

Efficienza di utilizzo dell'azoto in impianti maturi di specie erbacee perenni da biomassa nel nord Italia

Lorenzo Capecchi, Giuseppe Di Girolamo, Angela Vecchi, Lorenzo Barbanti

Dipartimento di Scienze Agrarie, Università di Bologna, Italia

Abstract

Alcune specie erbacee perenni stanno generando molto interesse come fonte di biomassa per la produzione di energia. Al loro interno, l'azoto gioca un importante ruolo ai fini del bilancio energetico e per il possibile impatto ambientale. In questo contesto è iniziata nel 2002 una prova presso l'azienda sperimentale dell'Università di Bologna a Cadriano (BO), volta a valutare il comportamento biologico-produttivo e la risposta alla concimazione azotata di *Arundo donax* (A), *Cynara cardunculus* (C), *Panicum virgatum* (P) e *Miscanthus × giganteus* (M). Le quattro specie sono state saggiate in combinazione con due dosi di azoto (N_0 , testimone non concimato; N_1 con 120 kg N ha⁻¹ in A e P, 100 kg N ha⁻¹ in M e C) in parcelle ripetute quattro volte secondo uno schema completamente randomizzato. Nell'annata 2011 sono stati valutati: produzione di biomassa secca (DBY; Mg ha⁻¹), contenuto di azoto totale nella biomassa (TKN; mg g⁻¹), quantitativo di azoto assorbito (N uptake; kg ha⁻¹), efficienza apparente di assorbimento dell'azoto distribuito (ARF, %) e, infine, efficienza di utilizzazione dell'azoto (NUE; kg kg⁻¹) come rapporto tra DBY e N uptake. Fra le quattro colture, C ha mostrato un DBY (6,1 Mg ha⁻¹) pari a un terzo circa delle altre tre specie (A, M e P), tra loro indifferenziate (DBY medio, 18 Mg ha⁻¹). La fertilizzazione azotata ha significativamente migliorato la produzione (in media +28%), peggiorando l'efficienza di utilizzazione dell'azoto (in media -14%). P e A sono risultate le specie più efficienti in termini di NUE (rispettivamente 320 e 279 kg di biomassa kg⁻¹ di N), seguite statisticamente da M (238 kg kg⁻¹) e da C (147 kg kg⁻¹). L'ARF ha mostrato valori bassi, statisticamente indifferenziati tra le quattro colture (media, 24%). Riunendo in unico dataset 28 casi in letteratura sulle tre specie A, M e P compresi quelli del presente lavoro, l'ARF appare spiegato dall'incremento relativo di biomassa (relazione diretta) e dalla dose N (relazione inversa). In pratica, una buona efficienza di assorbimento del-

l'azoto come premessa per migliori prestazioni energetico-ambientali richiede condizioni ambientali (clima e terreno) non limitanti l'incremento produttivo unite a un contenimento della dose di azoto.

Introduzione

Fra le strategie che l'agricoltura può adottare per mitigare il surriscaldamento globale e l'aumento dei gas serra in atmosfera, le tecniche agronomiche a basso input e la coltivazione di specie perenni da biomassa per energia sono state largamente studiate negli ultimi anni (IPCC, 2011; Berndes *et al.*, 2003; Sims *et al.*, 2006; Orlandini *et al.*, 2007). Per rispondere a queste sfide e stimolare pratiche virtuose, l'Unione Europea promuove l'utilizzo di energie rinnovabili, fra cui proprio le colture agrarie destinate ad uso energetico (European Commission, 2009). In questo contesto, alcune specie erbacee perenni stanno generando molto interesse a livello globale ed anche in Europa, come fonte di biomassa per la produzione di energia (Angelini *et al.*, 2009).

Le colture poliennali, pur essendo meno flessibili da gestire in un sistema agricolo rispetto alle annuali, necessitano di minori input colturali non richiedendo lavorazioni del terreno e semina annuali (Chandel e Singh, 2011). Di conseguenza stanno catalizzando interesse, proprio in virtù dei loro bassi input diluiti su diversi anni.

