press and Ten Speed Press. 1920 edition in Internet Archive "Cardoon – General information", Michigan State University Extension, August 3, 1999 (consultato il 18/11/2006).
- Papazoglou E.G. (2007), *Arundo donax L. stress tolerance under irrigation with heavy metal aqueous solutions*, «Desalination», 211, pp. 304-313.
- Papazoglou E.G., Karantounias G.A., Vemmos S.N., Bouranis D.L. (2005), *Photosynthesis and growth responses of giant reed (Arundo donax L.) to the heavy metals Cd and Ni*, «Environment International», 31, pp. 243-249.
- Pari L. (1999), *Development of a prototype harvester for poplar and eucalyptus under Italian condition*, EECI Network, August 1999.
- Pari L., Civitarese L., Del Giudice A. (2010), *Abbatitrice andanatrice. Versione pre-commerciale della macchina*, in *Innovazioni tecnologiche per le agro energie. Sinergie tra ricerca e impresa*, «Sherwood», 168, suppl. 2, pp. 6-10.
- Pari L., Civitarese V., Suardi A. (2009), *Prototipo per meccanizzare il trapianto di canna comune*, «L'Informatore agrario», suppl., 29, pp. 19-21.
- Pari L., Suardi A., Giannini E., Civitarese V. (2009), *Strategie per meccanizzare la raccolta di canna comune*, «L'Informatore agrario», suppl., 29, pp. 22-25.
- Pari L., Venturi P. (1999), *Propagazione delle colture da biomassa poliennali rizomatose*, Atti del XXXIII Convegno annuale della Società Italiana di Agronomia, Le colture "non alimentari", Legnaro (PD) 20-23 settembre, pp. 75-76.
- Paris P., Mareschi L., Sabatti M., Pisanelli A., Ecosse A., Nardin F., Scarascia-Mugnozza G. (2011), *Comparing hybrid Populus clones for SRF across northern Italy after two biennial rotations: Survival, growth and yield*, «Biomass and Bioenergy», 35, pp. 1524-1532.

- Paris P., Todaro L., Sacchetti R., Scarascia Mugnozza G., Cannata F. (2006), *La robinia per le piantagioni da biomassa in zone marginali*, «Alberi e Territorio», 10-11, pp. 22-27.
- Parrish D.J., Fike J.H. (2005), *The biology and agronomy of switchgrass for biofuels*, «Crit. Rev. Plant Sci.», 24, pp. 423-459.
- Pellegrino E., Di Bene C., Tozzini C., Bonari E. (2011), *Impact on soil quality of a 10-year-old Short-Rotation Coppice Poplar Stand compared with intensive agricultural and uncultivated systems in a Mediterranean area*, «Agriculture, Ecosystems & Environment», 140, pp. 245-254.
- Pepermans G. et al. (2005), *Distributed generation: definition, benefits and issues*, «Energy Policy», 33, pp. 787-798.
- Perdue R.E. (1958), *Arundo donax – Source of musical reeds and industrial cellulose*, «Economic Botany», 12(4), pp. 368-404.
- Pereira H. (1998), *Eucalypt species as Energy crops*, EECI Network.
- Piccioni E., Bonari E. (2006), *SRF di pioppo nella pianura litoranea toscana. Principali risultati di alcune esperienze a lungo periodo* Sherwood, «Foreste ed Alberi Oggi», 128, pp. 31-36.
- Picco F., Giorcielli A., Castro G. (2010), *Chiave dicotomica per il riconoscimento in vivaio dei principali cloni di pioppo coltivati nell'Unione Europea*, vol. I, Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, p. 96.
- Pignone D., Sonnante G. (2010), *Origine ed evoluzione*, in *Il Carciofo e il Cardo*, Bayer Cropscience Ed., pp. 1-11.
- Pistocchi C., Guidi W., Piccioni E., Bonari E. (2009), *Water requirements of poplar and willow vegetation filters grown in lysimeter under Mediterranean conditions: results of the second year*, «Desalination», 246, pp. 137-146.
- Plummer A.P. (1977), *Revegetation of disturbed Intermountain area sites*, in *Reclamation and use of disturbed lands of the Southwest*, a cura di Thames J.C., University of Arizona Press, Tucson, AZ, pp. 302-337.
- Poepplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., Van Wesemael B., Schumacher J., Gensior A. (2011), *Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach*, «Global Change Biology», 17(7), pp. 2415-2427.
- Primi di Torviscosa, n.d. Associazione Primi di Torviscosa, disponibile su: <<http://www.primiditorviscosa.it>> (04/16).
- Proe M.F., Craig J., Griffiths J., Wilson A., Reid A. (1999), *Comparison of biomass production in coppice and single stem woodlands managements systems on an imperfectly drained gley soil in central Scotland*, «Biomass and Bioenergy», 17, pp. 141-151.
- Protasov A., La Salle J., Blumberg D., Brand D., Saphir N., Assale F., Fisher N., Mendel Z. (2007), *Biology, revised taxonomy and impact on host plant of *Ophelimus maskellii*, an invasive gall inducer on *Eucalyptus* spp. in the Mediterranean area*, «Phytoparasitica», 35 (1), pp. 50-75.
- Quaranta F., Belocchi A., Bottazzi P., Talluri P., Desiderio E. (1998), *Risultati di un triennio di prove su sorghi ibridi da fibra*, «L'Informatore Agrario», 14, pp. 43-49.
- Quaranta F., Monotti M., Belocchi A., Del Pino A., Di Franco F., Desiderio E. (1994), *Valutazione produttiva di sorghi per impieghi cartari in Italia centrale*, «L'Informatore Agrario», 13, pp. 47-57.

