



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie

ISBN: 978-88-945925-1-1

I QUADERNI DI



AISSA



ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XVI Convegno AISSA

Gli effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura, sulle
foreste e sull'ambiente rurale in Italia

Viterbo, 14-15 febbraio 2019

Volume 2, 2021

Su iniziativa del Consiglio di Presidenza dell'Associazione si è dato vita al progetto editoriale "I Quaderni di AISSA". L'obiettivo è quello di raccogliere e valorizzare i contributi presentati ai convegni di AISSA, al fine di testimoniare il contributo all'avanzamento della scienza in ambito agrario, forestale e alimentare.

Questo volume è scaricabile dal sito: <https://www.aissa.it/home.php>

ISBN: 978-88-945925-1-1

Copyright: Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie – AISSA, 2021



I QUADERNI DI



AISSA



ASSOCIAZIONE ITALIANA SOCIETÀ SCIENTIFICHE AGRARIE

Atti del XVI Convegno AISSA

Gli effetti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura, sulle foreste e
sull'ambiente rurale in Italia

Viterbo, 14-15 febbraio 2019

Volume 2, 2021

a cura di: Bruno Ronchi, Giuseppe Scarascia Mugnozza e Luca Cocolin



Associazione
Italiana
Società
Scientifiche
Agrarie



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DELLA
Tuscia

Indice

<i>Prefazione</i>	1
<i>Cambiamenti climatici ed ecosistemi terrestri – monitoraggio e ricerca internazionale</i> Papale D.	2
<i>Accordo di Parigi: prospettive e opportunità per l'agricoltura e le foreste</i> Perugini L., Chiriaco M.V.	10
<i>Strategie di adattamento delle colture per favorire la resilienza degli agroecosistemi</i> Bonfante A.	18
<i>Tecnologie per la mitigazione e l'adattamento</i> Monarca D.	28
<i>Adattamento al cambiamento climatico e sostenibilità delle aziende agricole italiane</i> Dono G., Dell'Unto D., Cortignani R.	44
<i>Valutazione economica di tecnologie per l'adattamento e la mitigazione in agricoltura</i> Viaggi D.	56
<i>La gestione del suolo per la mitigazione dei cambiamenti climatici</i> Marinari S., Chiti T.	62
<i>Valorizzazione microbiologica del biochar per la mitigazione</i> Di Mattia E.	68
<i>Intensificazione sostenibile dei sistemi foraggeri al servizio della zootecnia da latte</i> Borreani G., Ferrero F., Comino L., Tabacco E.	77
<i>Impatto del cambiamento climatico (global warming) sulla produzione di latte</i> Bernabucci U.	84
<i>Strategie agronomiche di adattamento ai cambiamenti climatici per la cerealicoltura</i> Casa R., Rossini F., Ruggeri R.	91
<i>Misure per mitigare l'impronta del carbonio di alimenti e bevande caratteristici della filiera cerealicola</i> Cimini A., Messia M.C., Moresi M.	98
<i>Influenza del surriscaldamento globale sugli insetti della vite</i> Lessio F., Alma A.	105
<i>Intensificazione degli stress multipli estivi: nuove strategie per la gestione flessibile del vigneto</i> Pallotti A., Giordano L., Bellincontro A.	113

Prefazione

L'Associazione Italiana delle Società Scientifiche Agrarie (AISSA) affronta, in occasione del convegno annuale, tematiche di grande attualità, fornendo ampi contributi di aggiornamento scientifico e tecnico, rivolti sia ai ricercatori, sia agli studenti universitari, sia agli operatori di settore. In occasione del XVI Congresso, tenutosi a Viterbo nel febbraio 2019, è stato scelto di porre al centro dell'attenzione gli effetti dei cambiamenti climatici in corso sulle diverse componenti dei sistemi di produzione agricola, sugli ecosistemi forestali e sull'ambiente rurale italiano.

Le manifestazioni più evidenti dei cambiamenti climatici sono rappresentate dall'aumento della variabilità climatica e dall'aumento della frequenza degli eventi estremi, quali onde di calore, periodi prolungati di siccità, piogge intense. Tutto ciò sta determinando effetti marcati su tanti settori dell'agricoltura italiana, dalla foraggicoltura, alla cerealicoltura, all'orticoltura, alla viticoltura, alla frutticoltura e alla zootecnia. Non trascurabili sono anche gli effetti sull'ambiente e sulle foreste, come testimoniato dalle devastazioni prodotte nell'autunno 2018 nel Nord-Est del Paese dalla tempesta di vento denominata Vaia così come dagli incendi forestali e dalle infestazioni di insetti e malattie, spesso importate da altre aree del globo. Le foreste, in particolare, offrono una gran quantità di servizi ecosistemici, dalla biodiversità all'assorbimento del Carbonio, dalla fornitura di risorse idriche alla protezione del suolo e del paesaggio; tuttavia, l'avvio di strategie di adattamento alle mutazioni del clima è sempre più indifferibile proprio per salvaguardare e migliorare la disponibilità, anche in futuro, di questi preziosi servizi ambientali. Gli imprenditori agricoli, inoltre, dovranno sempre più frequentemente fare i conti con uno stato di imprevedibilità e di incertezza, che riguarderà cambiamenti nei tempi per eseguire le operazioni colturali, variazioni della quantità e della qualità dei prodotti, emergenza di nuove patologie. Tutto ciò sta determinando situazioni di crisi di diversi settori dell'agricoltura italiana, che vedono fortemente compromessa sia l'efficienza produttiva, che la sostenibilità economica.

Di fronte agli evidenti fenomeni del cambiamento climatico, risulta necessario definire, per ciascun ambito territoriale, gli scenari più probabili e per ciascun tipo di attività produttiva studiare soluzioni di mitigazione, di adattamento e di resilienza.

Il congresso AISSA ha consentito, attraverso il contributo di numerosi ricercatori italiani, di affrontare le problematiche connesse ai cambiamenti climatici per alcune delle più importanti filiere produttive e per le principali funzioni ecologiche offerte dai sistemi agro-forestali nonché di individuare le soluzioni tecniche già disponibili ed appropriate. Sono state, inoltre, messe in evidenza le necessità di sviluppare ulteriormente le attività di ricerca e sperimentazione di fronte alle problematiche emergenti.

Bruno Ronchi, Giuseppe Scarascia Mugnozza
Comitato Organizzatore

Cambiamenti climatici ed ecosistemi terrestri – monitoraggio e ricerca internazionale

Papale D.

Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali, Università degli Studi della Tuscia, Via S. Camillo de Lellis, snc, 01100 Viterbo.

Riassunto

I cambiamenti climatici in atto sono causati dall'aumento delle emissioni di combustibili fossili che alterano la composizione chimica atmosferica. Gli ecosistemi terrestri ricoprono un importante ruolo di sequestro di parte della CO₂ atmosferica ma sono anche influenzati dai cambiamenti in atto. L'importanza del monitoraggio delle interazioni tra ecosistemi e atmosfera e dello studio degli effetti del clima sugli equilibri ecologici è al centro di programmi internazionali e infrastrutture di ricerca sia Europee che globali. La quantità e l'eterogeneità dei dati disponibili (diverse risoluzioni, diverse scale, diverse accuratezze e precisioni) richiedono strumenti interpretativi e di sintesi avanzati in grado anche di garantire una continua crescita delle conoscenze e delle capacità di previsione. Dopo una breve introduzione sui cambiamenti climatici e le cause verranno illustrate le maggiori iniziative in corso e alcuni esempi di applicazioni *model-data fusion* a scala globale.

Abstract

Climate changes are due to an increase of fossil fuel emissions that are changing the chemical atmospheric composition. Terrestrial ecosystems play an important role as sink of part of the atmospheric CO₂ but they are also affected by climate change. Monitoring of ecosystems – atmosphere interactions and climatic effects on ecosystem's equilibrium – are at the basis of international programs and research infrastructures at European and global scale. Quantity and heterogeneity of data available (at different time and spatial resolutions and with different accuracy and precision) require advanced data analysis and synthesis tools, able to ingest all the data and ensure a continuous progress of knowledge and prevision capacities. After a short introduction on climate changes and their drivers, the relevant initiatives ongoing will be described with some example of model-data fusion exercises at global scale.

Parole chiave: *climate change, carbon balance, eddy covariance, research infrastructures, empirical modeling*

Introduzione

L'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera, in particolare CO₂ ma anche CH₄ e N₂O, è ormai registrato in continuo da stazioni di misura in tutti i continenti (Friedlingstein et al., 2020). La crescita ha un andamento esponenziale ed è caratterizzata, nel caso della CO₂, dalla variabilità intra-annuale dovuta alla stagionalità nell'emisfero boreale che ha più terre emerse coperte da vegetazione (Figura 1). Per la CO₂ la maggior parte delle emissioni è dovuta al consumo di combustibili fossili mentre per metano e N₂O ha un ruolo importante la produzione agricola ed in particolare gli allevamenti intensivi (Reay et al. 2012, Saunio et al. 2020).

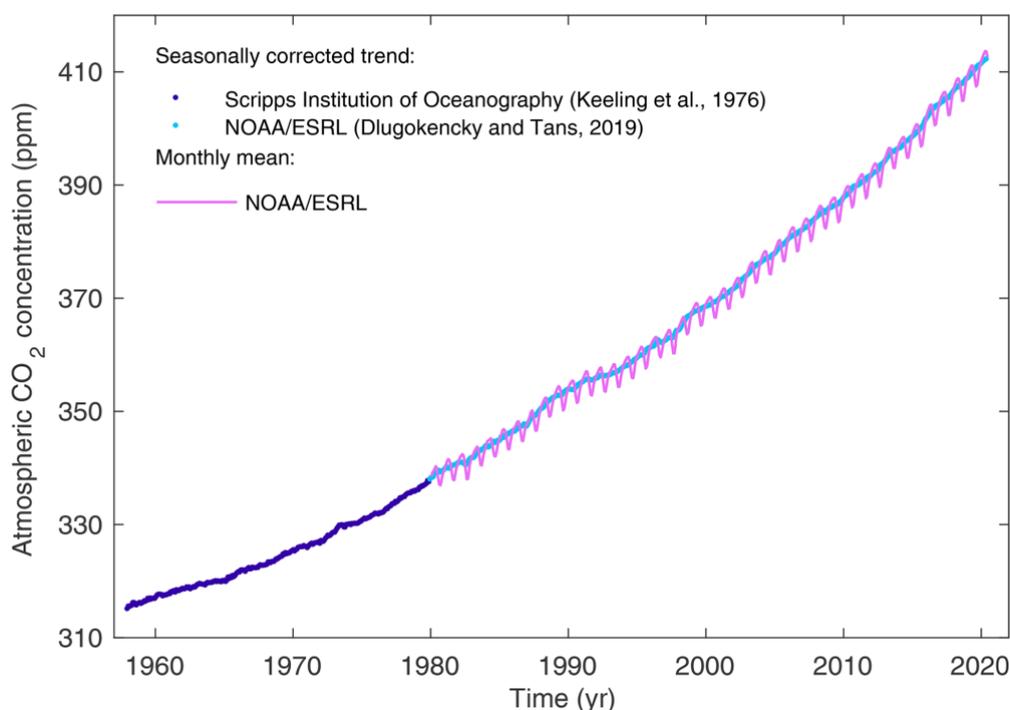


Figura 1. Concentrazione di CO₂ media in atmosfera. Nei dati al 1980 è possibile notare il ciclo stagionale dell'emisfero boreale (da Global Carbon Project, Friedlingstein et al., 2020).

Questa trasformazione dell'atmosfera terrestre ha come effetto diretto una alterazione del clima a causa di un aumento dell'effetto serra. La prima conseguenza diretta è un progressivo aumento delle temperature medie che porta anche ad un aumento di minimi e massimi. Anche il regime pluviometrico viene e verrà modificato, con eventi più intensi e distribuiti spazialmente in modo eterogeneo (IPCC 2014). Tutto questo si traduce in una maggiore frequenza di eventi climatici estremi come siccità prolungate e ondate di calore in estate e inverni miti che hanno un impatto importante sugli ecosistemi (esempio Ciais et al. 2003, Thompson et al. 2020, Liu et al. 2020).

La CO₂ antropogenica emessa in atmosfera nell'ultimo decennio proviene per la maggior parte da combustibili fossili (86%) ma c'è anche una componente legata al cambio di uso del suolo, in particolare a causa della deforestazione in aree tropicali. Non tutta la CO₂ emessa resta però in atmosfera in quanto poco più del 50% viene assorbita dagli ecosistemi terrestri e dagli oceani (Friedlingstein et al., 2020), a conferma del ruolo fondamentale che gli ecosistemi naturali svolgono nel riequilibrare, almeno parzialmente, l'alterazione antropogenica (Figura 2).

Analizzando l'andamento delle emissioni e dei *sink* negli ultimi 60 anni è possibile notare come emissioni da combustibili fossili (Figura 3 a), concentrazione in atmosfera (Figura 3 d) ed il sequestro da parte di ecosistemi terrestri (Figura 3 e) hanno un tasso di emissione/accumulo annuale crescente mentre la componente cambio uso del suolo è più stabile (Figura 3 b). È tuttavia interessante notare come la forte variabilità interannuale della componente ecosistemi terrestri determini anche una variabilità del residuo in atmosfera. Questa variabilità conferma l'importanza del monitoraggio degli ecosistemi terrestri, sia nella loro funzione di *sink* di carbonio che per l'analisi della loro suscettibilità ai cambiamenti climatici.

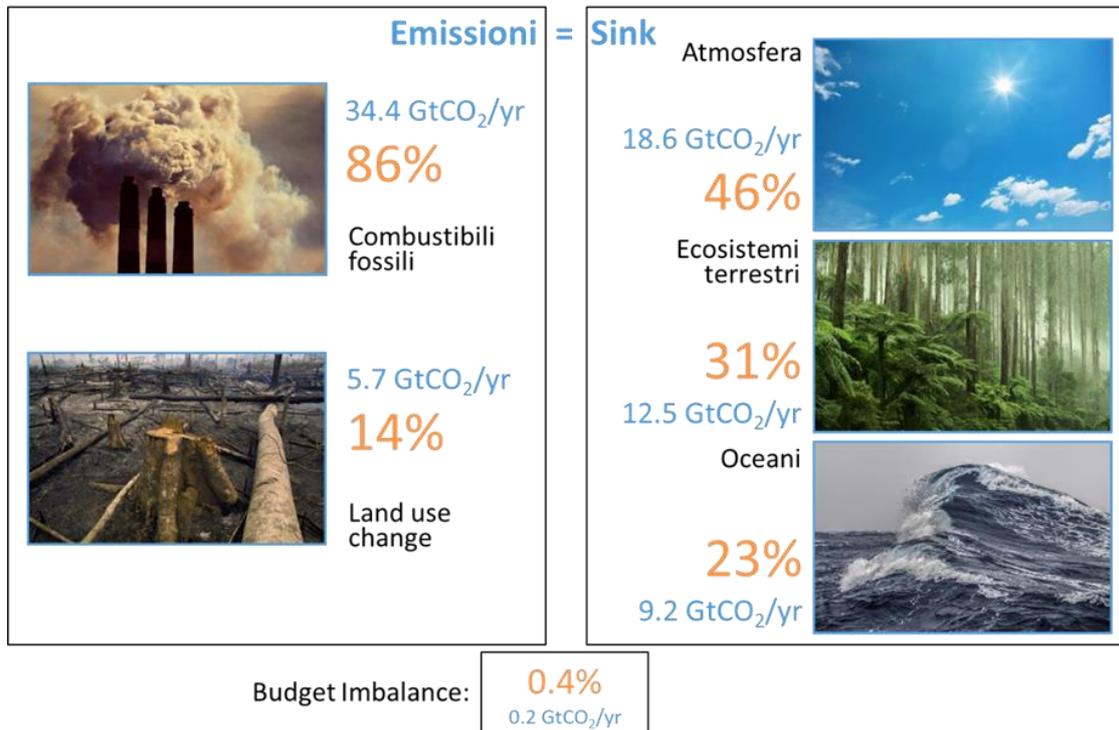


Figura 2. Le emissioni antropogeniche di CO₂ nel decennio 2010-2019 e la loro distribuzione nelle tre componenti (modificato da Global Carbon Project, Friedlingstein et al., 2020).