La dose di azoto fornita alla coltura è uno dei fattori produttivi più importanti dal punto di vista energetico (Frischknecht e Jungbluth, 2003) e per i possibili risvolti ambientali (Metz *et al.*, 2007). Inoltre l'efficienza d'uso del fertilizzante azotato è un importante elemento del bilancio energetico di colture che proprio al settore energetico sono destinate (Lewandowski e Schmidt, 2006). È quindi ampiamente dimostrato che l'azoto, se non è propriamente dosato, si diffonde nell'ambiente a causa della sua caratteristica di mobilità, potendo interessare tutti i comparti del sistema suolo - pianta - atmosfera (Guillard *et al.*, 1995).

Per i motivi illustrati, è iniziata nel 2002 una prova a lungo termine presso l'azienda sperimentale dell'Università di Bologna, rivolta a valutare il comportamento biologico-produttivo e la risposta alla concimazione azotata di due specie poliennali a ciclo fotosintetico C₃, canna comune/arundo (*Arundo donax* L.) e cardo (*Cynara cardunculus* L.), e due specie poliennali a ciclo fotosintetico C₄, switchgrass/panico virgato (*Panicum virgatum* L.) e miscanto (*Miscanthus × giganteus* Greif & Deuter).

L'arundo (A) è una graminacea poliennale a rapida crescita, originaria dell'Asia occidentale, che si propaga tramite rizomi essendo praticamente sterile, ed è una delle colture da biomassa più promettenti in un'ottica di uso a fini energetici (energia e calore; biocarburanti di seconda generazione) nei Paesi del Sud Europa (Angelini, *et al.*, 2005a, 2005b; Lewandowski *et al.*, 2003). Il miscanto (M) è ugualmente una graminacea originaria delle regioni subtropicali dell'Asia; essendo un ibrido interspecifico sterile, necessita di essere propagato per via gamica. Il panico (P) è una graminacea rizomatosa originaria

Corrispondente: Lorenzo Barbanti, Dipartimento di Scienze Agrarie, Università di Bologna, viale Fanin 44, 40127 Bologna, Italia.
Tel. +39.051.2096643. E-mail lorenzo.barbanti@unibo.it

Key words: colture da biomassa, concimazione azotata, efficienza nutritiva.

Ringraziamenti: si ringrazia il Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali (MiPAAF) che ha finanziato il progetto BIOSEA, Ottimizzazione delle filiere Bioenergetiche per una Sostenibilità Economica ed Ambientale.

©Copyright L. Capecchi *et al.*, 2013

Licensee PAGEPress, Italy

Italian Journal of Agronomy 2013; 8(s1):e2

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License (by-nc 3.0) which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

del Nord America, recentemente proposta come specie da energia moltiplicata per seme. Il cardo (C), infine, è una composita nativa dell'areale Mediterraneo.

Con questa premessa, oggetto del presente lavoro è valutare, tramite due livelli di concimazione azotata (N_0 e N_1), la produzione di biomassa secca, l'asportazione di azoto e l'efficienza d'uso del concime azotato in impianti maturi di arundo, panico, miscanto e cardo coltivati in un ambiente di pianura del nord Italia caratterizzato da terreni alluvionali profondi e clima di transizione fra continentale e mediterraneo.

Materiali e metodi

Impianto sperimentale

La prova è stata condotta nel 2011 presso l'azienda sperimentale dell'Università di Bologna a Cadriano (BO; 44° 33' N; 11° 21' E, 32 m slm). Il sito è caratterizzato da terreno di medio impasto - argilloso con pH neutro, sufficiente dotazione di sostanza organica e buona dotazione complessiva di elementi nutritivi (Tabella 1).

L'impianto di arundo, miscanto, panico e cardo è avvenuto nella primavera del 2002 in parcelle sperimentali contigue di adeguate dimensioni (A, 180 m²; P 90 m²; M e C 36 m²) ripetute quattro volte in combinazione con due dosi di azoto (N_0 , testimone non concimato; N_1 con 120 kg N ha⁻¹ in A e P, 100 kg N ha⁻¹ in M e C) secondo un disegno a randomizzazione completa, per un totale di 32 unità sperimentali. P è stato seminato con seminatrice meccanica; C è stato seminato manualmente, mentre A e M sono state trapiantate manualmente disponendo i rizomi in interfile distanti 1,5 m. La densità di impianto è stata di 2 rizomi m⁻² per M, 1 rizoma m⁻² per A e 4 semi m⁻² per C; P (cv. Alamo) è stato seminato a file distanti 0,8 m con 8 kg ha⁻¹ di seme (circa 1000 semi m⁻²). L'azoto è stato distribuito tutti gli anni in un unico intervento con urea circa 20 giorni dopo l'emergenza al primo anno; dopo la ripresa vegetativa negli anni successivi.