- Raccuia S.A., Mainolfi A., Mandolino G., Melilli M.G. (2004), *Genetic diversity in *Cynara. cardunculus* L. revealed by AFLP markers: wild and cultivated taxa comparisons*, «Plant Breeding», 123, pp. 280-284.
- Ragaglini G., Tozzini C., Dragoni F., Triana F., Giulietti V., Nasso N., Taccini F., Bonari E. (2011), *Effect of water availability on 2-year poplar SRC growth and productivity in Mediterranean climate: results after the first cutting cycle*, «Biomass and Energy Crops IV – Aspects of Applied Biology», 112, pp. 315-321.
- Ragaglini G., Villani R., Guidi W., Bonari E. (2008), *Bioenergy production assessment at regional level under different scenarios of resources exploitation*, «Aspects of applied Biology», 90, pp. 109-118.
- Ragaglini G., Villani R., Silvestri N., Bonari E. (2011), *Il contributo delle colture dedicate al settore delle agroenergie in Toscana: sviluppo di un modello previsionale su base GIS*, «L'Italia Forestale e Montana», 66(4), pp. 267-282.
- Ragaglini G., Villani R., Triana F., Tozzini C., Bonari E. (2009), *Stima della potenzialità produttiva delle agrienergie in Toscana. Capitolo 1: I comparti agricolo e agroindustriale*, Manuale ARSIA.
- Rédei K., Osváth-Bujtás Z., Veperdi I. (2008), *Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.). Improvement in Hungary: a Review*, «Acta Silv. Lign. Hung.», 4, pp. 127-132.
- Regalbutto J.R. (2009), *Cellulosic biofuels – Got gasoline?*, «Science», 325, pp. 822-824.
- Regolamento (CE) n. 74/2009 del Consiglio del 19 gennaio 2009 che modifica il regolamento (CE) n. 1698/2005 sul sostegno allo sviluppo rurale da parte del Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale (FEASR).
- Richter G.M., Riche A.B., Dailey A.G., Gezan S.A., Powlson D.S. (2008), *Is UK biofuel supply from *Miscanthus water-limited?**, «Soil Use and Management», 24, pp. 235-245.
- Rizzo M.C., Lo Verde G., Rizzo R., Buccellato V., Calca V. (2006), *Introduzione di *Closterocerus* sp. in Sicilia per il controllo biologico di *Ophelimus maskellii* Ashmead (Hymenoptera: Eulophidae) galligeno esotico sugli eucalipti*, «Boll. Zool. Agr. Bachic.», Sez. II, 38 (3), pp. 237-248.
- Robbins, W.W., Bellue M.K., Ball W.S. (1970), *Weeds of California*, State of California, Dept. of Agriculture.
- Rossa B., Tuffers A.V., Naidoo G., von Willert D.J. (1998), **Arundo donax* L. (Poaceae) – A C3 species with unusually high photosynthetic capacity*, «Bot. Acta», 111, pp. 216-221.
- Rowe R.L., Street N.R., Taylor G. (2009), *Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK*, «Renewable and Sustainable Energy Reviews», 13, pp. 271-290.
- Sage R.B., Cunningham M., Boatman N. (2006), *Birds in willow short rotation coppice compared to other arable crops in central England and a review of bird census data from energy crops in the UK*, «Ibis», 148, pp. 184-197.
- Sanderson M.A., Reed R.L., McLaughlin S.B., Wullschleger S., Conger B., Parrish D., Wolf D.D., Taliaferro C., Hopkins A.A., Ocumpaugh W., Hussey M.A., Read J.C., Tischler C.R. (1996), *Switchgrass as a sustainable bioenergy crop*, «Bioresour. Technol.», 56, pp. 83-93.

- Sanderson M.A., Wolf D.D. (1995), *Morphological development of switchgrass in diverse environments*, «Agron. J.», 87, pp. 908-915.
- Schlegel H.G. (1996), *Microbiologia – Prima edizione italiana condotta sulla settima edizione tedesca*, Zanichelli, Bologna.
- 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, pp. 207-226.
- Scurlock J.M.O. (1999), *Miscanthus: A Review of European Experience with a Novel Energy Crop. (Report No. ORNL/TM-13732)*, Oak Ridge National Laboratory, Environmental Sciences Division (USA).
- Senelwa K., Sims R.E.H. (1999), *Fuel characteristics of short rotation forest biomass*, «Biomass and Bioenergy», 17, pp. 127-140.
- Service R.F. (2007), *Biofuel researchers prepare to reap a new harvest*, «Science», 315, pp. 1488-1491.
- Sharma K.P., Kushwaha S.P.S., Gopal B. (1999), *Nutrient dynamics in an Arundo donax wetland: nutrient uptake, seasonal changes in tissue concentration, and release during in situ decomposition*, «International Journal of Ecology and Environmental Sciences», 25, pp. 1-20.
- Shatalov A.A., Pereira H. (2000), *Arundo donax L. (giant reed) as a source of fibres for paper industry: perspectives for modern ecologically friendly pulping technologies*, in *Biomass for Energy and Industry*, edited by Kyritsis S., Beenackers A.A.C.M., Helm P., Grassi A., Chiaramonti D., Proceeding of the First World Conference, Sevilla, Spain, 5-9 June 2000, James & James (Science Publishers) Ltd., London, 2001.
- Shatalov A.A., Pereira H. (2002), *Influence of stem morphology on pulp and paper properties of Arundo donax L. reed*, «Industrial Crops and Products» 15, pp. 77-83.
- Shoji S., Kurebayashi T., Yamada I. (1990), *Growth and chemical composition of Japanese pampas grass (Miscanthus sinensis) with special reference to the formation of dark-colored Andisols in northeastern Japan*, «Soil Science and Plant Nutrition», 36, pp. 105-120.
- Sims R.E.H., Mabee W., Saddler J.N., Taylor M. (2010), *An overview of second generation biofuel technologies*, «Bioresource Technology», 101, pp. 1570-1580.
- Sims R.E.H., Venturi P. (2004), *All-year-round harvesting of short rotation coppice eucalyptus compared with the delivered costs of biomass from more conventional short season, harvesting systems*, «Biomass and Bioenergy», 26, pp. 27-37.
- Smith R., Slater F.M. (2011), *Mobilization of minerals and moisture loss during senescence of the energy crops Miscanthus × giganteus, Arundo donax and Phalaris arundinacea in Wales, UK*, «GCB Bioenergy», 3, pp. 148-157.
- Spatz H.C., Biesmann H., Bruchert F., Emanns A., Speck T. (1997), *Biomechanics of the giant reed Arundo donax*, «Philosophical transactions: Biological Sciences», vol. 352, pp. 1-10.
- Speciale mais*, «L'Informatore Agrario», 6 (suppl.), 2001-2006, pp. 57-62.
- Speciale sorgo*, «L'Informatore Agrario», 5 (suppl.), 1994-1996, pp. 50-52.
- Spinelli R., Magagnotti N. (2006), *Robinia, specie a crescita rapida per terreni marginali*, «L'Informatore Agrario», 18, pp. 48-51.