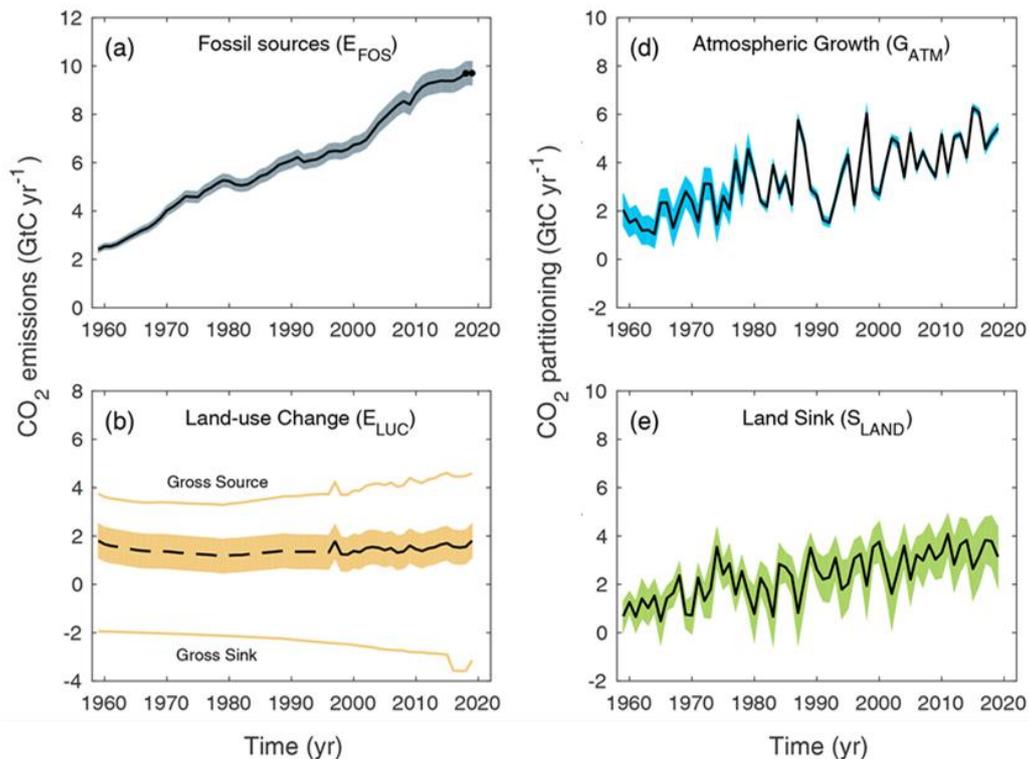


Figura 3. Trend delle emissioni e sink di CO₂ globali. E' possibile notare la forte variabilità interannuale del Land Sink e la sua incertezza (modificato da Global Carbon Project, Friedlingstein et al., 2020).

Monitorare gli scambi di gas serra

La misura e quantificazione degli scambi di gas serra tra ecosistemi terrestri e atmosfera è fondamentale per poter fare scelte gestionali che da un lato assicurino la loro tutela e dall'altro possano massimizzare il loro ruolo di *sink*. Le metodologie disponibili per questo tipo di misure sono diverse (per esempio Papale e Valentini 2010) ed includono ad esempio approcci inventariali (misure degli *stock* a distanza di tempo per analizzare le differenze) e le camere, che permettono la misura diretta degli scambi di gas serra tra una porzione di ecosistema (o un suo componente, come suolo, foglie, piante intere etc.) e l'atmosfera. Le camere si basano sull'isolamento della porzione di ecosistema da misurare rispetto all'atmosfera e per questo sono indicate per misure a scala puntuale o per singoli comparti.

A scala di ecosistema l'unica metodologia disponibile per la misura diretta degli scambi di gas serra è l'*eddy covariance* (correlazione turbolenta). Semplificando molto, il principio si basa sul trasporto turbolento da parte di vortici che muovono verticalmente, da e verso l'ecosistema, "pacchetti" di aria. Questi vortici sono originati principalmente dal vento e dall'attrito con la superficie superiore della vegetazione (*canopy*) che ne rallenta la velocità inducendo la turbolenza.

Questi vortici di aria verticali trasporteranno aria più o meno ricca di CO₂ (o altro gas serra) a seconda del processo in atto. Se ad esempio la vegetazione è fotosinteticamente attiva assorbirà CO₂ e l'aria che dalla vegetazione viene portata in atmosfera avrà una concentrazione di CO₂ più bassa rispetto a quella che dall'atmosfera viene portata all'interno della *canopy*. L'opposto accadrà nel caso di vegetazione che non fa fotosintesi, ad esempio di notte, in cui sarà presente solo la respirazione: in questo caso la CO₂ emessa da suolo e piante arricchirà l'aria che avrà una concentrazione maggiore rispetto a quella trasportata dall'atmosfera all'ecosistema.

La tecnica si basa sulla misura della velocità e la concentrazione del gas di interesse di questi "pacchetti" di aria trasportati verticalmente dalla turbolenza. Le misure vengono effettuate usando degli anemometri ultrasonici in grado di misurare anche la velocità verticale e da analizzatori di concentrazione, basati sull'assorbimento da parte dei gas di energia elettromagnetica in specifiche lunghezze d'onda (per più dettagli vedi Aubinet et al. 2012). Le misure vengono fatte a una frequenza molto alta (10 o 20 Hz) perché i vortici turbolenti sono di varie dimensioni ma vicino alla superficie della *canopy* sono generalmente piccoli e veloci, richiedendo alte frequenze per il loro campionamento.

Lo sviluppo delle equazioni dell'*eddy covariance* dimostra che a partire da queste misure di velocità e concentrazione ad alta frequenza è possibile calcolare il flusso netto, in un intervallo di integrazione tipicamente tra i 30 e i 60 minuti, come covarianza tra velocità verticale del vento e concentrazione (in effetti la covarianza è calcolata tra le deviazioni rispetto alla media ed è solo uno degli elementi dell'equazione anche se il più rilevante, vedi Aubinet et al. 2012 per l'equazione completa).

Il risultato che si ottiene è quindi una misura dello scambio netto di gas tra ecosistema e atmosfera ogni mezzora, rilevato in continuo e senza disturbi che possano alterare i flussi. Il *dataset*, soprattutto quando multiennale, è utilizzabile per applicazioni diverse, che vanno

dalla quantificazione del bilancio annuale, all'analisi delle risposte ecofisiologiche ai *drivers* (esempio Reichstein et al. 2007, Baldocchi et al. 2010), allo studio della variabilità stagionale e interannuale (esempio Gielen et al. 2013) fino al confronto di diverse condizioni (soprattutto di gestione, ad esempio nel caso di ecosistemi agrari o di recupero dopo disturbo in ecosistemi naturali, Baldocchi 2008).

Per avere una idea della quantità e qualità delle misure si può far riferimento alla Figura 4 dove sono riportati i flussi di CO₂ misurati su un ceduo di *Quercus cerris* L. per 7 anni. È possibile notare la stagione vegetativa (verde-blu) il cui inizio e intensità è variabile tra gli anni. Si vede anche come la durata della giornata (periodo con fotosintesi, asse Y) si riduce durante l'anno quando ci si avvicina all'inverno e come in alcuni anni la respirazione notturna è maggiore (2002, 2006-2008). Interessante notare anche il 2003 e l'anomalia dovuta all'ondata di calore e siccità che ha colpito l'Europa in estate (Ciais et al. 2005, Reichstein et al. 2007), dove la foresta è *sink* di CO₂ solo nelle prime ore della mattina e poi diventa una sorgente di CO₂.

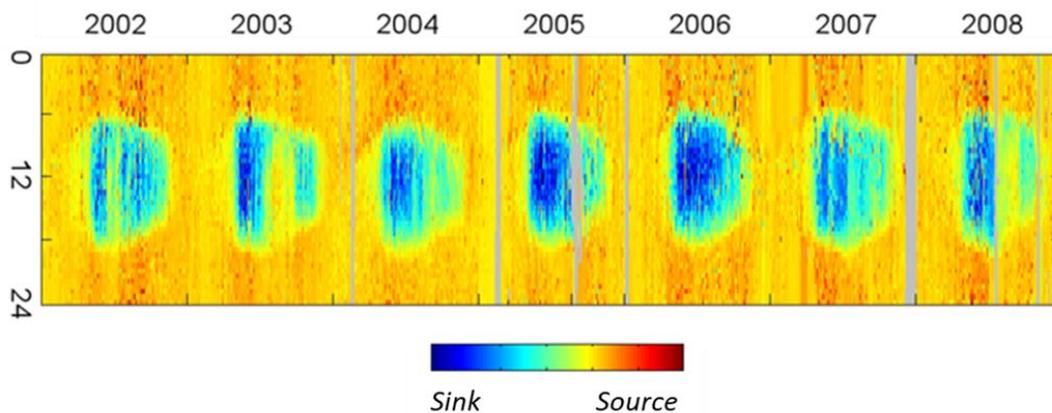


Figura 4. *Fingerprint plot* della serie di flussi di CO₂ misurati a Roccarespampani2 (ceduo di cerro). Entrambi gli assi riportano il tempo, i giorni dei 7 anni sulle X, l'orario sulle Y. Il colore indica l'intensità dei flussi e se *sink* o *source* (modificato da Papale et al., 2015).

La tecnica è progredita molto negli ultimi 10 anni grazie allo sviluppo di nuovi sensori e strumenti di analisi che l'hanno resa accessibile (economicamente e tecnicamente) a comunità scientifiche diverse (incluso il settore privato), passando dalle poche decine di siti nel mondo alla rete di migliaia di siti attivi oggi (Chu et al. 2017). Grazie a questa espansione ed al numero sempre crescente di ricercatori che usano queste misure nelle loro attività scientifiche, le reti di misura sono evolute cercando una forma di coordinamento. In particolare, a livello globale i siti di misura collaborano nell'ambito della rete FLUXNET (Baldocchi 2008), una iniziativa auto-organizzata e senza finanziamenti specifici volta a rispondere alle necessità di sintesi a scala globale. A livello continentale le reti di misura iniziano ad essere convertite da iniziative scientifiche singole a infrastrutture di ricerca, trasformazione che dovrebbe portare finanziamenti più stabili, prospettive di lungo termine tipiche del monitoraggio, alta qualità delle misure e disponibilità dei dati in tempo quasi reale. In Europa l'infrastruttura di riferimento è l'Integrated Carbon Observation System (ICOS, www.icos-ri.eu), una infrastruttura ESFRI a cui aderiscono 13 paesi Europei e che nella sua componente ecosistemi

può contare su più di 80 siti di misura, di cui 11 in Italia dove è situato anche il centro tematico sugli ecosistemi (ICOS Ecosystem Thematic Centre www.icos-etc.eu).

Dati e modellistica

Le misure di flusso raccolte nei siti *eddy covariance*, così come i dati provenienti da altre tecniche, sono spesso alla base di attività di modellistica, dove le osservazioni servono sia per la validazione che per la parametrizzazione di modelli usati poi per la stima delle evoluzioni future dei rapporti tra ecosistemi e atmosfera (esempio Bonan et al. 2011).

L'integrazione con altri dati, in particolare dati telerilevati o altri strati informativi spazializzati come mappe di vegetazione, tipo di suolo o dati climatici, è possibile anche attraverso metodi basati su modellistica empirica che usano tecniche di *machine learning*. In questo caso lo strumento di integrazione viene addestrato tramite osservazioni ed è in grado di definire le relazioni tra *drivers* e variabili da stimare che vengono poi applicate ai dati spazializzati. Un esempio di modellistica empirica è l'iniziativa FLUXCOM (Jung et al. 2020) dove dati *eddy covariance* sono usati per addestrare una serie di modelli basati su *machine learning* (Reti Neurali Artificiali, Random Forest, regressioni multivariate etc.) che vengono poi applicati usando come *input* dati telerilevati ed i risultati integrati in un *ensemble* (Figura 5).

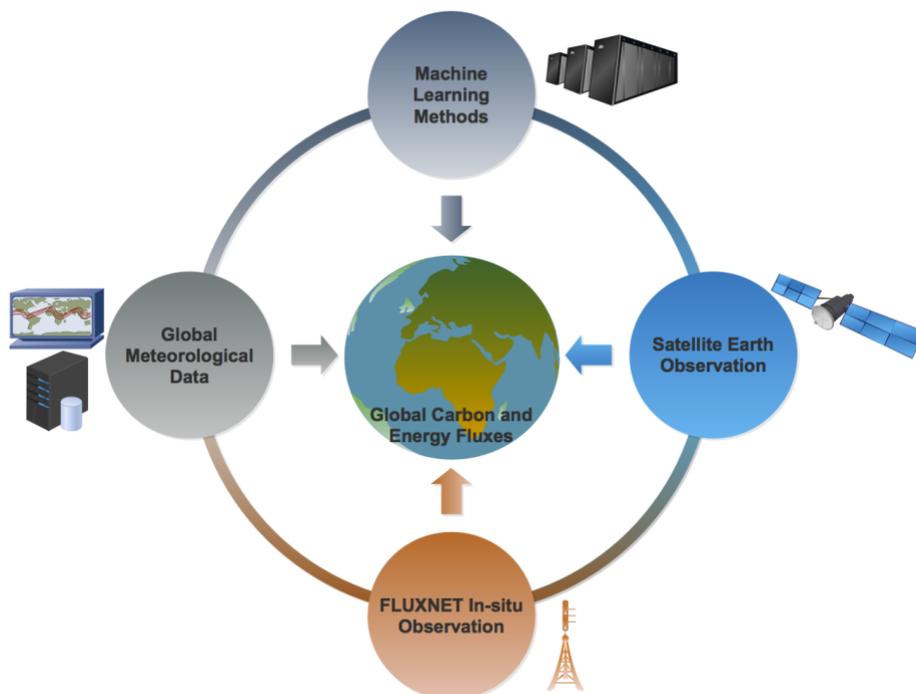


Figura 5. FLUXCOM è una iniziativa in cui misure di flussi da siti eddy covariance vengono integrate con dati telerilevati e altri dati meteorologici spazializzati per stimare flussi di gas serra a scala globale attraverso strumenti di intelligenza artificiale (da www.fluxcom.org, credits Martin Jung).

Le stime globali o continentali ottenute con questi approcci empirici permettono una analisi delle relazioni tra flussi e *drivers* e forniscono dei riferimenti alternativi ai modelli di processo, che quindi possono trovare nelle stime da *machine learning* dei dati indipendenti da usare come confronto (Jung et al. 2020). Oltre alla stima dei budget annuali (ad esempio della

produttività primaria lorda come in Beer et al. 2010), i dati prodotti nell'ambito di FLUXCOM (o altre iniziative simili) sono stati usati per analizzare l'andamento dell'evapotraspirazione ed i suoi *drivers* (Jung et al. 2010) o anche i meccanismi che regolano la produttività primaria, in particolare il ruolo di temperatura e disponibilità idrica (Jung et al. 2017).

Conclusioni

I cambiamenti climatici in atto ed il loro impatto a scala globale richiedono uno sforzo interdisciplinare che coinvolge osservazioni di diversa natura e modellistica sia empirica che di processo. La misura diretta degli scambi di gas serra è solo una delle osservazioni necessarie e lo sviluppo in ambito modellistico sta portando verso approcci in grado di usare dati e misure di diversa natura al fine di parametrizzare e validare i modelli (vedi ad esempio Keenan et al. 2013). Tutto questo richiede uno sforzo da parte della comunità scientifica verso una piena e aperta condivisione dei dati, dati che nella maggior parte dei casi sono acquisiti grazie a finanziamenti pubblici (locali, nazionali o Europei) e che per questo motivo dovrebbero essere a disposizione di tutti. Molte infrastrutture di ricerca (tra cui ICOS) hanno scelto di adottare licenze aperte, come la Creative Commons CC-BY4 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/) che consente accesso e uso dei dati con la sola richiesta di attribuzione. Anche in FLUXNET la tendenza è verso una licenza CC-BY4 e un rilascio dei dati veloce, senza ritardi, in modo da consentire il loro uso in ambiti diversi (Papale 2020) e lo stesso è valido per i dati satellitari, ad esempio con il programma Sentinel che è *open access*. Sulla condivisione rapida ed aperta dei dati è necessario lavorare tutti insieme al fine di consentirne al più presto la piena attuazione, assicurando il giusto riconoscimento per chi lavora ed è responsabile del lungo e faticoso impegno di osservazioni e misure in campo, ad esempio considerando *dataset* largamente utilizzati e citati dalla comunità scientifica internazionale nell'ambito delle valutazioni inerenti l'attività personale (VQR, Progetti, etc.).