Lavorazione del terreno (aratura a 0,4 m e successive erpicature) e concimazione minerale fosfatica (31 kg ha⁻¹ di P) sono state effettuate solo prima dell'impianto tra l'autunno 2001 e la primavera 2002. Parimenti, anche il controllo delle infestanti attraverso lavorazioni interfilari e scerbature manuali si è reso necessario solo nell'anno di impianto. Nessun intervento si è mai reso necessario per il controllo di fitofagi, parassiti o malattie. La prova è sempre stata condotta in assenza di supporto irriguo.

Determinazioni

Le quattro colture risultavano ancora in piena produzione nel 2011, alla decima annata. Alla fine della stagione vegetativa, il 5 ottobre, una superficie di 6 m² è stata raccolta da ciascuna parcella tagliando le piante a pochi centimetri dalla superficie. La biomassa raccolta è stata pesata fresca e campioni rappresentativi sono stati essiccati a 60°C e 105°C rispettivamente per le analisi qualitative e per la determinazione dell'umidità. In base ai dati, è stato possibile calcolare la produzione fresca di biomassa (non discussa nel presente lavoro), quella secca (*dry biomass yield*, DBY; Mg ha⁻¹) e la ripartizione fra diversi organi (non discussa nel presente lavoro).

Sul campione essiccato a 60°C è stato determinato il contenuto di azoto totale (*total Kjeldahl nitrogen*, TKN; mg g⁻¹ s.s.) dopo mineralizzazione della biomassa a caldo in H₂SO₄, seguendo il metodo Kjeldahl (Bradstreet, 1965). Il quantitativo di azoto assorbito dalla biomassa per unità di superficie (N uptake; kg ha⁻¹) è stato calcolato moltiplicando TKN per DBY.

Sulla base di tali elementi sono stati calcolati i seguenti due indici di efficienza nutritiva:

- efficienza apparente di assorbimento dell'azoto distribuito come concime (*apparent recovery fraction*, ARF; %), calcolata per differenza rispetto al non concimato (Huggins e Pan, 1993):

$$ARF = (N \text{ uptake } N_1 - N \text{ uptake } N_0) / \text{Dose } N_1 \quad (1)$$

- efficienza di utilizzazione dell'azoto (*nitrogen utilization efficiency*, NUtE; kg kg⁻¹), che esprime la produttività intermini di biomassa secca per unità di azoto assorbito (Delogu *et al.*, 1998):

$$NUtE = DBY / N \text{ uptake} \quad (2)$$

Il NUtE viene talora riferito come *nitrogen use efficiency* (Beale e Long, 1997), pur non rappresentando il parametro originale con tale nome, che rapportava la produzione di biomassa al quantitativo totale di azoto reso disponibile da diverse fonti (mineralizzazione sostanza organica, fertilizzanti, ecc.) (Moll *et al.*, 1982).

Analisi statistica

Per ciascun parametro (DBY, TKN, ARF e NUtE) è stata eseguita l'analisi della varianza a due vie per le fonti di variazione specie, concimazione azotata e relativa interazione, utilizzando il pacchetto statistico CoStat 6.3 (Cohort Software, Monterey, CA, USA). Le relazioni semplici fra diversi parametri sono state saggiate in base al coefficiente di correlazione (*r*) di Pearson; le relazioni complesse attraverso la regressione lineare multipla con approccio stepwise, utilizzando il pacchetto statistico SigmaStat 2.03 (Systat Software Inc., Chicago, IL, USA).

Risultati e discussione

Andamento meteorologico

L'andamento meteorologico nel corso del 2011 non si è particolar-

Tabella 1. Principali caratteristiche chimico-fisiche del terreno ospitante la prova.