- Sprackling J.A., Read R.A. (1979), *Tree root systems in eastern Nebraska*, Nebraska Conservation Bulletin Number 37, The University of Nebraska, Institute of Agriculture and Natural Resources, Conservation and Survey Division, Lincoln, NE.
- Stephanopoulos G. (2007), *Challenges in engineering microbes for biofuels production*, «Science», 315, pp. 801-804.
- Stone K.R. (2009), *Robinia pseudoacacia*, in *Fire Effects Information System*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory.
- Strullu L., Cadouxa S., Preudhomme M., Jeuffroy M-H., Beaudoin N. (2011), *Biomass production and nitrogen accumulation and remobilisation by Miscanthus × giganteus as influenced by nitrogen stocks in belowground organs*, «Field Crops Research», 121, pp. 381-391.
- Sutherland E.K., Hale B.J., Hix D.M. (2000), *Defining species guilds in the central hardwood forest, USA*, «Plant Ecology», 147, pp. 1-19.
- Tucker K., Sage R.B., Buckley G.P. (1997), *Introducing other plants into short rotation coppice willow*, «Aspects Appl Biol», 49, pp. 293-299.
- Turnbull J.W., Pryor L.D. (1978), *Species and seed source*, in *Eucalypts for wood production*, a cura di Hillis W.E., Brown A.G., Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.
- United Nation (1992), *Convention on Biological Diversity*, <<http://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>> (04/16).
- Venendaal R., Jørgensen U., Foster C.A. (1997), *European energy crops: A synthesis*, «Biomass and Bioenergy», 13, pp. 147-185.
- Venturi G., Bonari E. (2004), *Produzioni di biomasse da colture erbacee dedicate e non*, Convegno nazionale sulla Bioenergia, 12 maggio, Roma.
- Venturi P., Monti A., Piani I., Venturi G. (2004), *Evaluation of harvesting and post harvesting techniques for energy destination of switchgrass*, Proc. 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy.
- Villani R., Piccioni E., Ragaglini G., Sabbatini T., Bonari E. (2007), *GIS-based land suitability evaluation for bioenergy chains: a multidisciplinary approach applied to Mediterranean regions*, Atti della 15° Conferenza Europea sulle Biomasse.
- Vollmer K., Rainbolt C., Ferrell J. (2008), *Giant reed (Arundo donax): biology, identification and management*, Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Voss E.G. (1985), *Michigan flora. Part II. Dicots (Saururaceae-Cornaceae)*, Bull. 59, Cranbrook Institute of Science, Bloomfield Hills, MI; University of Michigan Herbarium, Ann Arbor, MI.
- Weber E. (2003), *Invasive plant species of the world: a reference guide to environmental weeds*, CABI Publishing, Cambridge, MA.
- Wiesenthal T., Mourelatou A., Petersen J-E., Taylor P. (2006), *How much bio-energy can Europe produce without harming the environment?*, European Environment Agency, EEA Report, 7, Copenhagen, p. 72.

- Williams C.M.J., Biswas T.K., Black I.D., Marton L., Czako M., Harris P.L., Pollock R., Heading S., Virtue J.G. (2008), *Use of poor quality water to produce high biomass yields of giant reed (Arundo donax L.) on marginal lands for biofuel or pulp/paper*, International Symposium on Underutilised Plants, Tanzania.
- Williams C.M.J., Harris P.L., Biswas T.K., Heading S. (2006), *Use of giant reed (Arundo donax L.) to treat wastewaters for resource recycling in South Australia*, 5th International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops, Mildura.
- Worldwatch Institute (2007), *Current status of the biofuel industry and markets*, in *Biofuels for transport* Earthscan, Londra, pp. 3-12.
- Zub H.W., Brancourt-Hulmel M. (2009), *Agronomic and physiological performance of different species of Miscanthus, a major energy crop. A review*, «Agronomy for Sustainable Development», 30, pp. 201-214.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ente Cassa di Risparmio di Firenze che ha voluto dare un contributo fattivo alla valorizzazione delle biomasse per la produzione di energie rinnovabili, in un territorio quale quello che caratterizza l'ambiente rurale toscano, dove la multifunzionalità delle aziende agricole oltre a svolgere un ruolo di protezione e valorizzazione ambientale va ad incidere anche sulla bellezza del paesaggio e da alcuni anni anche nell'approvvigionamento energetico.

Nicoletta Nassi o Di Nasso, laureata in Scienze e Tecnologie Agrarie presso l'Università di Pisa, nel 2008 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in "Scienze della Produzione vegetale ecocompatibile" con una tesi sulla valutazione della sostenibilità di sistemi a destinazione energetica basati sulla coltivazione di canna comune (*Arundo donax* L.). Ha poi potuto accrescere la sua esperienza nel campo dei sistemi agricoli *no food*, lavorando presso l'Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa, attraverso la partecipazione a progetti di ricerca nazionali e internazionali su questo tema e la stesura di numerosi articoli inerenti la sostenibilità delle colture perenni a destinazione energetica. All'interno di CRIBE, il Centro di Ricerca Interuniversitario sulle Biomasse da Energia, ha potuto, inoltre, collaborare con altre figure professionali come chimici, ingegneri ed economisti sviluppando un approccio multidisciplinare per lo studio della sostenibilità delle filiere agroenergetiche che va dallo studio della fase produttiva fino a quella di trasformazione.