Bibliografia

- Aubinet, M., Vesala, T., Papale, D., 2012. Eddy Covariance - A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer, ISBN: 978-94-007-2351-1
- Baldocchi, D., 2008. Breathing' of the terrestrial biosphere: Lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. Australian Journal of Botany. 56. 1-26. Doi: 10.1071/BT07151.
- Baldocchi, D.D., Ma, S., Rambal, S., Misson, L., Ourcival, J.-M., Limousin, J.-M., Pereira, J., Papale, D. 2010. On the differential advantages of evergreenness and deciduousness in mediterranean oak woodlands: A flux perspective. Ecological Applications, vol. 20; p. 1583-1597, ISSN: 1051-0761, doi: 10.1890/08-2047.1
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M.A., Baldocchi, D., Bonan, G.B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luysaert, S., Margolis, H., Oleson, K.W., Rouspard, O., Veenendaal, E., Viovy, N., Williams, C., Woodward, F.I., Papale, D., 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. Science, vol. 329; p. 834-838, ISSN: 0036-8075, doi: 10.1126/science.1184984
- Bonan, G. B., Lawrence, P. J., Oleson, K. W., Levis, S., Jung, M., Reichstein, M., Lawrence, D. M., and Swenson, S. C., 2011. Improving canopy processes in the Community Land Model version 4 (CLM4) using global flux fields empirically inferred from FLUXNET data. J. Geophys. Res.-Biogeo., 116, G02014, doi: 10.1029/2010JG001593
- Chu, H., Baldocchi, D. D., John, R., Wolf, S., and Reichstein, M., 2017. Fluxes all of the time? A primer on the temporal representativeness of FLUXNET, J. Geophys. Res. Biogeosci., 122, 289– 307, doi:10.1002/2016JG003576
- Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogé, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, Chr., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, A.D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature, vol. 437; p. 529-533
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quére, C., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S., Aragão, L. E. O. C., Arneeth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Benoit-Cattin, A., Bittig, H. C., Bopp, L., Bultan, S., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Evans, W., Florentie, L., Forster, P. M., Gasser, T., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Gregor, L., Gruber, N., Harris, I., Hartung, K., Haverd, V., Houghton, R. A., Ilyina, T., Jain, A. K., Joetzjer, E., Kadono, K., Kato, E., Kitidis, V., Korsbakken, J. I., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Liu, Z., Lombardozi, D., Marland, G., Metzl, N., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-I., Niwa, Y., O'Brien, K., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Poulter, B., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I.,

- Smith, A. J. P., Sutton, A. J., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., van der Werf, G., Vuichard, N., Walker, A. P., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, X., and Zaehle, S., 2020. Global Carbon Budget 2020. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>.
- Gielen, B., De Vos, B., Campioli, M., Neiryneck, J., Papale, D., Verstraeten, A., Ceulemans, R., Janssens, I.A., 2013. Biometric and eddy covariance-based assessment of decadal carbon sequestration of a temperate Scots pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 174-175, p. 135-143, ISSN: 0168-1923, doi: 10.1016/j.agrformet.2013.02.008
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Keenan, T.F., Davidson, E.A., Munger, J.W. and Richardson, A.D., 2013. Rate my data: quantifying the value of ecological data for the development of models of the terrestrial carbon cycle. *Ecological Applications*, 23: 273-286. doi: 10.1890/12-0747.1
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., De Jeu, R., Dolman, A.J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B.E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A.D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, vol. 467; p. 951-954, ISSN: 0028-0836, doi: 10.1038/nature09396
- Jung, M., Reichstein, M., Schwalm, C.R., Huntingford, C., Sitch, S., Ahlström, A., Arneeth, A., Camps-Valls, G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Gans, F., Ichii, K., Jain, A.K., Kato, E., Papale, D., Poulter, B., Raduly, B., Rödenbeck, C., Tramontana, G., Viovy, N., Wang, Y.-P., Weber, U., Zaehle, S., Zeng, N., 2017. Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature. *Nature*, vol. 541, p. 516-520, ISSN: 0028-0836, doi: 10.1038/nature20780
- Jung, M., Schwalm, C., Migliavacca, M., Walther, S., Camps-Valls, G., Koirala, S., Anthoni, P., Besnard, S., Bodesheim, P., Carvalhais, N., Chevallier, F., Gans, F., S Goll, D., Haverd, V., Köhler, P., Ichii, K., K Jain, A., Liu, J., Lombardozzi, D., E M S Nabel, J., A Nelson, J., O'Sullivan, M., Pallandt, M., Papale, D., Peters, W., Pongratz, J., Rödenbeck, C., Sitch, S., Tramontana, G., Walker, A., Weber, U., Reichstein, M., 2020. Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: Synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. *Biogeosciences*, vol. 17, p. 1343-1365, ISSN: 1726-4189, doi: 10.5194/bg-17-1343-2020
- Liu, Z, Kimball, JS, Parazoo, NC, et al. 2020. Increased high-latitude photosynthetic carbon gain offset by respiration carbon loss during an anomalous warm winter to spring transition. *Glob Change Biol*. 26: 682– 696. doi: 10.1111/gcb.14863
- Papale, D., Valentini, R., 2010. The global carbon cycle: current research and uncertainties in the sources and sinks of carbon. In: Francisco A. Comin. *Ecological Restoration - A Global Challenge*. p. 21-44, CAMBRIDGE:Cambridge University Press, ISBN: 978-0-521-87711-4
- Papale, D., Migliavacca, M., Cremonese, E., Cescatti, A., Alberti, G., Balzarolo, M., Beelli Marchesini, L., Canfora, E., Casa, R., Duce, P., Facini, O., Galvagno, M., Genesio, L., Gianelle, D., Magliulo, V., Matteucci, G., Montagnani, L., Petrella, F., Pitacco, A., Seufert, G., Spano, D., Stefani, P., Vaccari, F.P., Valentini, R., 2015: Carbon, Water and Energy Fluxes of Terrestrial Ecosystems in Italy. In: Valentini R., Miglietta F.. *The Greenhouse Gas Balance of Italy*. Springer Environmental Science and Engineering, p. 11-45, Berlin Heidelberg:Springer-Verlag, ISSN: 2194-3214, doi: 10.1007/978-3-642-32424-6_2
- Papale, D., 2020. Ideas and perspectives: enhancing the impact of the FLUXNET network of eddy covariance sites. *Biogeosciences*, vol. 17, p. 5587-5598, ISSN: 1726-4189, doi: 10.5194/bg-17-5587-2020
- Reay, S.D., Davidson, E.A., Smith, K.A., Smith, P., Melillo, J.M., Dentener, F., Crutzen, P.J., 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Clim Change* 2, 410–416, doi: 10.1038/nclimate1458
- Reichstein, M., Papale, D., Valentini, R., Aubinet, M., Bernhofer, C., Knohl, A., Laurila, T., Lindroth, A., Moors, E., Pilegaard, K., Seufert, G., 2007. Determinants of terrestrial ecosystem carbon balance inferred from European eddy covariance flux sites. *Geophysical Research Letters*, vol. 34, ISSN: 0094-8276
- Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., Valentini, R., Running, S., Viovy, N., Cramer, W., Granier, A., Ogee, J., Allard, V., Aubinet, M., Bernhofer, Chr., Buchmann, N., Carrara, A., Grünwald, T., Heimann, M., Heinesch, B., Knohl, A., Kutsch, W., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Pilegaard, K., Pumpanen, J., Rambal, S., Schaphoff, S., Seufert, G., Soussana, J.-F., Sanz, M.-J., Vesala, T., Zhao, M., 2007. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: A joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology*, vol. 13; p. 634-651
- Saunois, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J. et al. 2020. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1561–1623, doi: 10.5194/essd-12-1561-2020
- Thompson R. L., Broquet G., Gerbig C., Koch T., Lang M., Monteil G., Munassar S., Nickless A., Scholze M., Ramonet M., Karstens U., van Schaik E., Wu Z. and Rödenbeck C., 2020. Changes in net ecosystem exchange over Europe during the 2018 drought based on atmospheric observations *Phil. Trans. R. Soc. B3752019051220190512* doi: 10.1098/rstb.2019.0512

Accordo di Parigi: prospettive e opportunità per l'agricoltura e le foreste

Perugini L., Chiriaco M.V.

Divisione Impatti su Agricoltura, Foreste ed Ecosistemi Naturali (IAFES), Fondazione Centro Euromediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), Viale Trieste 127, 01100 Viterbo

Riassunto

L'agricoltura, le foreste e gli altri usi del suolo svolgono un ruolo importante nel cambiamento climatico, a causa delle emissioni relativamente elevate (agricoltura, deforestazione), e alla capacità di rimuovere la CO₂ dall'atmosfera (attraverso la fotosintesi), costituendo quindi al contempo la causa e la soluzione al problema dei cambiamenti climatici. La gestione sostenibile del territorio costituisce un'opzione efficace di mitigazione dei cambiamenti climatici, ed è essenziale per garantire altri importanti servizi ecosistemici che possano assicurare la resilienza ai cambiamenti climatici. Al settore agro-forestale viene pertanto riconosciuto un ruolo chiave nell'Accordo di Parigi per il raggiungimento degli obiettivi di mitigazione e adattamento potendo compensare con gli assorbimenti le emissioni residuali dei settori comprimibili, contribuendo così al raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050. Negli impegni sottoscritti dall'Unione Europea nell'ambito dell'Accordo, il settore agricolo e forestale viene introdotto in maniera più concreta negli obiettivi di riduzione dei suoi Stati Membri, con azioni che, tra l'altro, prevedono il diretto coinvolgimento delle aziende agricole e forestali con strumenti di incentivazione dedicati. Il quadro normativo è ancora in fase di definizione, ma si auspica che questo riesca a determinare un *set* di regole che non creino ulteriore appesantimento ad un settore vulnerabile ed in crisi, ma possano rappresentare una reale opportunità economica, ambientale e sociale.

Abstract

Agriculture, forests and other land uses play an important role in climate change, due to the relatively high emissions (caused by agriculture activities and deforestation), and the ability to remove CO₂ from the atmosphere (through photosynthesis), thus constituting at the same time the cause and the solution to the problem. Sustainable land management is an effective climate change mitigation option, and it is essential to ensure other important ecosystem services that can guarantee resilience to climate change. The sector is therefore recognized as a key role in the Paris Agreement for the achievement of mitigation and adaptation objectives, contributing to the achievement of climate neutrality by 2050, being able to offset the residual emissions of, e.g., non-CO₂ gases. In its National Determined Contribution submitted by the European Union under the Paris Agreement, the agricultural and forestry sector will have a more relevant role in the achievement of its long term targets, through tools that will foresee, among others, direct involvement of farmers and foresters. The regulatory framework of the incentive system at farm level for climate action is still to be defined, hopefully the EU and its member states will seize the opportunity to define a set of rules that do not create further burdens for a critical sector, but rather representing a real economic, environmental and social opportunity.

Parole chiave: Carbon Farming, EU Green Deal, AFOLU, LULUCF, cambiamenti climatici.

Introduzione

L'agricoltura, le foreste e gli altri usi del suolo (definiti come settore AFOLU - *Agriculture, Forestry and Other Land Use*) hanno un ruolo unico e fondamentale nei confronti dei cambiamenti climatici, contribuendo per circa il 23% alle emissioni antropiche globali di gas ad effetto serra (IPCC, 2019), aggiudicandosi il secondo posto come settore emissivo a

livello globale, dopo il settore energetico; al contempo costituiscono un assorbitore netto di CO₂, attraverso i processi fotosintetici ed il conseguente accumulo di carbonio nella biomassa (viva e morta) e nel suolo. Le emissioni sono prevalentemente dovute alla deforestazione nelle aree tropicali (parzialmente compensate da imboschimenti e rimboschimenti) e all'agricoltura, che genera prevalentemente emissioni di metano e protossido di azoto derivanti dall'uso dei fertilizzanti, dalla fermentazione enterica nei ruminanti, dalla gestione delle deiezioni animali e dalle risaie. L'agricoltura da sola è responsabile di circa la metà delle emissioni antropogeniche globali di metano ed è la principale fonte di protossido di azoto, due gas ad effetto serra molto più potenti dell'anidride carbonica. Inoltre, se si considera l'intero sistema agroalimentare, le emissioni generate lungo l'intera filiera di produzione e consumo del cibo arrivano a contribuire per il 37% alle emissioni globali, rappresentando, di fatto, la principale causa del cambiamento climatico (IPCC, 2019). D'altro canto, il settore AFOLU è particolarmente esposto agli impatti dei cambiamenti climatici di cui è causa. Eventi estremi sempre più frequenti e aumento della temperatura media condizionano la produttività agricola e i servizi ecosistemici, spesso compromettendoli ed imponendo la messa in atto di strategie e piani di adattamento per cercare di garantire produttività e servizi ecosistemici, soprattutto in aree particolarmente vulnerabili come l'area del Mediterraneo (Spano et al., 2020).

Al contempo, gli ecosistemi terrestri e la loro gestione possono giocare un ruolo chiave nella mitigazione dei cambiamenti climatici: il mantenimento del ruolo di *sink* degli ecosistemi e un'agricoltura produttiva a basse emissioni rappresentano una sfida ambiziosa se si considera il continuo aumento dell'uso delle risorse, da cui dipende una popolazione in costante crescita. Il Rapporto speciale IPCC sui Cambiamenti Climatici e Territorio (IPCC, 2019) riporta uno stato di sovrasfruttamento degli ecosistemi terrestri che non ha visto precedenti nella storia dell'umanità. Dal 1960 il consumo di calorie pro-capite è aumentato di circa un terzo, il consumo di carne è raddoppiato. L'uso di fertilizzanti chimici è aumentato di nove volte e le aree naturali convertite in agricoltura sono 5,3 milioni di km², corrispondenti a poco meno della superficie di tutta l'Europa continentale (esclusa la Russia Europea) con un consumo idrico per l'irrigazione pari al 70% del consumo umano totale di acqua dolce. Allo stesso tempo, lo spreco alimentare pro-capite è aumentato del 40% e corrisponde attualmente al 25-30% del cibo prodotto, rappresentando circa l'8-10% delle emissioni del sistema alimentare.

La gestione sostenibile del settore è pertanto la chiave per garantire il sostentamento delle generazioni presenti e future e per il mantenimento degli importanti servizi ecosistemici che questo offre, che sono alla base per la resilienza degli ecosistemi, in un pianeta in rapido cambiamento.

Il settore agro-forestale nell'Accordo di Parigi

L'obiettivo dell'Accordo di Parigi è quello di ridurre i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici. Per fare questo è stato definito un limite massimo di aumento della temperatura media globale di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali, possibilmente limitando ulteriormente l'aumento a 1,5 °C. Per centrare tale obiettivo di lungo termine, i Paesi si sono impegnati a raggiungere un equilibrio tra emissioni ed assorbimenti nella seconda metà di questo secolo (UNFCCC 2015). Questo significa che i 52 miliardi di tonnellate di gas serra emessi annualmente (in CO₂ equivalenti, media 2007-2016; fonte: IPCC, 2019) dalle attività antropiche dovrà essere azzerata nei prossimi 30 anni, con un'inversione di tendenza immediata, con il settore AFOLU che dovrà compensare le emissioni residuali difficilmente comprimibili (ad. es. quelle legate alla produzione alimentare e ai rifiuti).

Gli impegni di riduzione nell'ambito dell'Accordo di Parigi sono stabiliti su base volontaria dai Paesi attraverso i cosiddetti Contributi Determinati a livello Nazionale (NDC - *Nationally Determined Contribution*), i cui obiettivi possono assumere valore vincolante nei confronti di successive disposizioni legislative regionali o nazionali (Brocchieri e Perugini, 2020). L'Accordo invita i Paesi ad includere tutti i settori produttivi, incluso quindi il settore agricolo e forestale. Da un'analisi condotta dalla FAO (2016) il settore AFOLU viene incluso nell'88% degli NDC e si stima che il solo settore forestale contribuirà per circa il 25% degli obiettivi definiti in tali NDC, principalmente nei Paesi in via di sviluppo (Grassi et al., 2017).

Al settore AFOLU viene riconosciuto un ruolo chiave per raggiungere gli obiettivi di mitigazione e adattamento nell'Accordo. Il tema della produzione agricola e della sicurezza alimentare è esplicitamente menzionato nell'Accordo di Parigi: nel preambolo i Paesi riconoscono la priorità fondamentale della tutela della sicurezza alimentare e la necessità di porre fine alla fame e malnutrizione, ponendo il tema della vulnerabilità dei sistemi di produzione alimentare agli impatti negativi dei cambiamenti climatici. L'Articolo 2 sottolinea l'importanza di *“aumentare la resilienza e la capacità di adattamento agli effetti negativi dei cambiamenti climatici e uno sviluppo sostenibile a basse emissioni di gas serra, in un modo da non compromettere la produzione alimentare”*. Inoltre, l'Accordo contiene un articolo completamente dedicato ai *sinks*, l'Articolo 5, il quale invita le parti a *“intervenire per conservare e valorizzare, a seconda dei casi, gli assorbimenti e serbatoi di gas serra”*, riconoscendo, inoltre, il meccanismo REDD+ della Convenzione Quadro ONU sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) quale strumento d'incentivazione dedicato ai Paesi in via di sviluppo per la riduzione delle emissioni da deforestazione e degrado forestale e l'aumento degli assorbimenti, attraverso attività di gestione sostenibile delle foreste. Per la maggior parte dei Paesi in via di sviluppo, l'agricoltura e le foreste rappresentano i principali settori emissivi ed un'importante fetta delle economie nazionali (Tubiello, 2014; Baccini et al., 2017; Peters et al., 2017). L'ultimo Forest Resource Assessment (FAO, 2020) identifica l'Africa e il Sud America come i (sub) continenti con il più alto tasso annuo di perdita netta di foresta dal 1990. In media nei Paesi in via di sviluppo, le emissioni dell'agricoltura contribuiscono per il 35% alle emissioni nazionali (fino al 50% nei Paesi in via di sviluppo a basso reddito) contro un 12% nei Paesi sviluppati (Richards et al., 2015), con un *trend* di aumento in forte crescita. Ad esempio, Brasile, Cina e India negli ultimi dieci anni hanno determinato l'aumento delle emissioni globali di N₂O, derivanti principalmente dal settore agricolo (Tian et al. 2020). In generale, i Paesi in via di sviluppo hanno posto un forte accento nei loro NDC sul potenziale di mitigazione del settore AFOLU, evidenziando anche le vulnerabilità di questo settore ai cambiamenti climatici (FAO, 2016).