Parametro	Metodo	Unità di misura	Valore
Sabbia	Bouyoucos	mg g ⁻¹	270
Limo	Bouyoucos	mg g ⁻¹	390
Argilla	Bouyoucos	mg g ⁻¹	340
pH	H ₂ O	cmol ⁺ kg ⁻¹	7,0
C.S.C.	Somma basi	-	26,9
Sostanza organica	Walkley-Black	mg g ⁻¹	18
N totale	Kjeldahl	mg g ⁻¹	1,2
C/N	-	-	8,7
P assimilabile	Olsen	mg g ⁻¹	20
K scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	265
Ca scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	4592
Mg scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	368
Na scambiabile	BaCl ₂ + TEA	mg g ⁻¹	48

C.S.C., capacità di scambio cationico; N, azoto; C, carbonio; P, fosforo; K, potassio; Ca, calcio; Mg, magnesio; Na, sodio; BaCl₂, cloruro di bario; TEA, trietanolanmina.

mente discostato dal clima tipico della località in esame (Figura 1): le temperature medie mensili hanno disegnato il consueto andamento con crescita dai primi mesi dell'anno, stabilizzandosi tra 20 e 30°C nel periodo giugno-settembre, per calare nuovamente nei mesi finali. Le precipitazioni sono risultate più concentrate nei mesi freddi all'inizio e alla fine dell'anno. La stagione vegetativa ha sofferto solo verso la fine condizioni di siccità, come testimoniato dalla rappresentazione secondo Bagnouls e Gaussens (1953): l'area in cui le precipitazioni, in scala doppia, intersecano le temperature si accentua nel mese di agosto, quando le quattro specie avevano già raggiunto taglia e accumulo di biomassa non lontani dai valori finali.

Produzione di biomassa

Il cardo (6,1 Mg ha⁻¹) ha mostrato una produzione in biomassa secca significativamente inferiore rispetto al raggruppamento composto da arundo (19,2 Mg ha⁻¹), panico (17,5 Mg ha⁻¹) e miscanto (17,4 Mg ha⁻¹), tra loro indifferenziati (Figura 2). Il rapporto di produzione di circa uno a tre fra cardo e le altre specie dimostra una scarsa idoneità in Pianura Padana di tale pianta, che si comporta come una specie ad habitus microtermo vegetando soprattutto in autunno e primavera, rispetto ad arundo, miscanto e panico che essendo macroterme sfrutta-

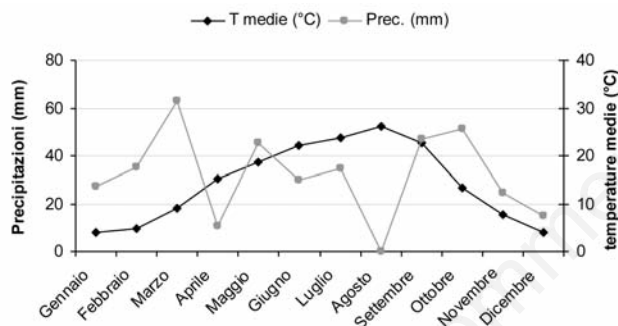


Figura 1. Rappresentazione secondo Bagnouls & Gaussens dell'andamento termo-pluviometrico registrato a Cadriano (BO) nel corso del 2011.

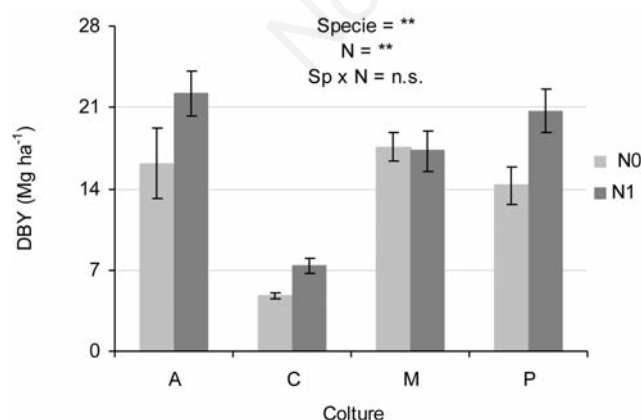


Figura 2. Produzione di biomassa secca per ettaro (DBY) delle quattro colture (A, Arundo; C, Cardo; M, Miscanto; P, Panico) a due livelli di azoto (N₀=non concimato; N₁=120 kg N ha⁻¹ per A e P, 100 kg N ha⁻¹ per M e C). Le barre verticali rappresentano ± errore standard (n=4); n.s., * e ** indicano rispettivamente non significativo, significativo a P≤0,05 e a P≤0,01.

no maggiormente la somma termica stagionale, in presenza di una sufficiente disponibilità idrica nell'ambiente in esame. La differenza produttiva fra il cardo e le altre colture è già stata osservata in prove avvenute in ambienti simili (Angelini *et al.*, 2009; Cosentino *et al.*, 2005).