Marco Mancini, laureato in Scienze Agrarie presso l'Università di Firenze, collabora con il Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agro-alimentari e dell'Ambiente dell'Università di Firenze e con la Fondazione per il Clima e la Sostenibilità. Conduce ricerche sull'agrometeorologia e agroclimatologia, in particolare studiando i rapporti con gli ecosistemi viticoli e cerealicoli, sull'uso energetico sostenibile delle biomasse agroforestali nonché sui sistemi per la microgenerazione energetica su piccola scala, su indagini di Life Cycle Assessment e di pianificazione territoriale delle energie rinnovabili.

Simone Orlandini, è professore ordinario presso il Dipartimento di Scienze delle Produzioni agroalimentari e dell'ambiente dell'Università di Firen-

ze (DISPAA). Laureato in Scienze Agrarie, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Agrometeorologia. Svolge attività didattica nel settore agronomico. È direttore del Centro Interdipartimentale di Bioclimatologia e Accademico Ordinario della Accademia dei Georgofili di Firenze. È coordinatore del Dottorato di Ricerca in “Scienze Agrarie e Ambientali” presso l’Università di Firenze ed è presidente della Fondazione per il Clima e la Sostenibilità. È stato eletto segretario-tesoriere e fa parte del Consiglio Direttivo della Società Italiana di Agronomia. I suoi principali interessi di ricerca sono lo studio dei rapporti suolo, pianta atmosfera, la crescita e sviluppo delle colture, la sostenibilità ambientale dei processi produttivi, il clima locale in ambienti urbani e rurali, mediante l’applicazione di modellistica, sistemi informativi geografici, telerilevamento.

Anna Dalla Marta, laureata in Scienze Agrarie Tropicali e Subtropicali presso l’Università di Firenze, ha un dottorato in Scienza del Suolo e Climatologia ed è attualmente ricercatrice a tempo determinato presso il Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell’Ambiente. Si occupa di agrometeorologia per una gestione sostenibile delle colture e del territorio attraverso l’uso di modelli, l’analisi delle relazioni tra clima, risposte delle colture e qualità delle produzioni, l’analisi dei bilanci ambientali applicati alle produzioni agricole e all’analisi del ruolo dell’agricoltura nella mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso la produzione di energie rinnovabili. Svolge attività di didattica in ambito agronomico, è field editor della rivista «Italian Journal of Agrometeorology».

Simona Bosco, laureata in Scienze Ambientali presso l’Università di Pisa, ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Scienze Chimiche indirizzo Ambientale presso il Dipartimento di Chimica dell’Università di Siena. Dal 2014 è ricercatrice presso l’Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore Sant’Anna di Pisa in quanto vincitrice del progetto FIRB (call 2013) “Integrazione e confronto di mezzi e itinerari tecnici innovativi a diversa ‘intensità ecologica’ finalizzati ad una gestione intelligente di sistemi agricoli conservativi” in qualità di Responsabile di Unità. Tra i suoi principali interessi lo studio dei gas serra nei sistemi agricoli e lo studio della sostenibilità delle filiere attraverso l’Analisi del Ciclo di Vita.

Federico Dragoni, laureato in Scienze Agrarie presso l’Università di Pisa, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Agrobioscienze presso la Scuola Superiore Sant’Anna, dove lavora tuttora come assegnista di ricerca dell’Istituto di Scienze della Vita. Si è occupato e si occupa soprattutto di agroenergie e tecnologie di conversione energetica delle biomasse. In particolare, ha dedicato la sua attività di ricerca principalmente a gestione anaerobica e produzione di biometano da colture lignocellulosiche, nei suoi aspetti agronomici, ambientali e biotecnologici.

Neri Roncucci è laureato in Scienze della Produzione e Difesa dei Vegetali presso l'Università di Pisa. Ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca presso la Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa discutendo una tesi incentrata su due colture da biomassa, canna comune e miscanto. Ha collaborato fattivamente con il Centro di Ricerca Interuniversitario sulle Biomasse da Energia e l'Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore Sant'Anna, occupandosi prevalentemente di colture da biomassa, loro adattabilità a diversi livelli di intensificazione agronomica e dinamiche di carbonio nel suolo. Ad oggi gestisce un'azienda agricola nel senese.

Maria Valentina Lasorella, è assistente di ricerca presso il Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA). Laureata in Scienze Agrarie, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca presso la scuola Superiore Sant'Anna di Pisa con una tesi sull'adattabilità del *Panicum virgatum* L. all'areale mediterraneo. Si occupa principalmente di analisi e valutazione dell'impatto delle politiche di sviluppo rurale in Italia ed EU. Inoltre ha condotto studi di valutazione della sostenibilità ambientale, economica e sociale in Europa e nei paesi in via di Sviluppo (PVS) in cui si mira a rafforzare le capacità produttive agricole locali in un'ottica di diversificazione culturale e ottimizzazione dell'uso delle risorse idriche.

Valentina Giulietti, laureata in Scienze Forestali presso l'Università di Firenze, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Scienze Agrarie e veterinarie, curriculum Produzioni Vegetali, con una tesi inerente le potenzialità produttive delle colture legnose in Short Rotation Forestry a destinazione energetica. Attualmente collabora presso l'Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore Sant'anna di Pisa al progetto LIFE + IPNOA, che mira a sviluppare un approccio diretto per la determinazione delle emissioni di N_2O e degli altri principali gas serra in agricoltura.

Cristiano Tozzini, laureato in Scienze Agrarie presso l'Università di Pisa, ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Agricoltura ecocompatibile e qualità degli alimenti presso l'Università di Pisa. Attualmente ricopre il ruolo di tecnico presso l'Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore di Studi Universitari e di Perfezionamento Sant'Anna di Pisa. L'attività di ricerca svolta è nell'ambito della Agronomia *food* e *no food*. Temi di studio sono la coltivazione di colture indirizzate alla conversione energetica, le principali filiere agro-energetiche, il riutilizzo di scarti in agricoltura o in ambito energetico. Per ciò che riguarda lo studio delle colture *food*: prove di lungo periodo delle principali componenti dell'agrotecnica, le varietà antiche di frumento e le colture foraggere.