Il quadro europeo

L'Unione Europea ha recentemente aggiornato il suo obiettivo di riduzione nell'ambito dell'accordo di Parigi (UE 2020), indicando un obiettivo di riduzione per il 2030 di almeno il 55% rispetto alle emissioni del 1990. L'obiettivo riguarda tutti i settori produttivi, incluso il settore AFOLU e, nello specifico, le emissioni e gli assorbimenti derivanti dalle attività di uso del suolo, cambiamenti di uso del suolo e selvicoltura (LULUCF- *Land Use, Land Use Change and Forestry*). A livello UE, il LULUCF contribuisce alla compensazione di circa il 7% delle emissioni totali di gas a effetto serra, con un assorbimento netto di circa 263 milioni di tonnellate di CO₂ nel 2018, mentre l'agricoltura (emissioni non-CO₂) costituisce il quarto

settore emmissivo dopo energia, trasporti e industrie, con un totale di 12% delle emissioni totali (pari a 470 milioni di tonnellate di CO_{2eq} nel 2018) (EEA 2020).

L'inclusione del LULUCF nel *target* europeo costituisce una novità, visto che precedentemente la legislazione interna UE era prevalentemente incentrata sui settori emmissivi. Con il Regolamento 841/2018 (Regolamento LULUCF), al settore viene attribuito un obiettivo di neutralità, ovvero la contabilizzazione dei risultati delle attività LULUCF non deve generare emissioni nette (cosiddetta *no-debit rule*). Gli eventuali crediti derivanti dal settore possono contribuire all'obiettivo di riduzione europea entro certi limiti, ovvero per un quantitativo attualmente stabilito pari a 260 milioni di tonnellate di CO₂ equivalenti per il decennio 2021-2030, per compensare le emissioni generate dall'agricoltura, settore al quale è attribuito un limitato potenziale di riduzione.

Attualmente il regolamento è in fase di revisione per adeguare i contributi richiesti dai vari settori all'aumento dell'ambizione Europea, che passa da un obiettivo riduzione per il 2030 di -40% ad una riduzione di -55% rispetto alle emissioni nette del 1990. Il piano di riduzione delle emissioni è definito all'interno del EU *Green Deal*, il quale traccia l'ambizioso percorso che ha come fine ultimo quello di rendere l'Unione Europea "il primo continente climaticamente neutro", senza emissioni nette di gas serra nel 2050 (European Commission 2019). Nel raggiungimento di questo obiettivo il LULUCF è chiamato a svolgere un ruolo chiave, essendo in grado di compensare le emissioni che in alcuni settori, per quanto ridotte, non potranno essere azzerate, come quelle non-CO₂ legate alla produzione alimentare (settore zootecnia, fertilizzazioni) e di altri settori come quello industriale e dei rifiuti. Questo impegno si traduce in aspettative elevate, richiedendo un raddoppio del *sink* netto nel 2050, che dovrà raggiungere -425 MtCO_{2eq} rispetto ai livelli attuali di -262 MtCO_{2eq}, con una tendenza prevista in diminuzione a causa dell'invecchiamento delle foreste, dall'aumento dei prelievi legnosi, nonché a causa dell'aumento dell'incidenza dei disturbi derivanti dai cambiamenti climatici come siccità, incendi boschivi e aumento degli attacchi parassitari (European Commission 2020a). Un tale aumento consistente degli assorbimenti e la contemporanea riduzione delle emissioni in campo agricolo possono essere raggiunti solo con il diretto coinvolgimento degli agricoltori e selvicoltori. A tal fine il Green Deal si è dotato di due strumenti fondamentali: la "Farm to Fork Strategy" (European Commission 2020b) e il "Piano d'azione per l'Economia Circolare" (European Commission 2020c). Ambedue fanno riferimento a sistemi di incentivazione attuabili a livello di singole aziende agricole/forestali, promuovendo sistemi di certificazione del carbonio rimosso da pratiche agricole come sistema di incentivazione, il così detto *Carbon Farming*. Il *Carbon Farming* dovrebbe rappresentare un sistema atto a promuovere risultati climatici verificati attraverso la riduzione delle emissioni agricole (ad esempio attraverso la gestione ottimizzata di fertilizzanti e residui) o il sequestro del carbonio attraverso azioni quali il rimboschimento, colture di copertura, riduzione delle lavorazioni del suolo, etc. L'iniziativa ha come obiettivo finale quello di fornire agli agricoltori una nuova fonte di reddito e aiutare altri settori a decarbonizzare la catena alimentare. Il quadro normativo e metodologico del *Carbon Farming* è ancora in via di definizione come anche le modalità con cui verranno premiate azioni virtuose. Una delle opzioni considerate è attraverso strumenti di finanziamento della Politica Agricola Comune (PAC) o altre iniziative pubbliche o private come le iniziative di mercato. Il sistema dovrà essere messo a punto entro il 2023 e, come già anticipato dalla proposta di Strategia di Adattamento europea (2021), dovrà promuovere anche attività che aumentano la resilienza ai cambiamenti climatici.

Il quadro italiano

Anche in Italia, l'agricoltura, le foreste e gli altri usi del suolo hanno un ruolo fondamentale nel bilancio delle emissioni. Il settore LULUCF ha registrato in Italia un assorbimento netto di 41,6 Mt di CO₂eq nel 2019 (NIR 2021), la cui quota maggiore è attribuita alle foreste che da sole nel 2019 hanno assorbito 37,3 Mt di CO₂eq, seguite dalla gestione dei pascoli (8,3 Mt di CO₂eq), dai prodotti legnosi (1,8 Mt di CO₂eq) e dalla gestione delle terre agricole (0,14 Mt di CO₂eq). La gestione dell'uso del suolo urbano e delle zone umide invece rappresenta un'emissione pari a 5,2 Mt di CO₂eq.

Il settore agricolo (emissioni non-CO₂), invece, è responsabile del 7,1% delle emissioni totali nazionali con 29,5 Mt di CO₂eq nel 2019 (NIR, 2021), rappresentando la principale fonte di emissioni di CH₄ in Italia, pari al 44% del totale nazionale, e di N₂O pari al 59% del totale nazionale. L'andamento emissivo del settore agricolo ha mostrato un calo dal 1990 al 2019 pari al 17,3% dovuto principalmente alla contrazione della superficie coltivata e del numero di capi zootecnici ma anche al miglioramento delle pratiche di produzione, incluso un ridotto utilizzo di fertilizzanti azotati sintetici e l'efficientamento dei sistemi di gestione delle deiezioni animali (NIR, 2021).

Secondo quanto previsto dalla “*Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra*” (2021), l'impegno nazionale nell'ambito del *Green Deal* verso l'azzeramento delle emissioni vedrà comunque delle emissioni residue al 2050 riferibili ad alcuni settori (agricoltura, industria e rifiuti) che, per quanto si impegneranno nella riduzione delle emissioni, saranno impossibilitati a raggiungere un completo azzeramento, lasciando una quantità di emissioni da compensare di circa 65-85 Mton CO₂ eq. Il settore LULUCF in Italia giocherà un ruolo fondamentale per la compensazione di queste emissioni residue. L'applicazione di pratiche sostenibili sarà fondamentale per incrementare la capacità di assorbimento del settore, inclusa una azione rafforzata di prevenzione e contrasto degli incendi boschivi e un miglioramento delle pratiche agricole e di uso del suolo finalizzate all'aumento del carbonio stoccato nei suoli, quali la minima lavorazione dei terreni, la concimazione organica, le pratiche conservative e i metodi di coltivazioni sostenibili tra cui l'agricoltura biologica. Su queste basi, lo scenario di decarbonizzazione italiano prevede un incremento dell'assorbimento netto generato dal settore LULUCF, arrivando a compensare circa 45 Mton CO₂eq circa delle emissioni residue, pari al massimo storico raggiunto nel 2015.

Il ruolo degli agricoltori e selvicoltori, così come quello dei decisori politici e dei consumatori finali, diventa quindi fondamentale nel definire e applicare politiche e strategie di gestione sostenibile. Ad esempio, la *carbon neutrality* può essere raggiunta già a livello di singola azienda agricola attraverso l'applicazione di pratiche virtuose lungo intera filiera di produzione del cibo, inclusa la produzione biologica, la riduzione dei trattamenti chimici, il riutilizzo dei residui colturali per la fertilizzazione organica, il mantenimento della copertura erbosa nelle colture perenni per la protezione del suolo, strategie di efficienza energetica e l'utilizzo di imballaggi sostenibili, come dimostrato in uno studio che analizza un caso di produzione vitivinicola sostenibile in centro Italia (Chiriaco et al., 2019). L'agricoltura sostenibile, la cui forma maggiormente diffusa è l'agricoltura biologica regolamentata a livello europeo dai Reg. (EC) n. 834/2007, Reg. (EC) n. 889/2008, Reg. (EU) 464/2020, oltre a contribuire al raggiungimento degli obiettivi di riduzione e azzeramento delle emissioni, garantisce una maggiore resilienza ai cambiamenti climatici, consentendo ai sistemi di produzione alimentare di mantenere un equilibrio tra produttività e protezione dell'ambiente.

Inoltre, anche la consapevolezza dei consumatori finali circa l'importanza di scegliere cibi sani e sostenibili sta notevolmente aumentando negli ultimi anni (Chiriaco et al., 2017) lasciando ben sperare in un aumento delle superfici agricole gestite in maniera sostenibile.

Più aziende e diversi attori (agricoltori, gestori forestali, decisori politici e cittadini) possono collaborare a livello territoriale per raggiungere la neutralità climatica a livello di distretto rurale. I risultati di uno studio condotto in un distretto zootecnico in Italia mostrano che opzioni di gestione sostenibile del territorio (miglioramento della dieta dei ruminanti, efficientamento nella gestione delle deiezioni animali e produzione di biogas, riduzione dei fertilizzanti azotati, minor lavorazioni dei suoli, mantenimento della copertura erbacea, gestione sostenibile dei residui agricoli per produzione di bioenergie o per interrimento, cambi di uso del suolo da colture annuali a perenni, afforestazione e riforestazioni) possono ridurre e compensare completamente le emissioni della produzione zootecnica nella stessa area (Chiriaco e Valentini, 2021).

La ricolonizzazione naturale delle foreste sui terreni abbandonati agricoli degli Appennini ha dimostrato avere un elevato effetto positivo in termini di aumento di *stock* di carbonio non solo nella biomassa, ma anche nel suolo, con un aumento fino al 120% (Chiti et al. 2018, Fino et al. 2020). La protezione dei boschi di neoformazione e la loro successiva gestione può rappresentare una risorsa futura per le aree montane in termini di produzione bioenergetica e di legname da lavoro.

Tuttavia, il patrimonio forestale italiano soffre di una carenza organica di dati accurati che possano aiutare una corretta pianificazione rispetto alle sue varie funzioni, inclusa quella climatica (RAF 2019). Anche i dati disponibili relativi al carbonio organico nel suolo, il comparto di carbonio più importante in agricoltura, sono inadeguati a definire correttamente l'effetto delle differenti scelte gestionali, al momento stimate con ampio utilizzo di fattori di emissione generici globali, scalati a livello nazionale (NIR 2021). È quindi importante garantire la conoscenza delle conseguenze della gestione del territorio sulla resilienza sociale ed economica, ed aumentare la fonte dati che ci permetta di poter monitorare accuratamente gli effetti della gestione sui comparti di carbonio forestali e agricoli.

Conclusioni

Il settore agro-forestale riveste un ruolo unico nella lotta ai cambiamenti climatici, rappresentando di fatto un'importante causa dei cambiamenti climatici e al contempo una possibile soluzione. Tuttavia, la capacità di mitigazione del settore è fortemente condizionata dalle modalità di gestione dei sistemi naturali ed agricoli e deve rispondere a diverse necessità come la produzione di cibo, energia, ed altri importanti servizi ecosistemici. Inoltre, il settore AFOLU è altamente esposto e molto vulnerabile ai cambiamenti climatici. Pertanto, di fronte a un clima che cambia, una gestione sostenibile delle risorse a lungo termine è una sfida chiave per garantire la stabilità e l'adattabilità dei comparti di carbonio e per garantire un'efficace azione di *sink* nel lungo termine. Le politiche climatiche europee mirano a mettere in piedi sistemi di incentivazione per azioni che promuovano iniziative a scala aziendale che devono garantire non solo effetti di mitigazione, ma anche il mantenimento della vitalità e del funzionamento degli ecosistemi, con conseguente diminuzione della loro vulnerabilità climatica. La gestione sostenibile che possa conciliare in maniera sinergica la fornitura di tali servizi è alla base delle politiche Europee; la sfida che ci troviamo ad affrontare è trovare soluzioni che possano declinarla a scala locale e di distretto. Solo attraverso politiche di incentivazione di gestione agricola e forestale il settore AFOLU potrà contribuire notevolmente

alla compensazione delle emissioni residuali dei settori non azzerabili, seppur tuttavia dovranno comunque intervenire le tecnologie per la rimozione della CO₂ dall'atmosfera per raggiungere la piena neutralità climatica. Questa è la sfida che l'Unione Europea e l'Italia dovranno affrontare nell'immediato futuro.

Bibliografia

- Baccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., Houghton, R. A., 2017. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science*. 358, 230–234. <https://doi.org/10.1126/science.aam5962>.
- Brocchieri F. e Perugini L. 2020. Da Kyoto a Parigi: le regole di monitoraggio e rendicontazione come elementi chiave per comprendere l'attuale negoziato sul clima. *Ingegneria per l'ambiente*, V.7 N.3 (2020):Vol. 7, num. 3, anno 2020 DOI: <https://doi.org/10.32024/ida.v7i3.272>
- Chiti T., Blasi E., Pellis G., Perugini L., Chiriaco M.V., & Valentini R. (2018). Soil organic carbon pool's contribution to climate change mitigation on marginal land of a Mediterranean montane area in Italy. *Journal of environmental management*, 218, 593-601.
- Chiriaco, M. V., Belli, C., Chiti, T., Trotta, C., & Sabbatini, S. 2019. The potential carbon neutrality of sustainable viticulture showed through a comprehensive assessment of the greenhouse gas (GHG) budget of wine production. *Journal of Cleaner Production*, 225, 435-450.
- Chiriaco, M. V., Grossi, G., Castaldi, S., & Valentini, R. 2017. The contribution to climate change of the organic versus conventional wheat farming: A case study on the carbon footprint of wholemeal bread production in Italy. *Journal of cleaner production*, 153, 309-319.
- Chiriaco, M. V., & Valentini, R. 2021. A land-based approach for climate change mitigation in the livestock sector. *Journal of Cleaner Production*, 283, 124622.
- EEA [European Environment Agency], 2020. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2018 and inventory report 2020. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol.
- EU 2020. Submission by Germany and the European commission on behalf of the European union and its Member States. The update of the nationally determined contribution of the European Union and its Member States. Berlin, 17 December 2020. Disponibile on line: https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Spain%20First/EU_NDC_Submission_December%202020.pdf
- European Commission, 2019. Communication from the Commission. The European Green Deal. Brussels, 11.12.2019. COM(2019) 640 final
- European Commission 2020a. Commission Staff Working Document Impact Assessment - Accompanying The Document Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Stepping Up Europe's 2030 Climate Ambition. Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. SWD(2020) 176 final. Brussels, 17.9.2020
- European Commission 2020b. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system. Brussels, 20.5.2020, COM(2020) 381 final.
- European Commission 2020c. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe. Brussels, 11.3.2020 COM(2020) 98 final
- FAO. [Food and Agriculture Organization of the United Nations] 2016. The Agriculture Sectors in the Intended Nationally Determined Contributions: Analysis. Environment and Natural Resources Management Working Paper No. 61. Rome. 92 pp. (also available at <http://www.fao.org/3/a-i5687e.pdf>)
- FAO [Food and Agriculture Organization of the United Nations], 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>
- Fino, E., Blasi, E., Perugini, L., Pellis, G., Valentini, R., & Chiti, T. (2020). Is Soil Contributing to Climate Change Mitigation during Woody Encroachment? A Case Study on the Italian Alps. *Forests*, 11(8), 887.
- Grassi, G., House, J., Dentener, F., Federici, S., den Elzen, M., & Penman, J. (2017). The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change*, 7(3), 220.
- IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press. MATTM [Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare], Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero delle Politiche agricole, Alimentari e Forestali 2021. Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra. Gennaio 2021. On line: https://www.minambiente.it/sites/default/files/lts_gennaio_2021.pdf
- NIR [National Inventory Report] 2021. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2019. Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA). Rome. Italy
- Peters, G. P., Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Ilyina, T., Jackson, R. B., Joos F., Ivar Korsbakken, J., McKinley, G. A., Sitch, S., Tans, P., 2017. Towards real-time verification of CO₂ emissions. *Nat. Clim. Change*. 7: 848–850. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0013-9>.
- Regulation (EU) 2018/841 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework and amending Regulation (EU) 525/2013 and Decision 529/2013/EU [2018] OJ L156/1 (LULUCF Regulation).
- RAF Italia 2017-2018 - Rapporto nazionale sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia (2019), Prodotto dalla Rete Rurale Nazionale (RRN 2014-2020), Compagnia delle Foreste, Arezzo, ISBN 9788898850341.
- Richards, M.B., Wollenberg, E., Buglion-Gluck, S., 2015. Agriculture's contributions to national emissions. CCAFS Info Note. Copenhagen, Denmark: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CAAFS).
- Spano D., Mereu V., Bacciu V., Marras S., Trabucco A., Adinolf M., Barbato G., Bosello F., Breil M., Chiriaco M. V., Coppini G., Essenfelder A., Galluccio G., Lovato T., Marzi S., Masina S., Mercogliano P., Mysiak J., Noce S., Pal J., Reder A., Rianna G., Rizzo A., Santini M., Sini E., Staccione A., Villani V., Zavatarelli M., 2020. Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia. DOI: 10.25424/CMCC/ANALISI_DEL_RISCHIO

- Tian, H., Xu, R., Canadell, J. G., Thompson, R. L., Winiwarter, W., Suntharalingam, P., ... & Yao, Y. (2020). A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, 586(7828), 248-256. Tubiello, F. N., Salvatore, M., Ferrara, A. F., House, J., Federici, S., Rossi, S., Biancalani, R., Condor Golec, R. D., Federici, S., Jacobs, H., Flammini, A., Prospero, P., Cardenas, P., Schmidhuber, J., Sanz Sanchez, M. J., Srivastava, N., Smith, P., 2015. The Contribution of Agriculture, Forestry and other Land Use activities to Global Warming, 1990-2012: Not as high as in the past. *Global. Change Biol.* 21(7), 2655-2660. <https://doi.org/10.1111/gcb.12865>.
- UNFCCC, 2015. Adoption of the Paris Agreement. Report No. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1; <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>

Strategie di adattamento delle colture per favorire la resilienza degli agroecosistemi

Bonfante A.