Anche la fertilizzazione azotata è risultata un fattore significativo ai fini produttivi (Figura 2), incrementando la biomassa del 28% nella media delle quattro colture. Arundo, cardo e panico sembrano evidenziare incrementi maggiori fra non concimato e concimato, sebbene l'ANOVA non denoti interazione significativa fra i due fattori (P=0,20 n.s.). L'incremento produttivo medio giustifica ai fini produttivi l'utilizzo di un apporto moderato di azoto come quello saggiato (100-120 kg ha⁻¹), malgrado le preoccupazioni sugli effetti ambientali legati alla dispersione dell'elemento sotto forme nocive (NO₃ nelle falde profonde; NH₃ e N₂O emessi in atmosfera). Appare degno di nota che la fertilità residua del terreno, al decimo anno senza apporti azotati e con asportazione dell'intera biomassa epigea, sia stata ancora in grado di esprimere un potenziale produttivo di circa 15 Mg ha⁻¹ nelle tre colture (A, M e P) idonee all'ambiente di coltivazione. Il ruolo del metabolismo azotato tra biomassa epigea in corso di vegetazione e riserve ipogee durante il riposo vegetativo, descritto in recenti lavori (Strullu *et al.*, 2011; Nasso o Di Nasso *et al.*, 2013), permette di spiegare tale comportamento in un terreno intrinsecamente non ricco dell'elemento nutritivo. A prescindere dalla concimazione azotata, le produzioni di biomassa osservate sono in linea con quelle di altre prove condotte sulle medesime specie (Nasso o Di Nasso *et al.*, 2010; Christian *et al.*, 2008; McLaughlin *et al.*, 2005; Angelini *et al.*, 2009). Come questi studi dimostrano, indipendentemente dalle piovosità dell'annata ciascuna coltura produce nelle fasi di avanzata maturità meno che in quelle centrali, ma più che nell'anno di impianto.

Assorbimento di azoto ed efficienza nutritiva

Al pari della resa in biomassa, anche la concentrazione di azoto nella biomassa delle quattro colture ha risentito della concimazione, con un aumento medio di TKN di circa il 20% senza interazioni con le quattro specie (dati non mostrati). Il quantitativo di azoto assorbito per ettaro riflette l'andamento dei dati osservato relativamente a resa in biomassa e concentrazione di azoto, da cui deriva (dati non mostrati).

L'efficienza di utilizzo dell'azoto (NUtE) denota un quadro inverso a quello dei precedenti parametri (Figura 3): la capacità di produrre bio-

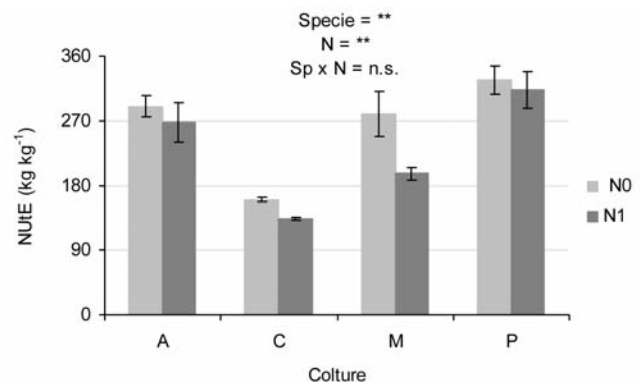


Figura 3. Efficienza di utilizzo dell'azoto (NUtE) nelle quattro colture (A, Arundo; C, Cardo; M, Miscanto; P, Panico) a due livelli di azoto (N₀= non concimato; N₁=120 kg N ha⁻¹ per A e P, 100 kg N ha⁻¹ per M e C). Le barre verticali rappresentano ± errore standard (n=4); n.s., * e ** indicano rispettivamente non significativo, significativo a P≤0,05 e a P≤0,01.