Giorgio Ragolini, è ricercatore presso l'Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa. Laureato in Scienze e Tecnologie Agrarie, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Agricoltura, Ambiente e Territorio presso la Scuola Superiore Sant'Anna. I suoi principali interessi di ricerca riguardano la valorizzazione delle biomasse agricole ai fini energetici e la sostenibilità delle colture dedicate per la produzione di biomassa da energia. Ha condotto ricerche sulla produzione di biometano da colture poliennali da biomassa e sulla modellazione a scala territoriale di filiere bioenergetiche basate sullo sfruttamento di biomasse oleaginose e lignocellulosiche prodotte dai settori agricolo e forestale.

Ricardo Villani, laureato in Scienze Agrarie (Paraguay), MSc in Economia Ambientale (Giappone), ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Agronomia Ambientale presso la Scuola Superiore Sant'Anna di Pisa. Esperto di Sistemi Informativi Territoriali (GIS) applicati alla pianificazione dell'uso efficiente delle risorse a livello territoriale in ambito agricolo, ha contribuito a realizzare studi riguardanti diversi Paesi in Europa, Asia, Africa e America Latina a scala regionale e nazionale. La sua attuale ricerca presso la Scuola Superiore Sant'Anna include studi riguardanti l'utilizzo sostenibile delle risorse agro-forestali nell'ambito delle bioenergie, indagini a carattere territoriale riguardo le emissioni di gas a effetto serra dalle attività agricole e Analisi del Ciclo di Vita (LCA) dei prodotti agricoli.

Federico Triana Jimeno, laureato in Scienze Agrarie presso l'università di Pisa, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Agrobioscienze presso la Scuola Superiore Sant'Anna. Collabora con l'Istituto di Scienze della Vita della Scuola Superiore Sant'Anna. La sua ricerca si orienta verso lo studio dei rapporti suolo-pianta-atmosfera e la loro analisi attraverso strumenti modellistici. In particolare, ha studiato vari aspetti dello sviluppo e crescita delle colture erbacee perenni rizomatose in relazione ai fattori ambientali.

STRUMENTI
PER LA DIDATTICA E LA RICERCA

1. Brunetto Chiarelli, Renzo Bigazzi, Luca Sineo (a cura di), *Alia: Antropologia di una comunità dell'entroterra siciliano*
2. Vincenzo Cavaliere, Dario Rosini, *Da amministratore a manager. Il dirigente pubblico nella gestione del personale: esperienze a confronto*
3. Carlo Biagini, *Information technology ed automazione del progetto*
4. Cosimo Chiarelli, Walter Pasini (a cura di), Paolo Mantegazza, *Medico, antropologo, viaggiatore*
5. Luca Solari, *Topics in Fluvial and Lagoon Morphodynamics*
6. Salvatore Cesario, Chiara Fredianelli, Alessandro Remorini, *Un pacchetto evidence based di tecniche cognitivo-comportamentali sui generis*
7. Marco Masseti, *Uomini e (non solo) topi. Gli animali domestici e la fauna antropocora*
8. Simone Margherini (a cura di), *BIL Bibliografia Informatizzata Leopardiana 1815-1999: manuale d'uso ver. 1.0*
9. Paolo Puma, *Disegno dell'architettura. Appunti per la didattica*
10. Antonio Calvani (a cura di), *Innovazione tecnologica e cambiamento dell'università. Verso l'università virtuale*
11. Leonardo Casini, Enrico Marone, Silvio Menghini, *La riforma della Politica Agricola Comunitaria e la filiera olivicolo-olearia italiana*
12. Salvatore Cesario, *L'ultima a dover morire è la speranza. Tentativi di narrativa autobiografica e di "autobiografia assistita"*
13. Alessandro Bertirotti, *L'uomo, il suono e la musica*
14. Maria Antonietta Rovida, *Palazzi senesi tra '600 e '700. Modelli abitativi e architettura tra tradizione e innovazione*
15. Simone Guercini, Roberto Piovan, *Schemi di negoziato e tecniche di comunicazione per il tessile e abbigliamento*
16. Antonio Calvani, *Technological innovation and change in the university. Moving towards the Virtual University*
17. Paolo Emilio Pecorella, *Tell Barri/Kahat: la campagna del 2000. Relazione preliminare*
18. Marta Chevanne, *Appunti di Patologia Generale. Corso di laurea in Tecniche di Radiologia Medica per Immagini e Radioterapia*
19. Paolo Ventura, *Città e stazione ferroviaria*
20. Nicola Spinosi, *Critica sociale e individuazione*
21. Roberto Ventura (a cura di), *Dalla misurazione dei servizi alla customer satisfaction*
22. Dimitra Babalis (a cura di), *Ecological Design for an Effective Urban Regeneration*
23. Massimo Papini, Debora Tringali (a cura di), *Il pupazzo di garza. L'esperienza della malattia potenzialmente mortale nei bambini e negli adolescenti*
24. Manlio Marchetta, *La progettazione della città portuale. Sperimentazioni didattiche per una nuova Livorno*
25. Fabrizio F.V. Arrigoni, *Note su progetto e metropoli*
26. Leonardo Casini, Enrico Marone, Silvio Menghini, *OCM seminativi: tendenze evolutive e assetto territoriale*
27. Pecorella Paolo Emilio, Raffaella Pierobon Benoit, *Tell Barri/Kahat: la campagna del 2001. Relazione preliminare*
28. Nicola Spinosi, *Wir Kinder. La questione del potere nelle relazioni adulti/bambini*
29. Stefano Cordero di Montezemolo, *I profili finanziari delle società vinicole*
30. Luca Bagnoli, Maurizio Catalano, *Il bilancio sociale degli enti non profit: esperienze toscane*
31. Elena Rotelli, *Il capitolo della cattedrale di Firenze dalle origini al XV secolo*
32. Leonardo Trisciuzzi, Barbara Sandrucci, Tamara Zappaterra, *Il recupero del sé attraverso l'autobiografia*
33. Nicola Spinosi, *Invito alla psicologia sociale*
34. Raffaele Moschillo, *Laboratorio di disegno. Esercitazioni guidate al disegno di arredo*
35. Niccolò Bellanca, *Le emergenze umanitarie complesse. Un'introduzione*
36. Giovanni Allegretti, *Porto Alegre una biografia territoriale. Ricercando la qualità urbana a partire dal patrimonio sociale*
37. Riccardo Passeri, Leonardo Quagliotti, Christian Simoni, *Procedure concorsua-*