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo - ISAFOM, P.le Enrico Fermi, 80055 Portici (NA).

Riassunto

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle produzioni agricole, rappresentano il primo fattore di rischio per la resilienza delle comunità agricole locali e per l'accesso al cibo delle popolazioni rurali ed urbane. Le Nazioni Unite e la FAO, attraverso il *Sustainable Development Goals 2 (Zero Hunger)* ed il *Sustainable Crop Production Intensification (SCPI) Strategic Objective A*, sottolineano la necessità di aumentare le produzioni in modo sostenibile, contribuendo in tal modo a conseguire obiettivi più ampi di sicurezza alimentare, sviluppo rurale e resilienza dei sistemi agricoli.

In tale contributo, dopo una breve introduzione sugli effetti dei cambiamenti climatici sui sistemi agricoli saranno riportati i possibili approcci attuabili a scale temporali e spaziali differenti attraverso procedure di pianificazione (lungo periodo) e di gestione (breve periodo).

Abstract

The effects of climate change on agricultural production represent the first risk factor for the resilience of local agricultural communities and for the access to food of rural and urban populations. The United Nations and FAO, through the Sustainable Development Goals 2 (Zero Hunger) and the Sustainable Crop Production Intensification (SCPI) Strategic Objective A, underline the need to increase production in a sustainable way, thus contributing to the achievement of broader objectives. food security, rural development and the resilience of agricultural systems.

In this paper, after a brief introduction on the effects of climate change on agricultural systems, the possible approaches that can be implemented at different time and space scales through planning or long-term and short-term management procedures will be reported.

Parole chiave: cambiamento climatico, resilienza agroecosistemi, modelli di adattamento, suolo

Introduzione

Il cambiamento climatico (CC) ha effetti importanti sulle produzioni agricole rappresentando il primo fattore di rischio per la resilienza delle comunità agricole locali e per l'accesso al cibo delle popolazioni rurali ed urbane attuali e future. Tali effetti sono molto dipendenti dal livello di cambio climatico e dalla capacità specifica locale di assorbire o mitigare tali effetti (Li et al., 2011).

Si stima che il CC abbia ridotto le produzioni globali di mais e frumento del 3.8% e 5.5% (Lobell et al., 2011) e che gli incrementi delle temperature oltre le soglie fisiologiche critiche per la coltivazione, porteranno ad una diminuzione della produttività (Battisti and Naylor, 2009). L'incremento della variabilità climatica aggrava quindi il rischio nella produzione e la sfida per gli agricoltori nell'affrontarla (Thornton, 2010).

In questo contesto le Nazioni Unite e la FAO, attraverso il *Sustainable Development Goals 2 (Zero Hunger)* ed il *Sustainable Crop Production Intensification (SCPI) Strategic Objective A*, sottolineano la necessità di aumentare le produzioni in modo sostenibile, contribuendo in tal modo a conseguire obiettivi più ampi di sicurezza alimentare, sviluppo

rurale e resilienza dei sistemi agricoli. Tali obiettivi sono minati oltre che dall'effetto del cambiamento climatico, dal raggiungimento del *plateau* di massima produzione per le principali colture e dall'importante divario produttivo esistente a livello globale tra i diversi paesi.

In linea generale, per massimizzare le produzioni, l'agricoltura moderna ha spinto nella selezione di varietà altamente performanti con scarsi margini di miglioramenti. Tale condizione è particolarmente evidente nella Figura 1, dove il dato produttivo delle principali colture quali cereali e leguminose (hg ha^{-1}) si è appiattito dal 1960 al 2014.

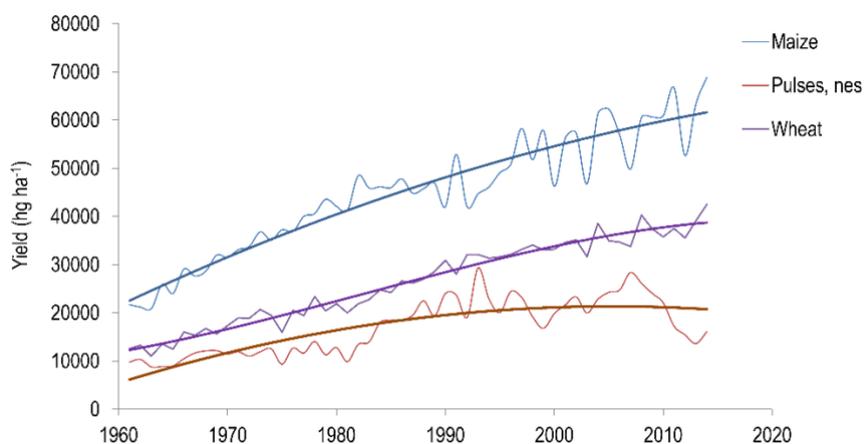


Figura 1. Produzioni colturali in Europa (hg/ha) nel periodo 1960-2014 (FAOSTAT, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>)

La massimizzazione delle produzioni avviene soprattutto nei Paesi più sviluppati in cui l'agricoltura ha migliorato l'utilizzo e l'ottimizzazione delle risorse. In Europa e USA ad esempio è evidente l'aumento dell'efficienza dell'uso dei fertilizzanti nella produzione di grano negli ultimi decenni a differenza di altri Paesi come la Cina (19% della produzione di grano mondiale ed il 29% dell'uso di fertilizzanti chimici) che seppur sviluppati hanno ancora margini di ottimizzazione delle risorse (Zhang et al., 2015).

La resilienza degli agroecosistemi non è però solo minata dalla componente climatica, ma ad essa si associano e si combinano ulteriori fattori di rischio, come i processi di degradazione della risorsa suolo. Sfortunatamente, la superficie coltivabile è una quantità finita, e non tutti i suoli sono capaci di svolgere bene la funzione ecosistemica di produrre biomassa, con risposte produttive molto differenti tra suoli diversi. In pratica, a parità di clima e gestione, suoli diversi generano risposte produttive quantitative e qualitative differenti per una specifica coltura (Bonfante et al., 2017b). A questo si aggiungono i processi di degradazione del suolo che porteranno nel prossimo futuro ad una riduzione della superficie coltivabile per individuo da 0.45 ha (1961) a 0.1 ha nel 2050, processi per lo più naturali esacerbati da varie forme di uso non sostenibile realizzato dall'uomo (EU-*Soil Thematic Strategy*). I principali processi che limiteranno le zone coltivabili riconducibili a fenomeni di degradazione del suolo sono: perdita di suolo per erosione superficiale, perdita di sostanza organica, compattazione del suolo, sottrazione del suolo a seguito di urbanizzazione, contaminazione del suolo e diminuzione della biodiversità.

Mentre alcuni dei processi di degradazione del suolo come sottrazione per altro uso (*soil sealing*) od erosione, riducono fisicamente il suolo disponibile per l'agricoltura, il cambiamento

climatico influisce strettamente sulla fertilità dei suoli e sulla idoneità delle superfici alle produzioni agricole. Quest'ultima porta ad una riduzione delle aree coltivabili, con un'azione diretta dovuta al cambio dei regimi termici ed idrici, oppure indiretta in combinazione con la variabilità spaziale del suolo e delle forme del territorio.

Nello specifico, affinché un'area sia definita idonea alla coltivazione di una determinata coltura, quindi garantita la realizzazione del ciclo colturale, vi è la necessità che siano soddisfatti i requisiti termici e idrici specifici della coltura (aspetto climatico) ed i requisiti ambientali definiti dalle caratteristiche pedologiche (suoli con caratteristiche capaci di soddisfare le richieste colturali) e morfologiche del territorio (es. pendenza, esposizione). Quello che spesso avviene con il CC è lo spostamento delle superfici climaticamente idonee alla coltivazione, che, incrociato con la variabilità spaziale del suolo, produce una sostanziale diminuzione delle superfici coltivabili, con conseguente necessità di riprogrammare e/o riadattare il sistema agricolo (Bonfante et al., 2018, 2017a, 2015) (Fig. 2).

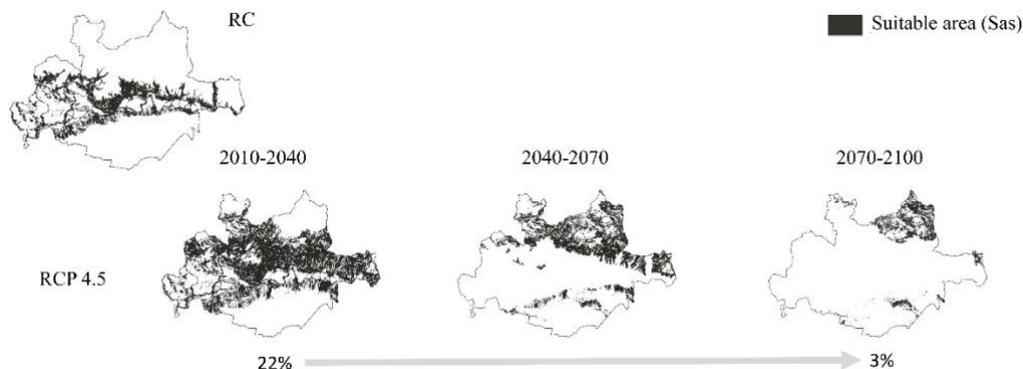


Figura 2. Previsioni di riduzione delle aree idonee alla coltivazione del vitigno Aglianico in valle Telesina (BN) a seguito del cambiamento climatico, scenario RCP 4.5 (modificato da Bonfante et al., 2018).

Le potenzialità e la resilienza dei sistemi agricoli attuali al cambiamento climatico può essere esplorata attraverso modelli di simulazione dell'agro-ecosistema. Interessante in tal senso, è il servizio fornito alla scala europea dal Global Yield Gap Atlas sviluppato dall'università del Nebraska e dall'università di Wageningen, per valutare le potenzialità inesprese, o i margini di miglioramento delle produzioni, in riferimento ad una specifica coltura. Tale sistema consente di comprendere le possibilità di adattamento futuro al CC delle aree attualmente coltivate e quindi la resilienza dei sistemi agricoli (www.yieldgap.com) (Fig. 3).

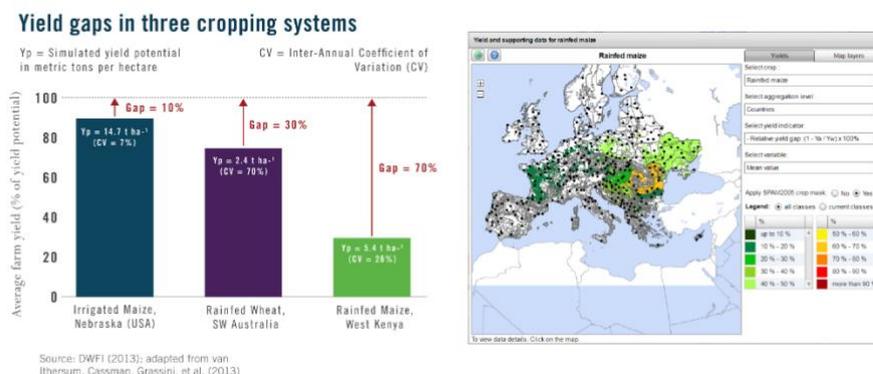


Figura 3. Piattaforma Global Yield Gap Atlas (www.yieldgap.com)

L'effetto dei cambiamenti climatici sugli agroecosistemi e come studiarli

Importanti effetti diretti dei cambiamenti climatici in corso sui raccolti saranno dovuti principalmente ai cambiamenti dei regimi di temperatura e di precipitazione. Lo *stress* idrico e termico sono considerati i due principali fattori ambientali che limitano la crescita, lo sviluppo e la resa delle colture (Gornall et al., 2010; Prasad et al., 2008), a cui bisogna aggiungere l'incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi, come siccità, piogge intense, inondazioni e alte temperature massime, nelle fasi critiche dello sviluppo delle colture (Porter et al., 2014).

Gli effetti dei singoli fattori sulle colture non sono indipendenti da altri fattori e in genere non sono lineari. Ad esempio, la risposta delle colture all'aumento della temperatura dipende dalla specie, dallo stadio fenologico, dal sistema colturale e dalle specifiche condizioni ambientali (es. precipitazioni) delle aree considerate. Inoltre esistono effetti indiretti sulle colture dovuti ad esempio all'azione dei cambi dei regimi termici ed idrici sulla mineralizzazione della sostanza organica nel suolo e quindi sulla sua fertilità chimica, fisica e biologica. In particolare:

Regimi termici: l'incremento della temperatura media inciderà sulla durata della stagione di crescita, potendo da un lato favorire un allungamento della stessa per le colture a ciclo indeterminato e con esigenze termiche elevate (es. pomodoro e soia) e dall'altro accelerare lo sviluppo di alcune colture riducendone la produttività (es. frumento duro). In alcune zone in cui le basse temperature sono un fattore limitante, il loro incremento potrà determinare una maggiore durata del periodo favorevole ai processi di crescita e sviluppo, e favorire l'utilizzo di varietà più tardive caratterizzate da maggiore produttività. Quest'ultimo aspetto ad esempio, sta rendendo climaticamente idonee alla viticoltura areali che fino a qualche decennio fa non lo erano (es. nord Europa, aree interne della penisola a quote elevate). Oltre ad avere un effetto diretto sulla fenologia delle piante l'alzamento della temperatura media comporta un aumento della quantità d'acqua persa dal suolo per evaporazione e traspirazione. Effetto che non è

sempre compensato da un uguale incremento di precipitazioni, e che va ad esacerbare condizioni pregresse di aridità (es. Regioni del Sud Italia). In queste zone, l'evapotraspirazione potenziale (perdita d'acqua dal terreno in condizioni di disponibilità idrica illimitata) nei mesi estivi è un ordine di grandezza superiore della precipitazione media climatica (tabella 2.4, Libro Bianco, 2011). Mentre il cambio di regime termico può essere affrontato ad esempio attraverso la scelta varietale (genotipi selezionati), quello che risulta difficile da affrontare sono gli estremi termici che si possono verificare durante le fasi critiche della crescita colturale (Gornall et al., 2010). In letteratura è dimostrato come pochi giorni di temperature estreme $>32^{\circ}\text{C}$ durante la fase di fioritura di molte colture possa ridurre drasticamente la produzione (Wheeler et al., 2000). Nel mais ad esempio tali *stress* in fioritura agiscono inibendo l'impollinazione e con essa la produzione delle cariossidi (Basma, 2000; Stone and Nicolas, 1995), con una relazione significativa ritrovata tra il numero di giorni caldi ($T>32^{\circ}\text{C}$) e la riduzione di produzione (Hawkins et al., 2013). In alcuni ambiti agricoli come quello viti-vinicolo, l'incremento dei regimi termici crea, ad esempio, problemi sulla maturazione delle uve con il mancato raggiungimento degli obiettivi enologici (si ha il disaccoppiamento tra maturazione tecnologica ed aromatica). Inoltre, durante la ripresa vegetativa temperature al di sotto dei $-2,5^{\circ}\text{C}$ (gelate tardive) possono influire negativamente sulla crescita vegetativa riducendo la resa in modo significativo, mentre giornate con temperature massime elevate ($T>35^{\circ}$) durante la fase di maturazione possono inibire la fotosintesi (Gladstones, 1992) e lo sviluppo del colore e degli antociani (Mori et al., 2005).

Regimi idrici: la variazione attese dei regimi pluviometrici nel mediterraneo ci indicano una diminuzione degli apporti durante il periodo estivo con l'incremento di eventi pluviometrici estremi ad alta intensità (Bucchignani et al., 2015). L'impatto del cambiamento climatico sul bilancio idrico sarà sempre strettamente dipendente dalle condizioni sito-specifiche e dalle proiezioni del regime pluviometrico degli scenari futuri. In alcune zone la riduzione degli eventi pluviometrici potrebbe non portare ad una marcata diminuzione di acqua disponibile per le colture. Questo perché gli effetti delle piogge e dell'irrigazione sulla disponibilità di acqua delle colture sono fortemente correlati al sistema fisico del suolo (orizzonti del suolo e loro proprietà idrologiche) e ad altre variabili climatiche (es. Evapotraspirazione) che influenzano l'equilibrio idrico del suolo e l'acqua disponibile per la pianta. È quindi evidente che a parità di condizioni climatiche due suoli, con diverso comportamento idrologico, possono mostrare diversa capacità di mitigazione dell'effetto del cambiamento climatico su colture specifiche (Bonfante et al., 2020).