massa consumando poco azoto, che costituisce un vantaggio in termoconversione ma non in altri processi come la digestione anaerobica (Angelidaki *et al.*, 2003), diminuisce del 14% per effetto della concimazione nella media della quattro colture: panico e arundo spiccano come le specie più parsimoniose di azoto (NUtE medio, rispettivamente 320 e 279 kg di biomassa kg⁻¹ di N), seguite statisticamente dal miscanto (NUtE medio, 238 kg kg⁻¹) e, a maggior distanza, dal cardo (NUtE medio, 147 kg kg⁻¹). Anche nel caso di questo parametro, colture e azoto non hanno interagito significativamente tra loro (P=0,20 n.s.). I valori di NUtE osservati per arundo e miscanto sono risultati simili a quelli osservati in altre prove su impianti maturi delle due colture (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010; Christian *et al.*, 2008). Viceversa, per panico e cardo non sono riportati in letteratura studi di lunga durata

che consentano un paragone a pari età dell'impianto culturale.

L'efficienza apparente di assorbimento dell'azoto (ARF) denota valori abbastanza bassi, statisticamente indifferenziati tra le quattro colture (Figura 4): in media, solo il 24% in base al metodo di stima indiretta utilizzato. Il campo di variazione di questo parametro nelle più diverse colture è assai vasto in letteratura; in genere, apporti di azoto caratterizzati da buona efficienza nutritiva hanno ARF≥50% (Harmsen e Garabet, 2003). Ciò lascia supporre che dosi di azoto inferiori a quelle utilizzate in prova (100-120 kg N ha⁻¹) avrebbero potuto soddisfare le esigenze nutritive delle quattro colture, migliorando l'efficienza di concimazione e la sostenibilità energetica e ambientale. In letteratura sono presenti diversi valori di ARF per arundo, miscanto e panico, non sempre riferiti a impianti maturi. Il campo di variazione è il più ampio, oscillando da zero su arundo (Nassi o Di Nasso *et al.*, 2010) al 78% su panico (Guretzky *et al.*, 2011). Riunendo in unico dataset 28 casi sulle tre specie A, M e P, compresi quelli del presente lavoro, l'ARF è risultato significativamente correlato all'incremento relativo di produzione (Rel. DBY Diff.) determinato dalla concimazione (Figura 5), mentre la concentrazione di azoto nei tessuti non è risultata correlata all'ARF (dati non mostrati). Approfondendo lo studio delle relazioni fra ARF ed altri fattori all'interno dei 28 casi, la regressione multipla stepwise indica come fattori esplicativi dell'ARF il già citato incremento relativo di produzione e la dose di azoto, secondo la seguente equazione:

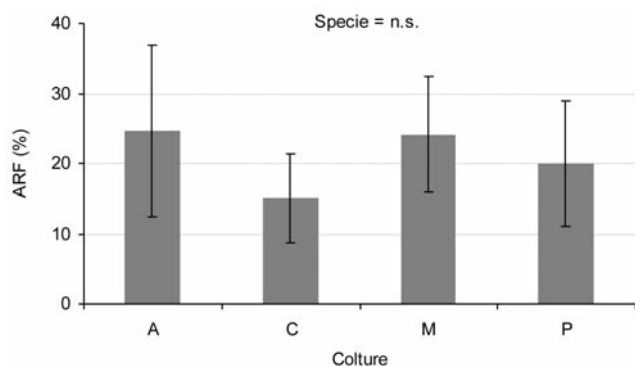


Figura 4. Efficienza apparente di assorbimento dell'azoto (ARF) nelle quattro colture (A, Arundo; C, Cardo; M, Miscanto; P, Panico) con concimazione 120 kg N ha⁻¹ (A e P), 100 kg N ha⁻¹ (M e C) rispetto al non concimato. Le barre verticali rappresentano ± errore standard (n=4); n.s., non significativo.

$$ARF = 29,088 + 0,590 * Rel. DBY Diff. - 0,0635 * Dose N; R^2 = 0,65^{**} \quad (3)$$

In pratica, una buona efficienza di assorbimento dell'azoto richiede condizioni ambientali (clima e terreno) non limitanti l'incremento produttivo unite a un contenimento della dose di azoto.