- li e governo dell'impresa artigiana in Toscana
38. Nicola Spinosi, *Un soffitto viola. Psicoterapia, formazione, autobiografia*
 39. Tommaso Urso, *Una biblioteca in divenire. La biblioteca della Facoltà di Lettere dalla penna all'elaboratore. Seconda edizione rivista e accresciuta*
 40. Paolo Emilio Pecorella, Raffaella Pierobon Benoit, *Tell Barri/Kahat: la campagna del 2002. Relazione preliminare*
 41. Antonio Pellicanò, *Da Galileo Galilei a Cosimo Noferi: verso una nuova scienza. Un inedito trattato galileiano di architettura nella Firenze del 1650*
 42. Aldo Burresti (a cura di), *Il marketing della moda. Temi emergenti nel tessile-abbigliamento*
 43. Curzio Cipriani, *Appunti di museologia naturalistica*
 44. Fabrizio F.V. Arrigoni, *Incipit. Esercizi di composizione architettonica*
 45. Roberta Gentile, Stefano Mancuso, Silvia Martelli, Simona Rizzitelli, *Il Giardino di Villa Corsini a Mezzomonte. Descrizione dello stato di fatto e proposta di restauro conservativo*
 46. Arnaldo Nesti, Alba Scarpellini (a cura di), *Mondo democristiano, mondo cattolico nel secondo Novecento italiano*
 47. Stefano Alessandri, *Sintesi e discussioni su temi di chimica generale*
 48. Gianni Galeota (a cura di), *Traslocare, riaggregare, rifondare. Il caso della Biblioteca di Scienze Sociali dell'Università di Firenze*
 49. Gianni Cavallina, *Nuove città antichi segni. Tre esperienze didattiche*
 50. Bruno Zanoni, *Tecnologia alimentare 1. La classe delle operazioni unitarie di disidratazione per la conservazione dei prodotti alimentari*
 51. Gianfranco Martiello, *La tutela penale del capitale sociale nelle società per azioni*
 52. Salvatore Cingari (a cura di), *Cultura democratica e istituzioni rappresentative. Due esempi a confronto: Italia e Romania*
 53. Laura Leonardi (a cura di), *Il distretto delle donne*
 54. Cristina Delogu (a cura di), *Tecnologia per il web learning. Realtà e scenari*
 55. Luca Bagnoli (a cura di), *La lettura dei bilanci delle Organizzazioni di Volontariato toscane nel biennio 2004-2005*
 56. Lorenzo Grifone Baglioni (a cura di), *Una generazione che cambia. Civismo, solidarietà e nuove incertezze dei giovani della provincia di Firenze*
 57. Monica Bolognesi, Laura Donati, Gabriella Granatiero, *Acque e territorio. Progetti e regole per la qualità dell'abitare*
 58. Carlo Natali, Daniela Poli (a cura di), *Città e territori da vivere oggi e domani. Il contributo scientifico delle tesi di laurea*
 59. Riccardo Passeri, *Valutazioni imprenditoriali per la successione nell'impresa familiare*
 60. Brunetto Chiarelli, Alberto Simonetta, *Storia dei musei naturalistici fiorentini*
 61. Gianfranco Bettin Lattes, Marco Bontempi (a cura di), *Generazione Erasmus? L'identità europea tra vissuto e istituzioni*
 62. Paolo Emilio Pecorella, Raffaella Pierobon Benoit, *Tell Barri / Kahat. La campagna del 2003*
 63. Fabrizio F.V. Arrigoni, *Il cervello delle passioni. Dieci tesi di Adolfo Natalini*
 64. Saverio Pisaniello, *Esistenza minima. Stanze, spazi della mente, reliquiario*
 65. Maria Antonietta Rovida (a cura di), *Fonti per la storia dell'architettura, della città, del territorio*
 66. Ornella De Zordo, *Saggi di anglistica e americanistica. Temi e prospettive di ricerca*
 67. Chiara Favilli, Maria Paola Monaco, *Materiali per lo studio del diritto antidiscriminatorio*
 68. Paolo Emilio Pecorella, Raffaella Pierobon Benoit, *Tell Barri / Kahat. La campagna del 2004*
 69. Emanuela Caldognetto Magno, Federica Cavicchio, *Aspetti emotivi e relazionali nell'e-learning*
 70. Marco Masseti, *Uomini e (non solo) topi (2ª edizione)*
 71. Giovanni Nerli, Marco Pierini, *Costruzione di macchine*
 72. Lorenzo Viviani, *L'Europa dei partiti. Per una sociologia dei partiti politici nel processo di integrazione europea*
 73. Teresa Crespellani, *Terremoto e ricerca. Un percorso scientifico condiviso per la caratterizzazione del comportamento sismico di alcuni depositi italiani*
 74. Fabrizio F.V. Arrigoni, *Cava. Architettura in "ars marmoris"*