All'effetto della variazione dei succitati regimi si aggiungono gli effetti indiretti sulle colture determinati dall'aumento delle condizioni ambientali utili allo sviluppo di fitopatologie o alla comparsa di nuove specie d'insetti dannosi fino ad arrivare ai fenomeni d'inondazione dei campi.

Un'ampia varietà di studi ha affrontato gli impatti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura con l'intento di poter prevedere l'impatto dei cambiamenti climatici sui processi bio-fisici che controllano le dinamiche dei sistemi colturali in termini di variazioni assolute o relative della produttività delle colture, dell'assorbimento di acqua e dell'uso delle risorse. Tali studi simulano le principali interazioni tra fattori climatici, suolo, colture e pratiche agricole e possono essere realizzati con diversi approcci:

- **Modelli di simulazione dei sistemi colturali basati sui processi** (es. SWAP, Kroes et al., 2017; CropSyst, Stöckle et al., 2003; AQUACROP, Hsiao et al., 2009);

- **Modelli semplici basati su approcci empirici** (Ewert et al., 2005);
- **Approcci multicriteriali** come valutazioni climatiche o approcci di Land Suitability (Hood et al., 2006; Tuan et al., 2011);
- **Modelli statistici definiti da dati storici culturali e climatici** (Lobell and Burke, 2010; Lobell and Ortiz-Monasterio, 2007);
- **Modelli ibridi di Land Evaluation**, che combinano approcci qualitativi e quantitativi in un'unica procedura *key-out* di valutazione (Bonfante et al., 2015, 2018).

Strategie di adattamento per la resilienza degli agrosistemi:

Lo studio ed il supporto alla resilienza degli agroecosistemi al cambiamento climatico varia in funzione della dimensione della scala temporale e spaziale nella quale si vuole affrontare il problema (Fig. 4). Al variare dell'incrocio tra le scale, cambia lo *stakeholder* a cui ci si può riferire e le relative risposte che si possono fornire. Quello accertato è che l'importanza del segnale del cambiamento climatico aumenta con la scala spaziale, suggerendo che fattori non climatici come la gestione o il suolo possono diventare più importanti sulle scale locali (Bakker et al., 2005; Challinor et al., 2009).

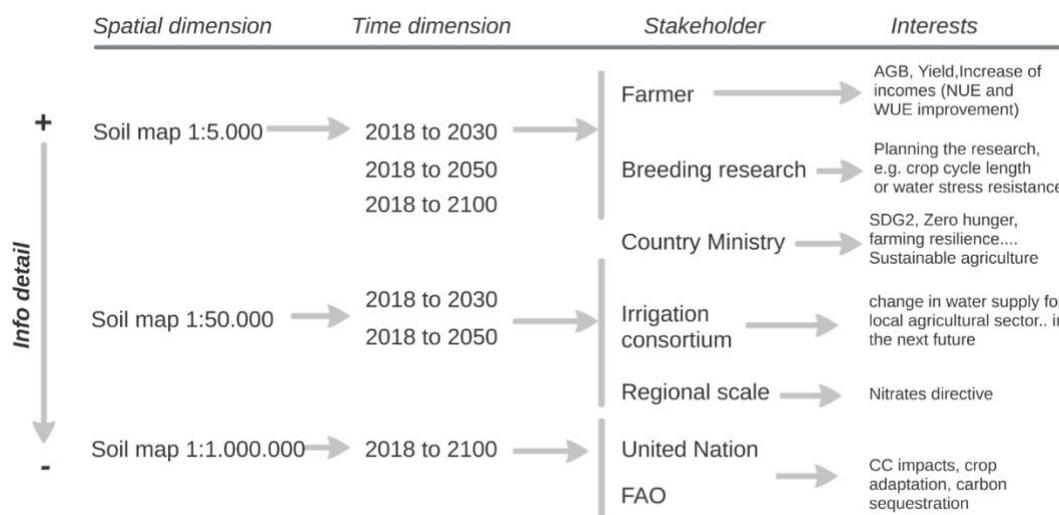


Figura 4. Relazioni tra dimensione spaziale e temporale nelle risposte agli effetti del cambiamento climatico sugli agroecosistemi.

Sulla base della combinazione della dimensione spaziale e temporale possiamo descrivere due approcci per affrontare i cambiamenti climatici in agricoltura per poter rendere resiliente gli agroecosistemi: le strategie a lungo termine o di pianificazione (*Planning Strategies*) ed a breve termine o di gestione (*Management Strategies*) (Bonfante et al., 2018).

Le strategie di pianificazione hanno una scala spaziale ampia (es. regionale, nazionale) ed analizzano gli effetti degli scenari climatici futuri (*Representative Concentration Pathway - RCP*) attraverso gli approcci riportati in precedenza. In linea generale si interessano di:

- Studiare dell'impatto dei cambiamenti climatici nelle aree di produzione
- Valutare degli scenari gestionali alternativi
- Valutare i modelli di ottimizzazione delle risorse

- Individuare le politiche di gestione e supporto ai territori rurali
- Individuare le traiettorie per il *breeding*.

Tali strategie si concentrano su informazioni territoriali di lunga durata. Ad esempio, una mappa del suolo è un'informazione di lunga durata (si può presumere che abbia un carattere altamente statico) che può essere utilizzata per pianificare le rese in un'azienda agricola o l'uso del suolo all'interno di un distretto considerando gli scenari di cambiamento climatico. Un esempio di strategia di *planning* è l'applicazione di un modello ibrido di *Land Evaluation* capace d'integrare le informazioni durature del territorio attraverso approcci qualitativi, con modelli meccanicistici quantitativi capaci di valutare l'effetto delle proiezioni climatiche future sulla resa di una specifica coltura, classificando il cambio d'idoneità nel tempo del territorio ad una specifica gestione colturale (Fig. 5)

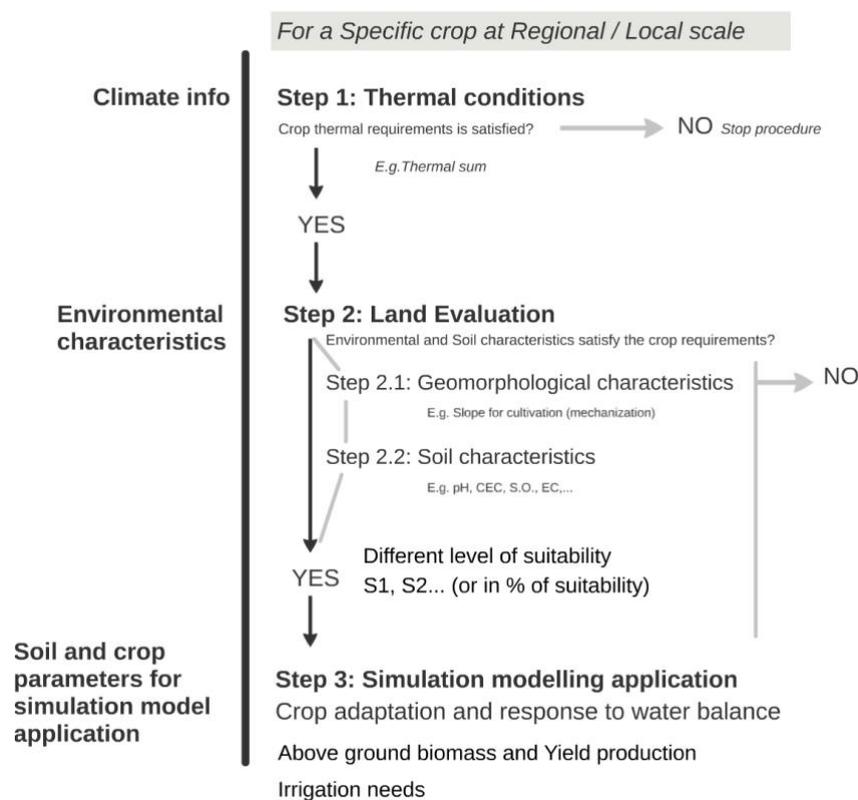


Figura 5. Schema dell'approccio di Land Evaluation ibrida per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici e l'adattamento colturale (modificato da Bonfante et al., 2015 e 2018).

Le strategie di gestione, hanno una scala temporale molto ristretta ed una scala spaziale riconducibile al campo. Si basano fondamentalmente sull'utilizzo di nuove tecnologie per il monitoraggio climatico, colturale e del suolo e su approfondite conoscenze tecniche a supporto del miglioramento della gestione sostenibile.

Il margine d'incremento produttivo di un piccolo agricoltore dipende dal miglioramento delle pratiche agricole e dall'uso del germoplasma adatto e/o migliorato al contesto pedoclimatico in cui ci si trova (Copper et al., 2009).

In linea generale le strategie di gestione riguardano:

- Il monitoraggio dei campi (sensori fissi, *proximal* e *remote sensing*)
- L'utilizzo di sistemi di supporto alle decisioni DSS
- Il miglioramento delle pratiche agricole
- Il miglioramento delle infrastrutture
- L'utilizzo di nuovi genotipi.

L'utilizzo di nuove tecnologie per il monitoraggio del suolo, della pianta e del clima ha avuto una forte espansione negli ultimi anni. L'importanza di tali sistemi è emersa recentemente dall'analisi Coldiretti su dati dell'Osservatorio Smart AgriFood nel 2020, che ha previsto l'estensione alla digitalizzazione aziendale del 10% nei prossimi due anni in tutto il territorio italiano. Nel 2018, un articolo dell'Osservatorio Politecnico di Milano (Politecnico di Milano, 2018), mostrava l'aumento delle società capaci di fornire sistemi di supporto all'agricoltura digitale in Italia (74% *brand* affermati e 26% *startup*) basati sull'uso di sensori di campo e/o misure telerilevate. Cosa molto interessante di tale articolo era che il 45% degli agricoltori intervistati affermavano di essere coscienti della rilevanza dei dati, ma non gli è ancora chiaro come valorizzarli. Un riscontro che supporta la tesi di molti autori che sottolineano che è vero che gli agricoltori hanno un accesso crescente a tecnologie di "precisione", mappatura della resa, indagini del suolo ad alta risoluzione e altri parametri di interesse spazialmente variabili (ad esempio, Bramley, 2009; Diacono et al., 2013), ma è anche vero che in molti casi essi non riescono ad agire in base alle informazioni fornite o non adottano mai tecnologie o pratiche con benefici di produzione documentati (Bramley and Trengove, 2013; Evans et al., 2017). Inoltre, nella vita reale, è anche noto che molti agricoltori non sono disposti a pagare i costi di installazione e manutenzione di questi sensori (Terribile et al., 2017).

Per ogni aspetto gestionale che si vuole monitorare e migliorare esistono diversi approcci e tecnologie coinvolte, di diversa complessità e costo, capaci di lavorare a scale spaziali differenti. Un esempio è la gestione dell'irrigazione per **ottimizzare l'uso della risorsa** idrica la quale può essere realizzata attraverso l'utilizzo di: sensori fissi (es. tensiometri), misure telerilevate (es. IRRISAT, D'Urso et al., 2013) od approcci modellistici fisicamente basati (Bonfante et al., 2019). La cosa importante da sottolineare è che ogni approccio ha dei pro e contro ed è sensibile al sistema pedoclimatico in cui viene adoperato.

Conclusioni

L'adattamento colturale al cambiamento climatico dipende fortemente dalla conoscenza del sistema nel quale si vuole garantire la resilienza nel tempo. Tale conoscenza consente di definire le giuste procedure applicative ottenute da prove scientifiche capaci di migliorare le azioni dell'uomo nel rispetto della sostenibilità ambientale e del reddito dell'agricoltore. Gli agroecosistemi sono sistemi complessi che necessitano per il loro studio il coinvolgimento di più comunità scientifiche e specifici *expertise*, pertanto gli approcci multidisciplinari sono da considerarsi la migliore opzione di difesa al cambiamento climatico (Fig. 6).

La tecnologia in campo è utile, probabilmente l'unico mezzo per affrontare le sfide future, ma vi sono limiti oggettivi nel suo utilizzo tal quale, per cui la sfida attuale è comprendere caso per caso, cosa sia veramente utile monitorare ed in che modo. In molti casi, l'informazione

collezionata da un sensore viene trasformata in un'azione richiesta all'agricoltore attraverso un approccio di tipo *black-box* che per sua natura non sempre si adatta al contesto applicativo, creando di fatto disillusione tra gli agricoltori che diventano sempre più scettici ad aprirsi al mondo della ricerca. Per tale motivo, un sforzo andrebbe realizzato nell'implementare le conoscenze sui meccanismi causa-effetto che possono migliorare il controllo e la modulazione della pianta in campo attraverso l'uso di tali nuove tecnologie (specifiche per ogni sistema colturale).

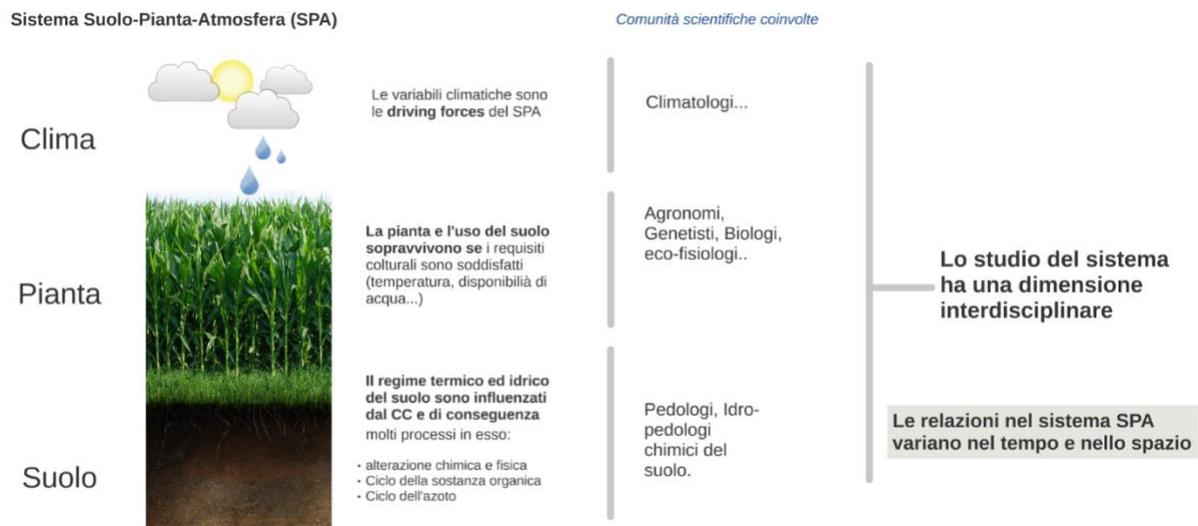


Figura 6. Schema illustrativo della necessità dell'approccio multidisciplinare allo studio dell'impatto dei cambiamenti climatici sugli agroecosistemi.

In conclusione, va sottolineata l'importanza dello sviluppo in agricoltura di nuove piattaforme di supporto alle decisioni (DSS), multi-scala e multi-source capaci d'implementare approcci di *planning* e di *management*. Un esempio in tal senso è il progetto H2020 LANDSUPPORT (www.landsupport.eu) che integra approcci empirici e modellistici di valutazione dell'adattamento colturale e sistemi di monitoraggio in remoto dei sistemi colturali a diversa scala.