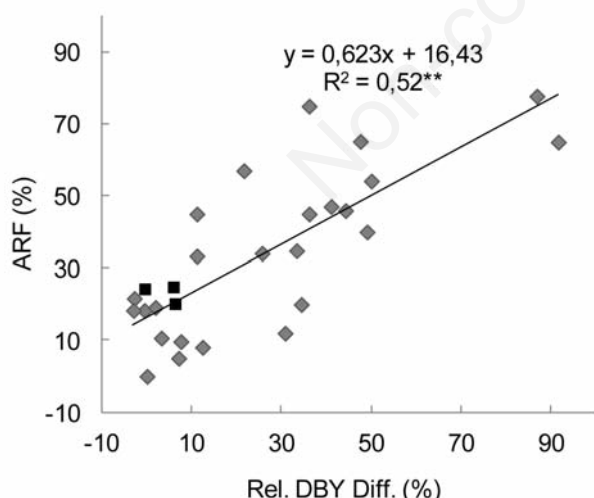


Figura 5. Correlazione fra incremento relativo di resa in biomassa determinato dall'azoto (Rel. DBY Diff.) ed efficienza apparente di assorbimento dell'azoto (ARF) osservata in 28 casi sperimentali sulle tre specie arundo, miscanto e panico. Dati estrapolati da Ercoli *et al.* (1999), Vogel *et al.* (2002), Thomason *et al.* (2004), Christian *et al.* (2008), Lemus *et al.* (2008a, 2008b), Nassi o Di Nasso *et al.* (2010), Guretzky *et al.* (2001) e da questo lavoro (quadrati in neretto).

Conclusioni

In fasi avanzate della propria vita produttiva, le tre specie arundo, miscanto e panico hanno palesato una capacità produttiva ancora buona, mostrandosi quindi adatte ad essere coltivate nell'ambiente oggetto di prova. Il cardo invece ha confermato una scarsa idoneità ad essere coltivato in ambienti a clima non strettamente mediterraneo.

La concimazione azotata ha fornito un importante supporto produttivo, permettendo in tutte le colture di contenere la senescenza dell'impianto rispetto ai primi anni di vegetazione, stabilizzando per quanto possibile le rese nel tempo. Al tempo stesso, esigenze di efficienza produttiva, risparmio energetico e riduzione del carico su diversi comparti ambientali motivano un contenimento delle dosi di azoto e un parallelo aumento della loro efficienza. In questa prova l'efficienza apparente di assorbimento dell'azoto è risultata modesta rispetto alla media di esperienze consimili. Il miglioramento di tale efficienza appare legato a un contenimento delle dosi e alla capacità di risposta culturale all'azoto, in dipendenza delle condizioni ambientali proprie del sito di coltivazione.

Bibliografia

- Angelidaki I, Ellegaard L, Ahring BK, 2003. Applications of the anaerobic digestion process. In: B.K. Ahring (ed.) Biomethanation II - Advances in biochemical engineering biotechnology. Springer, Berlin, Germany, pp 1-33.
- Angelini LG, Ceccarini L, Bonari E, 2005a. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as