75. Ernesto Tavoletti, *Higher Education and Local Economic Development*
76. Carmelo Calabrò, *Liberalismo, democrazia, socialismo. L'itinerario di Carlo Rosselli (1917-1930)*
77. Luca Bagnoli, Massimo Cini (a cura di), *La cooperazione sociale nell'area metropolitana fiorentina. Una lettura dei bilanci d'esercizio delle cooperative sociali di Firenze, Pistoia e Prato nel quadriennio 2004-2007*
78. Lamberto Ippolito, *La villa del Novecento*
79. Cosimo Di Bari, *A passo di critica. Il modello di Media Education nell'opera di Umberto Eco*
80. Leonardo Chiesi (a cura di), *Identità sociale e territorio. Il Montalbano*
81. Piero Degl'Innocenti, *Cinquant'anni, cento chiese. L'edilizia di culto nelle diocesi di Firenze, Prato e Fiesole (1946-2000)*
82. Giancarlo Paba, Anna Lisa Pecoriello, Camilla Perrone, Francesca Rispoli, *Partecipazione in Toscana: interpretazioni e racconti*
83. Alberto Magnaghi, Sara Giacomozzi (a cura di), *Un fiume per il territorio. Indirizzi progettuali per il parco fluviale del Valdarno empoleso*
84. Dino Costantini (a cura di), *Multiculturalismo alla francese?*
85. Alessandro Viviani (a cura di), *Firms and System Competitiveness in Italy*
86. Paolo Fabiani, *The Philosophy of the Imagination in Vico and Malebranche*
87. Carmelo Calabrò, *Liberalismo, democrazia, socialismo. L'itinerario di Carlo Rosselli*
88. David Fanfani (a cura di), *Pianificare tra città e campagna. Scenari, attori e progetti di nuova ruralità per il territorio di Prato*
89. Massimo Papini (a cura di), *L'ultima cura. I vissuti degli operatori in due reparti di oncologia pediatrica*
90. Raffaella Cerica, *Cultura Organizzativa e Performance economico-finanziarie*
91. Alessandra Lorini, Duccio Basosi (a cura di), *Cuba in the World, the World in Cuba*
92. Marco Goldoni, *La dottrina costituzionale di Sieyès*
93. Francesca Di Donato, *La scienza e la rete. L'uso pubblico della ragione nell'età del Web*
94. Serena Vicari Haddock, Marianna D'Ovidio, *Brand-building: the creative city. A critical look at current concepts and practices*
95. Ornella De Zordo (a cura di), *Saggi di Anglistica e Americanistica. Ricerche in corso*
96. Massimo Moneglia, Alessandro Panunzi (edited by), *Bootstrapping Information from Corpora in a Cross-Linguistic Perspective*
97. Alessandro Panunzi, *La variazione semantica del verbo essere nell'Italiano parlato*
98. Matteo Gerlini, *Sansone e la Guerra fredda. La capacità nucleare israeliana fra le due superpotenze (1953-1963)*
99. Luca Raffini, *La democrazia in mutamento: dallo Stato-nazione all'Europa*
100. Gianfranco Bandini (a cura di), *noi-loro. Storia e attualità della relazione educativa fra adulti e bambini*
101. Anna Taglioli, *Il mondo degli altri. Territori e orizzonti sociologici del cosmopolitismo*
102. Gianni Angelucci, Luisa Vierucci (a cura di), *Il diritto internazionale umanitario e la guerra aerea. Scritti scelti*
103. Giulia Mascagni, *Salute e disuguaglianze in Europa*
104. Elisabetta Cioni, Alberto Marinelli (a cura di), *Le reti della comunicazione politica. Tra televisioni e social network*
105. Cosimo Chiarelli, Walter Pasini (a cura di), *Paolo Mantegazza e l'Evoluzionismo in Italia*
106. Andrea Simoncini (a cura di), *La semplificazione in Toscana. La legge n. 40 del 2009*
107. Claudio Borri, Claudio Mannini (edited by), *Aeroelastic phenomena and pedestrian-structure dynamic interaction on non-conventional bridges and footbridges*
108. Emiliano Scampoli, *Firenze, archeologia di una città (secoli I a.C. - XIII d.C.)*
109. Emanuela Cresti, Iørn Korzen (a cura di), *Language, Cognition and Identity. Extensions of the endocentric/exocentric language typology*
110. Alberto Parola, Maria Ranieri, *Media Education in Action. A Research Study in Six European Countries*
111. Lorenzo Grifone Baglioni (a cura di), *Scegliere di partecipare. L'impegno dei giovani della provincia di Firenze nelle arene deliberative e nei partiti*

112. Alfonso Lagi, Ranuccio Nuti, Stefano Taddei, *Raccontaci l'ipertensione. Indagine a distanza in Toscana*
113. Lorenzo De Sio, *I partiti cambiano, i valori restano? Una ricerca quantitativa e qualitativa sulla cultura politica in Toscana*
114. Anna Romiti, *Coreografie di stakeholders nel management del turismo sportivo*
115. Guidi Vannini (a cura di), *Archeologia Pubblica in Toscana: un progetto e una proposta*
116. Lucia Varra (a cura di), *Le case per ferie: valori, funzioni e processi per un servizio differenziato e di qualità*
117. Gianfranco Bandini (a cura di), *Manuali, sussidi e didattica della geografia. Una prospettiva storica*
118. Anna Margherita Jasink, Grazia Tucci e Luca Bombardieri (a cura di), *MUSINT. Le Collezioni archeologiche egee e cipriote in Toscana. Ricerche ed esperienze di museologia interattiva*
119. Ilaria Caloi, *Modernità Minoica. L'Arte Egea e l'Art Nouveau: il Caso di Mariano Fortuny y Madrazo*
120. Heliana Mello, Alessandro Panunzi, Tommaso Raso (edited by), *Pragmatics and Prosody. Illocution, Modality, Attitude, Information Patterning and Speech Annotation*
121. Luciana Lazeretti, *Cluster creativi per i beni culturali. L'esperienza toscana delle tecnologie per la conservazione e la valorizzazione*
122. Maurizio De Vita (a cura di / edited by), *Città storica e sostenibilità / Historic Cities and Sustainability*
123. Eleonora Berti, *Itinerari culturali del consiglio d'Europa tra ricerca di identità e progetto di paesaggio*
124. Stefano Di Blasi (a cura di), *La ricerca applicata ai vini di qualità*
125. Lorenzo Cini, *Società civile e democrazia radicale*
126. Francesco Ciampi, *La consulenza direzionale: interpretazione scientifica in chiave cognitiva*
127. Lucia Varra (a cura di), *Dal dato diffuso alla conoscenza condivisa. Competitività e sostenibilità di Abetone nel progetto dell'Osservatorio Turistico di Destinazione*
128. Riccardo Roni, *Il lavoro della ragione. Dimensioni del soggetto nella Fenomenologia dello spirito di Hegel*
129. Vanna Boffo (edited by), *A Glance at Work. Educational Perspectives*
130. Raffaele Donvito, *L'innovazione nei servizi: i percorsi di innovazione nel re-tailing basati sul vertical branding*
131. Dino Costantini, *La democrazia dei moderni. Storia di una crisi*
132. Thomas Casadei, *I diritti sociali. Un percorso filosofico-giuridico*
133. Maurizio De Vita, *Verso il restauro. Temi, tesi, progetti per la conservazione*
134. Laura Leonardi, *La società europea in costruzione. Sfide e tendenze nella sociologia contemporanea*
135. Antonio Capestro, *Oggi la città. Riflessione sui fenomeni di trasformazione urbana*
136. Antonio Capestro, *Progettando città. Riflessioni sul metodo della Progettazione Urbana*
137. Filippo Bussotti, Mohamed Hazem Kalaji, Rosanna Desotgiu, Martina Pollastrini, Tadeusz Łoboda, Karolina Bosa, *Misurare la vitalità delle piante per mezzo della fluorescenza della clorofilla*
138. Francesco Dini, *Differenziali geografici di sviluppo. Una ricostruzione*
139. Maria Antonietta Esposito, *Poggio al vento la prima casa solare in Toscana - Windy hill the first solar house in Tuscany*
140. Maria Ranieri (a cura di), *Risorse educative aperte e sperimentazione didattica. Le proposte del progetto Innovascuola-AMELIS per la condivisione di risorse e lo sviluppo professionale dei docenti*
141. Andrea Runfola, *Apprendimento e reti nei processi di internazionalizzazione del retail. Il caso del tessile-abbigliamento*
142. Vanna Boffo, Sabina Falconi, Tamara Zappaterra (a cura di), *Per una formazione al lavoro. Le sfide della disabilità adulta*
143. Beatrice Töttössy (a cura di), *Fonti di Welllitteratur. Ungheria*
144. Fiorenzo Fantaccini, Ornella De Zordo (a cura di), *Saggi di Anglistica e Americanistica. Percorsi di ricerca*
145. Enzo Catarsi (a cura di), *The Very Hungry Caterpillar in Tuscany*
146. Daria Sarti, *La gestione delle risorse umane nelle imprese della distribuzione commerciale*
147. Raffaele De Gaudio, Iacopo Lanini, *Vivere e morire in Terapia Intensiva. Quotidianità in Bioetica e Medicina Palliativa*