Bibliografia

- Bakker, M.M., Govers, G., Ewert, F., Rounsevell, M., Jones, R., 2005. Variability in regional wheat yields as a function of climate, soil and economic variables: Assessing the risk of confounding. *Agric. Ecosyst. Environ.* 110, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.016>
- Basra, A., 2000. *Plant growth regulators in agriculture and horticulture: their role and commercial uses*. CRC Press.
- Battisti, D.S., Naylor, R.L., 2009. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science* (80-). 323, 240–244. <https://doi.org/10.1126/science.1164363>
- Bonfante A., Basile A., Langella G., Manna P., T.F., 2018. Soil science solutions for advancing SDG 2 towards resilient agriculture, in: Kosaki, E., R.L.R.H.T. (Ed.), *Soil and Sustainable Development Goals*. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany, p. 196.
- Bonfante, A., Basile, A., Bouma, J., 2020. Targeting the soil quality and soil health concepts when aiming for the United Nations Sustainable Development Goals and the EU Green Deal. *SOIL* 6. <https://doi.org/10.5194/soil-6-453-2020>
- Bonfante, A., Impagliazzo, A., Fiorentino, N., Langella, G., Mori, M., Fagnano, M., 2017a. Supporting local farming communities and crop production resilience to climate change through giant reed (*Arundo donax* L.) cultivation: An Italian case study. *Sci. Total Environ.* 601–602, 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.214>
- Bonfante, A., Monaco, E., Alfieri, S.M., De Lorenzi, F., Manna, P., Basile, A., Bouma, J., 2015. Climate change effects on the suitability of an agricultural area to maize cultivation: Application of a new hybrid land evaluation system. *Adv. Agron.* 133, 33–69. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.05.001>
- Bonfante, A., Monaco, E., Langella, G., Mercogliano, P., Bucchignani, E., Manna, P., Terribile, F., 2018. A dynamic viticultural zoning to explore the resilience of terroir concept under climate change. *Sci. Total Environ.* 624. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.035>

- Bonfante, A., Monaco, E., Manna, P., De Mascellis, R., Basile, A., Buonanno, M., Cantilena, G., Esposito, A., Tedeschi, A., De Michele, C., Belfiore, O., Catapano, I., Ludeno, G., Salinas, K., Brook, A., 2019. LCIS DSS—An irrigation supporting system for water use efficiency improvement in precision agriculture: A maize case study. *Agric. Syst.* 176. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102646>
- Bonfante, A., Sellami, M.H., Abi Saab, M.T., Albrizio, R., Basile, A., Fahed, S., Giorio, P., Langella, G., Monaco, E., Bouma, J., 2017b. The role of soils in the analysis of potential agricultural production: A case study in Lebanon. *Agric. Syst.* 156. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.018>
- Bramley, R., Trengove, S., 2013. Precision agriculture in australia: Present status and recent developments. *Eng. Agric.* 33, 575–588. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000300014>
- Bramley, R.G. V., 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop Pasture Sci.* 60, 197. <https://doi.org/10.1071/CP08304>
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A.L., Mercogliano, P., 2015. High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *Int. J. Climatol.* 36, 735–756.
- Challinor, A.J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., Fraser, E., 2009. Crops and climate change: Progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. *J. Exp. Bot.* 60, 2775–2789. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp062>
- Cooper, P and Rao, K P C and Singh, P and Dimes, J and Traore, P C S and Rao, K and Dixit, P and Twomlow, S J (2009) Farming with current and future climate risk: Advancing a 'Hypothesis of Hope' for rainfed agriculture in the semi-arid tropics. *Journal of SAT Agricultural Research*, 7. pp. 1-19. ISSN 0973-3094
- D'Urso, G., De Michele, C., Bolognesi, S.F., 2013. IRRISAT: the Italian On-line Satellite Irrigation Advisory Service. EFITA-WCCA-CIGR Conf. "Sustainable Agric. through ICT Innov. Turin, Italy.
- Diacono, M., Rubino, P., Montemurro, F., 2013. Precision nitrogen management of wheat. A review. *Agron. Sustain. Dev.* <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0111-z>
- Evans, K.J., Terhorst, A., Kang, B.H., 2017. From Data to Decisions: Helping Crop Producers Build Their Actionable Knowledge. *CRC Crit. Rev. Plant Sci.* 36, 71–88. <https://doi.org/10.1080/07352689.2017.1336047>
- Ewert, F., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Metzger, M.J., Leemans, R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use: I. Estimating changes in crop productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107, 101–116. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.12.003>
- GLADSTONES, J., 1992. Viticulture and environment, *Winetitles*.
- Gornall, J., Betts, R., Burke, E., Clark, R., Camp, J., Willett, K., Wiltshire, A., 2010. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. *Philos. Trans. R. Soc. B-Biological Sci.* 365, 2973–2989. <https://doi.org/DOI10.1098/rstb.2010.0158>
- Hawkins, E., Fricker, T.E., Challinor, A.J., Ferro, C.A.T., Ho, C.K., Osborne, T.M., 2013. Increasing influence of heat stress on French maize yields from the 1960s to the 2030s. *Glob. Chang. Biol.* 19, 937–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12069>
- Hood, A., Cechet, B., Hossain, H., Sheffield, K., 2006. Options for Victorian agriculture in a "new" climate: Pilot study linking climate change and land suitability modelling. *Environ. Model. Softw.* 21, 1280–1289. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.04.022>
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Kroes, J.G., Van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., Van Walsum, P.E. V., 2017. Theory description and user manual SWAP version 4. <http://www.swap.alterra.nl> Wageningen.
- Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N., Kaiser, H.M., 2011. The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agric. Syst.* 104, 348–353.
- Libro Bianco, 2011: Sfide ed opportunità dello sviluppo rurale per la mitigazione e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. L'agricoltura a beneficio di tutti. Rete Rurale Nazionale, pag. 1-316. <http://dspace.inea.it/handle/inea/590>
- Lobell, D.B., Burke, M.B., 2010. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agric. For. Meteorol.* 150, 1443–1452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.008>
- Lobell, D.B., Ortiz-Monasterio, J.I., 2007. Impacts of Day Versus Night Temperatures on Spring Wheat Yields: A Comparison of Empirical and CERES Model Predictions in Three Locations. *Agron. J.* 99, 469–477. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0209>
- Lobell, D.B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J., 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science (80-.)*. 333, 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>
- Mori, K., Sugaya, S., Gemma, H., 2005. Decreased anthocyanin biosynthesis in grape berries grown under elevated night temperature condition. *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 105, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.032>
- Prasad, P.V.V., Staggenborg, S. a., Ristic, Z., 2008. Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. Response Crop. to Ltd. Water Underst. Model. Water Stress Eff. Plant Growth Process. *Adv. Agric. Syst. Model. Ser.* 1. 301–356. <https://doi.org/10.2134/advagricsystemmodell.c11>
- Politecnico di Milano 2018, (<https://www.corrierecomunicazioni.it/digital-economy/boom-di-agricoltura-4-0-mercato-in-crescita-del-270/>)
- Porter, J. R. et al. in *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects (eds Field, C. B. et al.)* 485–533 (IPCC, Cambridge Univ. Press, 2014).
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289–307.
- Stone, P.J., Nicolas, M.E., 1995. Effect of timing of heat stress during grain filling on two wheat varieties differing in heat tolerance. I. Grain growth. *Aust. J. Plant Physiol.* 22, 927–934. <https://doi.org/10.1071/PP9950927>
- Terribile, F., Bonfante, A., D'Antonio, A., De Mascellis, R., De Michele, C., Langella, G., Manna, P., Mileti, F.A., Vingiani, S., Basile, A., 2017. A geospatial decision support system for supporting quality viticulture at the landscape scale. *Comput. Electron. Agric.* 140. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.028>
- Thornton, P.K., 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 365, 2853–2867. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0134>
- Tuan, N.T., Qiu, J. jun, Verdoodt, A., Li, H., Van Ranst, E., 2011. Temperature and Precipitation Suitability Evaluation for the Winter Wheat and Summer Maize Cropping System in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Agric. Sci. China* 10, 275–288. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(11\)60005-9](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(11)60005-9)
- Wheeler, T.R., Craufurd, P.Q., Ellis, R.H., Porter, J.R., Vara Prasad, P. V., 2000. Temperature variability and the yield of annual crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 82, 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00224-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00224-3)
- Zhang, X., Davidson, E.A., Mauzerall, D.L., Searchinger, T.D., Dumas, P., Shen, Y., 2015. Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature15743>

Tecnologie per la mitigazione e l'adattamento

Monarca D.

Università degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali – DAFNE, via S. Camillo De Lellis, 01100 Viterbo (VT)

Riassunto

La sfida del secolo è nutrire il pianeta con l'agricoltura in un contesto di mitigazione e di adattamento ai cambiamenti climatici: dovremo fronteggiare un aumento demografico che porterà la popolazione del pianeta a superare nei prossimi 30 anni i 9 miliardi di abitanti. I nuovi modelli alimentari porteranno alla necessità di produrre almeno il 50% in più di cibo, rendendo necessario aumentare le superfici arabili e le rese ad ettaro.

Nel lavoro sono dapprima descritti gli scenari mondiali nei prossimi anni legati alla crescita della domanda di energia, soprattutto da parte dei paesi emergenti dell'Asia. Sono poi analizzate le prospettive fornite per il settore agricolo e forestale del nostro paese dall'utilizzo delle energie rinnovabili, nelle sue diverse forme (solare, eolico, biomasse), e dalle tecnologie per la diffusione di idonei modelli di agricoltura sostenibile.

Abstract

The challenge of the century is to feed the planet with agriculture in a context of mitigation and adaptation to climate change: we will have to face a demographic increase that will lead the planet's population to exceed 9 billion inhabitants in the next 30 years.

The new dietary patterns will lead to the need to produce at least 50% more food, making it necessary to increase the arable land and the yield per hectare.

The paper first describes the world scenarios in the coming years related to the growth in energy demand, especially from emerging Asian countries.

The opportunities provided for the agricultural and forestry sector of our country by the use of renewable energy, in its various forms (solar, wind, biomass), and by technologies for the dissemination of suitable sustainable agriculture models are then analyzed.

Parole chiave: tecnologie, fonti energetiche rinnovabili, riscaldamento globale

Introduzione

La biosfera del pianeta ha subito e sta subendo una serie di trasformazioni a causa delle attività antropiche. Ad esse si cerca di ovviare attraverso la mitigazione e l'adattamento.

Per mitigazione si intendono gli interventi di natura antropica atti a limitare o controllare le emissioni di gas serra, mentre per adattamento la capacità dei sistemi naturali o antropici di adattarsi per rispondere ai cambiamenti climatici, reali o previsti, e ai loro effetti.

Le strategie di mitigazione e adattamento affrontano una vasta gamma di argomenti ambientali e questioni drammaticamente urgenti, tra cui processi globali di cambiamento climatico e gli effetti sugli ecosistemi terrestri e acquatici, l'estinzione di specie e la perdita di diversità biologica, la deforestazione ed il degrado delle foreste, la desertificazione e degradazione delle risorse del suolo. Il riscaldamento globale comporterà come conseguenza l'innalzamento del livello del mare e la distruzione delle zone costiere, l'impoverimento delle acque dolci e marine, la perdita delle zone umide e delle zone rivierasche e la gestione dei rifiuti pericolosi. Sono quindi necessarie opzioni di risposta per attenuare queste minacce o adattarsi ai cambiamenti per garantire una biosfera sostenibile per tutte le forme di vita.

Il nostro pianeta oggi si trova ad affrontare sfide straordinarie; tra quelle principali, sono sicuramente da includere:

- la necessità di sfamare tutti gli abitanti del mondo, oltre 9 miliardi di persone previste nel 2050 (Fig. 1);
- la necessità di preservare l'ambiente e la vita sul pianeta.

L'aspettativa di vita media globale è in aumento, mentre i tassi di fertilità mostrano una diminuzione limitata, soprattutto nei paesi ad alta fertilità. L'agricoltura deve trovare il modo di superare i vincoli economici e di aumentare drasticamente la produttività e l'efficienza.

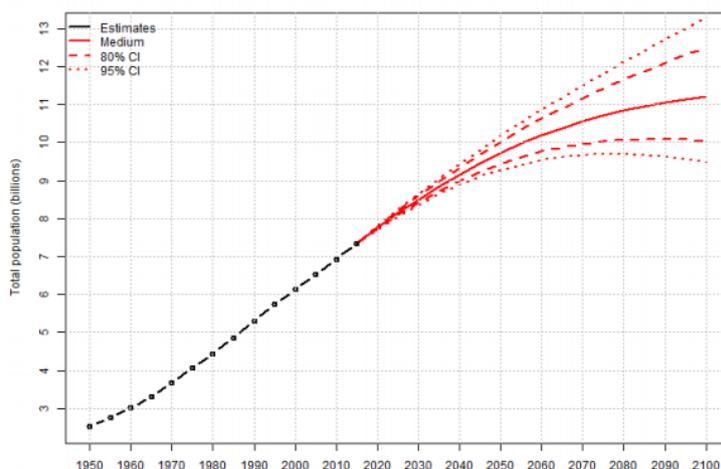


Figura 1 - Popolazione del mondo: stime, 1950-2015, valori medi e intervalli di confidenza tra l'80 e il 95 per cento, 2015-2100 (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015. World Population Prospects: The 2015 Revision. New York: United Nations)

La produzione mondiale agricola si stima debba crescere di circa il 50 per cento da oggi al 2050. Certamente l'agricoltura è uno degli strumenti chiave per nutrire il pianeta e riequilibrare l'uso e la rigenerazione delle risorse. Oltre all'aumento demografico ci sono altri aspetti di cui tenere conto:

- Il cambio delle abitudini alimentari, che porta i paesi emergenti ad avvicinarsi in qualità e quantità ai modelli occidentali (es. il consumo di carne);
- L'urbanizzazione, oggi circa il 50% della popolazione mondiale vive in città, tale percentuale si stima si attesterà al 70% a metà secolo;
- la popolazione denutrita, che si attesta (secondo la FAO) in circa 840 milioni di persone, i tre quarti dei quali vivono nelle aree rurali dei paesi poveri.

A livello globale, la maggior parte degli agricoltori sono piccoli proprietari terrieri. Le piccole aziende producono l'80% del cibo nei paesi in via di sviluppo, ma la maggior parte di loro usano utensili manuali e hanno poco accesso a fonti di energia. Inoltre la applicazione di input, come sementi e fertilizzanti, è raramente disponibile e spesso imprecisa.

Aumentare la produzione di cibo significa aumentare la produttività delle terre arabili e soprattutto aumentare la superficie delle terre arabili. Con la "Rivoluzione Verde" abbiamo avuto in termini produttivi un indubbio incremento, che ha portato la popolazione denutrita a scendere dal 26% al 14% ad esempio dal 1969 al 2002. Ma al contempo abbiamo sperimentato una serie di effetti collaterali inevitabili: inquinamento, efficienza ridotta, perdita di salute ed erosione del suolo.

Oggi si deve invece puntare su un altro approccio, quello della intensificazione sostenibile, in cui si mira a rafforzare gli ecosistemi e processi naturali per incrementare la

produzione e servizi ambientali, evitando gli sprechi, utilizzando solo gli input richiesti dal sistema.

Il crescente fabbisogno di energia

Di fronte a questa esigenza crescente di cibo, il pianeta deve fronteggiare anche un'altra sfida, quella di far fronte alla crescente domanda di energia del pianeta. Le stime più recenti confermano una crescita del consumo di energia primaria (Fonte: IEA, World Energy Outlook 2017), ma con alcuni grandi cambiamenti che si stanno imponendo nel sistema energetico globale:

- il rapido dispiegamento e la riduzione dei costi delle tecnologie per l'energia pulita,
- la crescente elettrificazione dell'energia,
- il mix tra il passaggio a un'economia più orientata ai servizi e un'energia più pulita in Cina;
- la resilienza del gas di scisto e del tight oil negli Stati Uniti.

Questi cambiamenti avvengono in un momento in cui le tradizionali distinzioni tra produttori di energia e consumatori si stanno attenuando e un nuovo gruppo di grandi paesi in via di sviluppo, guidato dall'India, si muove verso il centro della scena.

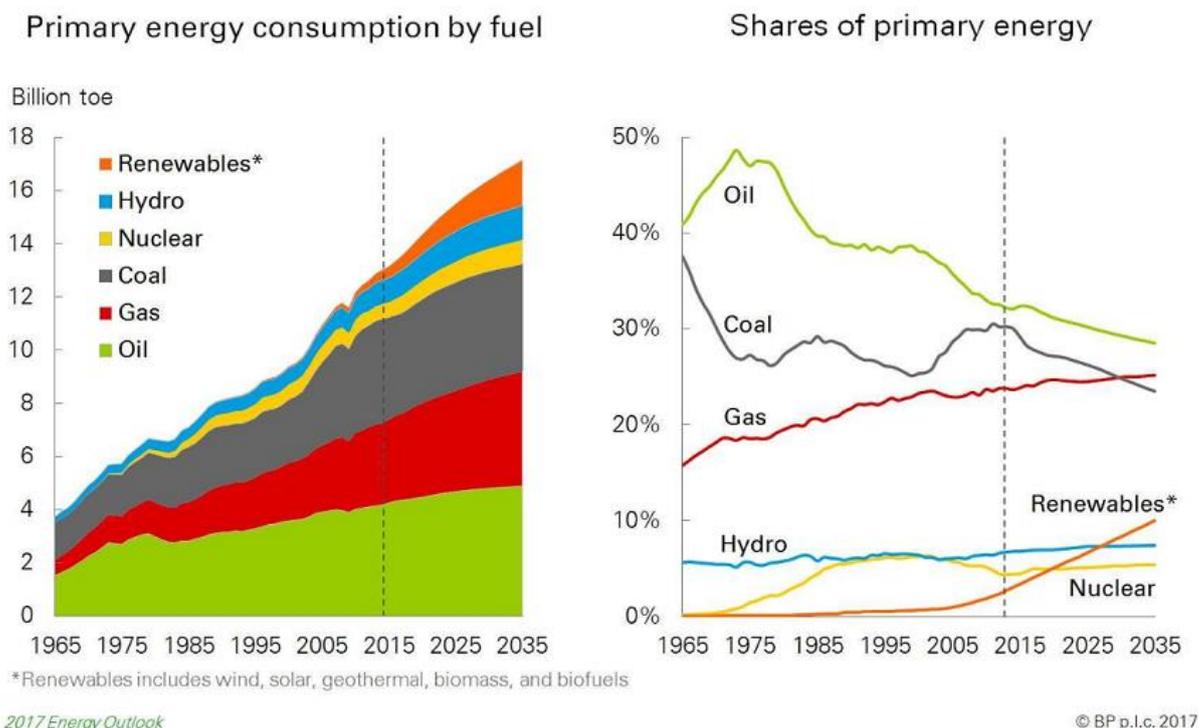


Figura 2 - Stima dei consumi di energia nel periodo 1965-2035, per fonte energetica (Fonti: IEA, World Energy Outlook 2017, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>, BP, Energy Outlook, 2017 edition).