- related to different management practices. *Eur. J. Agron.* 22:375-9.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E, 2005b. Long term evaluation of biomass production of giant reed (*Arundo donax L.*) to different fertilisation input, plant density and harvest time in a Mediterranean environment. pp 141-4 in *Proc. 14th Eur. Biomass Conf. and Exhibit.*, Paris, France.
- Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E, 2009. Long-term evaluation of biomass production and quality of two cardoon (*Cynara cardunculus L.*) cultivars for energy use. *Biomass Bioenerg.* 33:810-6.
- Bagnouls F, Gaussen H, 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Histor. Natl. Toulouse* 88:193-289.
- Beale CV, Long SP, 1997. Seasonal dynamics of nutrient accumulation and partitioning in the perennial C4-grasses *Miscanthus x giganteus* and *Spartina cynosuroides*. *Biomass Bioenerg.* 12:419-28.
- Berndes G, Hoogwijk M, Broek R, 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a 303 review of 17 studies. *Biomass Bioenerg.* 25:1-28.
- Bradstreet RB, 1965. *The Kjeldahl method for organic nitrogen.* Academic Press, New York, USA.
- Chandel AK, Singh OV, 2011. Weedy lignocellulosic feedstock and microbial metabolic engineering: advancing the generation of 'Biofuel'. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 89:1289-303.
- Christian DG, Riche AB, Yates NE, 2008. Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests. *Ind. Crop. Prod.* 28:320-7.
- Cosentino S, Foti S, Venturi G, Giovanardi R, Copani V, Mantineo M, D'Agosta G, Bezzi G, Tassan Mazzocco G, 2005. Colture erbacee annuali e poliennali da biomassa per energia di possibile coltivazione in Italia. *Agroindustria* 4:35-48.
- Delogu G, Cattivelli L, Pecchioni N, De Falcis D, Maggiore T, Stanca AM, 1998. Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat. *Eur. J. Agron.* 9:11-20.
- 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 Crop Res.* 63:3-11.
- European Commission, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC (Text with EEA relevance). In: *Official Journal L 140, 5/6/2009*, pp 16-62.
- Frischknecht R, Jungbluth N, 2003. Implementation of life cycle impact assessment methods. Final report Ecoinvent 2000. Available from: <http://www.ecoinvent.ch/>
- Guillard K, Griffin GF, Allinson DW, Moosa Rafey M, Yamartino WR, Pietrzyk SW, 1995. Nitrogen utilization of selected cropping systems in the U.S. Northeast: dry matter yield, N uptake, apparent N recovery, and N use efficiency. *Agron. J.* 87:193-9.
- Guretzky JA, Biermacher JT, Cook BJ, Kering MK, Mosali J, 2011. Switchgrass for forage and bioenergy: harvest and nitrogen rate effects on biomass yields and nutrient composition. *Plant Soil* 339:69-81.
- Harmsen K, Garabet S, 2003. A comparison of the isotope-dilution and the difference method for estimating fertilizer nitrogen recovery fractions in crops. III - Experimental. *NJAS-Wagen. J. Life Sci.* 51:237-61.
- Huggins DR, Pan WL, 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agron. J.* 85:898-905.
- IPCC, 2011. *Special Report on renewable energy sources and climate change mitigation.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Lemus R, Brummer EC, Lee Burras C, Moorec KJ, Barker MF, Molstadd NE, 2008a. Effects of nitrogen fertilization on biomass yield and quality in large fields of established switchgrass in southern Iowa, USA. *Biomass Bioenerg.* 32:1187-94.
- Lemus R, Parrish DJ, Abaye O, 2008b. Nitrogen-use dynamics in switchgrass grown for biomass. *Bioenerg Res.* 1:153-62.
- Lewandoski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M, 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in US and Europe. *Biomass Bioenerg.* 25:335-61.
- Lewandoski I, Schmidt U, 2006. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. *Agr. Ecosyst. Environ.* 112:335-46.
- McLaughlin SB, Kszos LA, 2005. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass Bioenerg.* 28:515-35.
- Metz B, Davidson OR, Bosch PR, Dave R, Meyer LA, 2007. *Climate change 2007: mitigation of climate change.* Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA, 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agron. J.* 74:562-4.
- Nassi N o Di Nasso, Angelini LG, Bonari E, 2010. Influence of fertilisation and harvest time on fuel quality of giant reed (*Arundo donax L.*) in central Italy. *Europ. J. Agron.* 32:219-27.
- Nassi o Di Nasso N, Roncucci N, Bonari E, 2013. Seasonal dynamics of aboveground and belowground biomass and nutrient accumulation and remobilization in giant reed (*Arundo donax L.*): a three-year study on marginal land. *Bioenerg. Res.* 6:725-36.
- Orlandini S, Mancini M, Dalla Marta A, 2007. Sistema per la realizzazione di una filiera corta per la 309 produzione di energia da biomasse agricole. pp 151-52 in *Proc. XXXVII Conv. Naz. SIA, Catania, Italy.*
- Sims RH, Hastings A, Shlamadinger B, Taylor G, Smith P, 2006. Energy crops: current status and future prospects. *Global Change Biol.* 12:2054076.
- Strullu L, Cadoux S, Preudhomme M, Jeuffroy MH, Beaudoin N, 2011. Biomass production and nitrogen accumulation and remobilisation by *Miscanthus x giganteus* as influenced by nitrogen stocks in belowground organs. *Field Crop Res.* 121:381-91.
- Thomason WE, Raun WR, Johnson GV, Taliaferro CM, Freeman KW, Wynn KJ, Mullen RW, 2004. Switchgrass response to harvest frequency and time and rate of applied nitrogen. *J. Plant Nutr.* 27:1199-226.
- Vogel KP, Brejda JJ, Walters DT, Buxton DR, 2002. Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and Nitrogen Management. *Agron. J.* 94:413-20.