148. Elisabete Figueiredo, Antonio Raschi (a cura di), *Fertile Links? Connections between tourism activities, socioeconomic contexts and local development in European rural areas*
149. Gioacchino Amato, *L'informazione finanziaria price-sensitive*
150. Nicoletta Setola, *Percorsi, flussi e persone nella progettazione ospedaliera. L'analisi configurazionale, teoria e applicazione*
151. Laura Solito e Letizia Materassi, *DIVERSE eppur VICINE. Associazioni e imprese per la responsabilità sociale*
152. Ioana Both, Ayşe Saraçgil e Angela Tarantino, *Storia, identità e canoni letterari*
153. Barbara Montecchi, *Luoghi per lavorare, pregare, morire. Edifici e maestranze edili negli interessi delle élites micenee*
154. Carlo Orefice, *Relazioni pedagogiche. Materiali di ricerca e formazione*
155. Riccardo Roni (a cura di), *Le competenze del politico. Persone, ricerca, lavoro, comunicazione*
156. Barbara Sibilio (a cura di), *Linee guida per l'utilizzo della Piattaforma Tecnologica P.O.M.A. Museo*
157. Fortunato Sorrentino, Maria Chiara Pettenati, *Orizzonti di Conoscenza. Strumenti digitali, metodi e prospettive per l'uomo del terzo millennio*
158. Lucia Felici (a cura di), *Alterità. Esperienze e percorsi nell'Europa moderna*
159. Edoardo Gerlini, *The Heian Court Poetry as World Literature. From the Point of View of Early Italian Poetry*
160. Marco Carini, Andrea Minervini, Giuseppe Morgia, Sergio Serni, Augusto Zaninelli, *Progetto Clic-URO. Clinical Cases in Urology*
161. Sonia Lucarelli (a cura di), *Gender and the European Union*
162. Michela Ceccorulli, *Framing irregular immigration in security terms. The case of Libya*
163. Andrea Bellini, *Il puzzle dei ceti medi*
164. Ambra Collino, Mario Biggeri, Lorenzo Murgia (a cura di), *Processi industriali e parti sociali. Una riflessione sulle imprese italiane in Cina (Jiangsu) e sulle imprese cinesi in Italia (Prato)*
165. Anna Margherita Jasink, Luca Bombardieri (a cura di), AKROTHINIA. *Contributi di giovani ricercatori italiani agli studi egei e ciprioti*
166. Pasquale Perrone Filardi, Stefano Urbani, Augusto Zaninelli, *Progetto ABC. Achieved Best Cholesterol*
167. Iryna Solodovnik, *Repository Istituzionali, Open Access e strategie Linked Open Data. Per una migliore comunicazione dei prodotti della ricerca scientifica*
168. Andrea Arrighetti, *L'archeosmologia in architettura*
169. Lorenza Garrino (a cura di), *Strumenti per una medicina del nostro tempo. Medicina narrativa, Metodologia Pedagogia dei Genitori e International Classification of Functioning (ICF)*
170. Ioana Both, Ayşe Saraçgil e Angela Tarantino, *Innesti e ibridazione tra spazi culturali*
171. Alberto Gherardini, *Squarci nell'avorio. Le università italiane e l'innovazione tecnologica*
172. Anthony Jensen, Greg Patmore, Ermanno Tortia (a cura di), *Cooperative Enterprises in Australia and Italy. Comparative analysis and theoretical insights*
173. Raffaello Giannini (a cura di), *Il vino nel legno. La valorizzazione della biomassa legnosa dei boschi del Chianti*
174. Gian Franco Gensini, Augusto Zaninelli (a cura di), *Progetto RIARTE. Raccontaci l'Ipertensione ARTERIOSA*
175. Enzo Manzato, Augusto Zaninelli (a cura di), *Racconti 33. Come migliorare la pratica clinica quotidiana partendo dalla Medicina Narrativa*
176. Patrizia Romei, *Territorio e turismo: un lungo dialogo. Il modello di specializzazione turistica di Montecatini Terme*
177. Enrico Bonari, Giampiero Maracchi (a cura di), *Le biomasse lignocellulosiche*