I consumi di energia si porteranno nel giro di 15 anni a sfiorare i 18 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio. È previsto anche un aumento della quota di energie rinnovabili, che nello stesso periodo supereranno la quota del 10% (idroelettrico escluso) (Fig. 2).



Figura 3 – Richiesta di energia primaria nel 2035, distribuzione della crescita nel mondo (Fonte: BP, Energy Outlook, 2017 edition).

In Figura 3 è riportata la stima della distribuzione della richiesta di energia riferita al 2035. È evidente la crescita dei paesi asiatici, Cina ed India e Asia Sud-Orientale. I consumi di energia della Cina supereranno Stati Uniti ed Europa messi insieme. Il 65% della crescita della domanda energetica è da imputare ai paesi asiatici non appartenenti all'OECD.

Il riscaldamento globale e le politiche per il contenimento

Il quadro descritto evidenzia come nel prossimo futuro lo sviluppo economico del pianeta si baserà ancora per la maggior parte sui combustibili convenzionali, principali artefici delle emissioni di gas serra e conseguentemente del riscaldamento del pianeta.

Purtroppo la mancanza di comuni politiche energetiche tra i paesi Europei, che da tempo si sono incamminate verso misure comunitarie che mirano alla promozione delle rinnovabili, e la maggior parte degli altri paesi, asiatici ed americani, ci proiettano verso scenari drammatici.

Il riscaldamento del pianeta, secondo gli studiosi dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dell'ONU, a fine secolo si attesterà ad incrementi di +1,5-2 °C negli scenari più ottimistici, frutto di comportamenti "virtuosi", sino a + 4-5 °C se le nazioni continueranno a perseguire le attuali scellerate politiche energetiche (vedi Figura 4, i valori di base si riferiscono alla media del periodo 1986-2005).

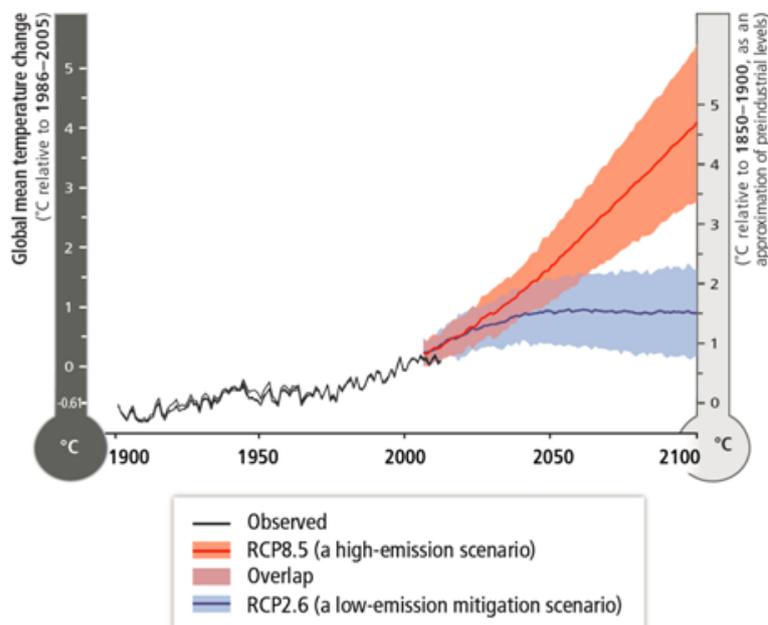


Figura 4 – Aumento della temperatura del pianeta in base ai diversi scenari
(Fonte: IPCC, AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014).

È evidente come uno scenario basato su basse emissioni possa, pur nella sua gravità, essere bilanciato da opportune misure di mitigazione e adattamento. Un aumento di 4-5 °C della temperatura media del pianeta ci porterebbe ad uno scenario quasi apocalittico, con una serie di effetti sul nostro ecosistema, tra i quali:

- lo scioglimento dei ghiacci artici e conseguente innalzamento del livello marino;
- la scomparsa della barriera corallina, un fondamentale ecosistema marino, che ospita circa un quarto delle specie che vivono nell'oceano e che significherebbe la perdita anche di un'enorme fetta di biodiversità;
- gli effetti sul clima, con fenomeni sempre più estremi, violenti ed imprevedibili, ondate di calore e desertificazione di molte parti del pianeta.

Il riscaldamento del pianeta porterà danni incalcolabili alla economia mondiale, e soprattutto alle produzioni agricole. Mentre la popolazione mondiale cresce, c'è il rischio che diminuiscano le terre produttive e le rese delle coltivazioni.

Per capire le ragioni dell'uso dei combustibili fossili, la principale causa dei gas serra, bisogna comprendere i motivi per cui i paesi Asiatici oggi puntano soprattutto su di esse per la loro crescita (Fig. 5). I combustibili fossili sono facili da stoccare, trasportare ed utilizzare, grazie al loro alto contenuto energetico (il potere calorifico inferiore del petrolio greggio è di circa 42 MJ/kg). La loro estrazione è ancora economicamente sostenibile, con buona pace della teoria di Hubbert e delle note previsioni del Club di Roma (Meadows et al., 1972) e permette un rapido sviluppo delle economie emergenti. Inoltre, per il settore dei trasporti e per l'agricoltura, rappresentano ancora la fonte di carburanti più utilizzata.

Le tecnologie basate sullo sfruttamento delle fonti rinnovabili sono però oramai mature, ed i buoni risultati già raggiunti in Europa dimostrano come siano possibili politiche energetiche più sostenibili, non soggette ad esaurimento e anche più indipendenti da fonti estere.

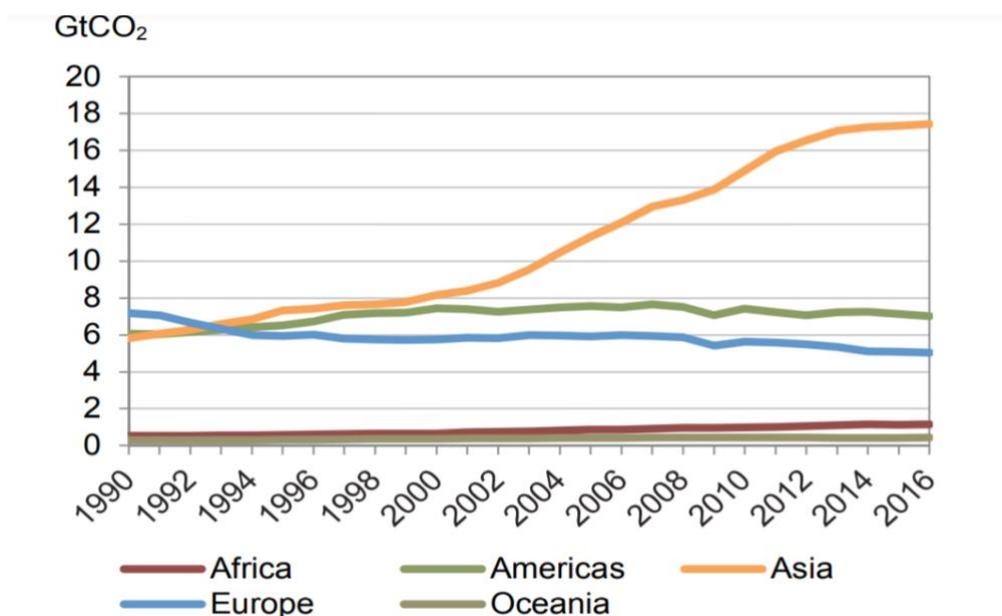


Figura 5 – Emissioni di CO2 da combustibili fossili per regione
(Fonte: International Energy Agency)

Il 13 dicembre 2015 a Parigi la Comunità internazionale ha concluso un accordo universale e legalmente vincolante per la lotta ai cambiamenti climatici che rompe la “tradizionale” distinzione tra paesi di storica industrializzazione e Paesi in via di sviluppo. Esso richiede a tutti i paesi, incluse le economie emergenti, impegni nel quadro di una cornice duratura per il raggiungimento della neutralità carbonica entro il secolo.

L'accordo di Parigi mira al contenimento della temperatura entro i 2°C (aspirando però al contenimento entro 1,5°C), al rafforzamento delle capacità di adattamento ed alla conseguente attivazione di coerenti flussi finanziari. Esso supera l'impianto del Protocollo di Kyoto e, nel tempo, costituirà il nuovo regime giuridico internazionale per l'attuazione della Convenzione quadro ONU sul Clima e delle azioni di lotta e adattamento al cambiamento climatico. L'Accordo regolerà la cooperazione multilaterale in ambito climatico sulla base di nuovi principi, consolidati a partire da Copenaghen, tra cui un approccio bottom up agli impegni, l'universalità della partecipazione alle azioni di mitigazione e principio del non arretramento rispetto agli impegni già assunti (il cosiddetto “no backsliding”) che sarà garantito da periodiche sessioni di valutazione da parte della Comunità Internazionale sulla distanza dall'obiettivo climatico.

Le regole che il mondo si è dato per rendere operativo l'Accordo di Parigi, però, non sembrano particolarmente ambiziose. Sono 196 i governi che hanno partecipato alla COP 24 di Katowice, la Conferenza delle Nazioni Unite sul *Climate Change*. Le misure adottate da molti paesi lasciano dubitare che possano consentire di centrare il principale obiettivo dell'intesa raggiunta nel 2015 nella capitale francese, ovvero limitare la crescita della temperatura media globale, entro la fine del secolo, ad un massimo di 2 gradi centigradi. Di passi in avanti ne sono stati fatti pochi. E il nodo delle promesse di riduzione delle emissioni di CO₂ (i cosiddetti *Indc*, *Intended Nationally Determined Contributions*) non è ancora stato risolto.

Certamente diverso è l'approccio UE, dapprima con il pacchetto clima energia 20-20-20, poi con il Quadro 2030 per il clima e l'energia. Gli obiettivi del Quadro 2030 prevedono:

- una riduzione almeno del 40% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990);
- una quota almeno del 32% di energia rinnovabile;
- un miglioramento almeno del 32,5% dell'efficienza energetica.

L'obiettivo della riduzione del 40% dei gas serra è attuato mediante il sistema di scambio di quote di emissione dell'UE, il regolamento sulla condivisione degli sforzi con gli obiettivi di riduzione delle emissioni degli Stati membri, e il regolamento sull'uso del suolo, il cambiamento di uso del suolo e la silvicoltura. In tal modo tutti i settori contribuiranno al conseguimento dell'obiettivo del 40% riducendo le emissioni e aumentando gli assorbimenti.

Resta la convinzione che anche questi risultati non siano sufficienti a contenere il riscaldamento globale. L'Unione Europea vuole rappresentare un esempio di sviluppo, declinando concetti come sostenibilità ed economia circolare purtroppo non condivisi dal resto del pianeta.

Il 28 novembre 2018 la Commissione Europea ha presentato la sua visione strategica a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra, propugnando un'Europa a impatto climatico zero entro il 2050 (Fig. 6).

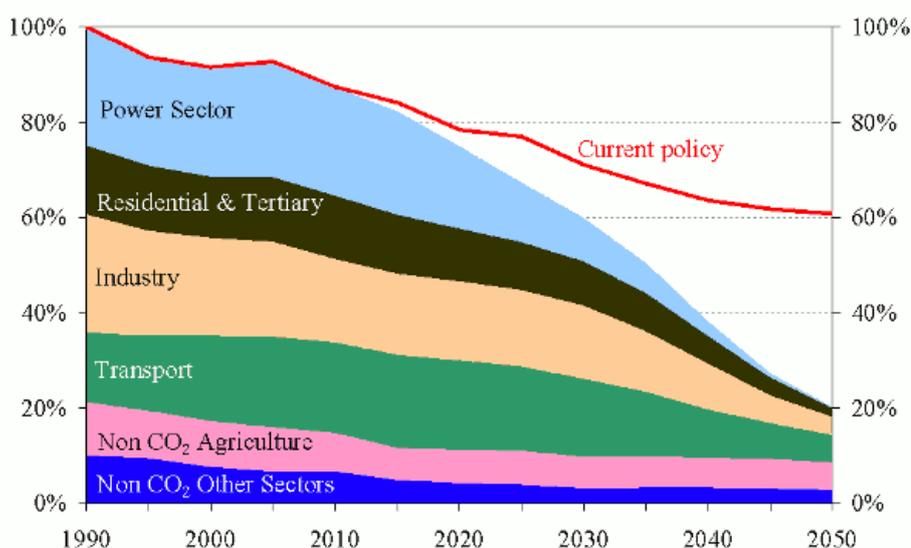


Figura 6 – Economia Low Carbon 2050
(Fonte: COM/2018/773 final)

La strategia evidenzia come l'Europa possa avere un ruolo guida per conseguire un impatto climatico zero, investendo in soluzioni tecnologiche realistiche, coinvolgendo i cittadini e armonizzando gli interventi in settori fondamentali, quali la politica industriale, la finanza o la ricerca - garantendo nel contempo equità sociale per una transizione giusta. Facendo seguito agli inviti formulati dal Parlamento europeo e dal Consiglio europeo, la visione della Commissione per un futuro a impatto climatico zero interessa quasi tutte le politiche dell'UE ed è in linea con l'obiettivo dell'accordo di Parigi di mantenere l'aumento della temperatura mondiale ben al di sotto i 2°C e di proseguire gli sforzi per mantenere tale valore a 1,5°C.

Il ruolo delle tecnologie

L'Italia sta facendo il suo dovere, soprattutto nella promozione delle energie rinnovabili. Molti degli obiettivi previsti dalle politiche Europee per il 2030 sono già stati raggiunti, in particolare per il settore del fotovoltaico e del biogas, così come molti interventi nel campo del contenimento dei consumi energetici e della promozione di motori alimentati con carburanti non convenzionali (ibridi ed elettrici).

L'energia solare e fotovoltaico

L'energia solare è l'energia associata alla radiazione solare e rappresenta la fonte primaria di energia sulla Terra. Da questa energia derivano più o meno direttamente quasi tutte le altre fonti energetiche disponibili all'uomo (combustibili fossili, energia eolica, energia del moto ondoso, energia idroelettrica, energia da biomassa).

La quantità di energia che il sole irraggia su un m² di superficie terrestre è detta costante solare, questa è pari a 1.365 W/m², anche se questo valore è soggetto a variazioni (Fig. 7) in funzione dell'alternanza delle stagioni, che porta l'emisfero Boreale (emisfero in cui ricade la superficie Europea) ad essere più distante dal Sole nei mesi estivi e, più vicini al Sole nei mesi invernali.

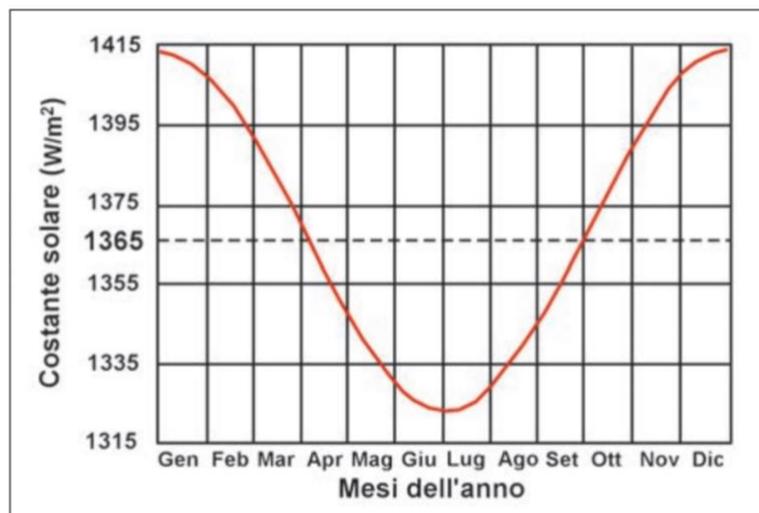


Figura 7 – Andamento annuale della costante solare nell'emisfero Boreale

L'energia solare può essere utilizzata per generare elettricità (tramite pannello fotovoltaico, termoelettrico a effetto *Seebeck*) o per generare calore (solare termico, operante quindi nel settore termico).

La tecnologia fotovoltaica si basa sulla conversione diretta dell'energia irradiata dal Sole in energia elettrica. Quando la radiazione solare investe un qualsiasi materiale, cede energia agli elettroni più esterni degli atomi che lo costituiscono; se tale energia è sufficiente, l'elettrone portatore di carica negativa risulta libero di allontanarsi dall'atomo di origine, dando luogo alla formazione di una lacuna. Al fine di generare tale corrente è necessario creare un campo elettrico interno al materiale, ciò è ottenuto stabilendo un eccesso di atomi caricati

negativamente (anioni) in una parte del semiconduttore e un eccesso di atomi caricati positivamente (cationi) nell'altro.

In Italia alla fine del 2016 risultano installati 732.053 impianti fotovoltaici, cui corrisponde una potenza pari a 19.283 MW (Fig. 8). La Lombardia risulta la maggiore produttrice di energia da impianti fotovoltaici, con un numero di installazioni pari a 109.108, che erogano una potenza complessiva di 2.178 MW.

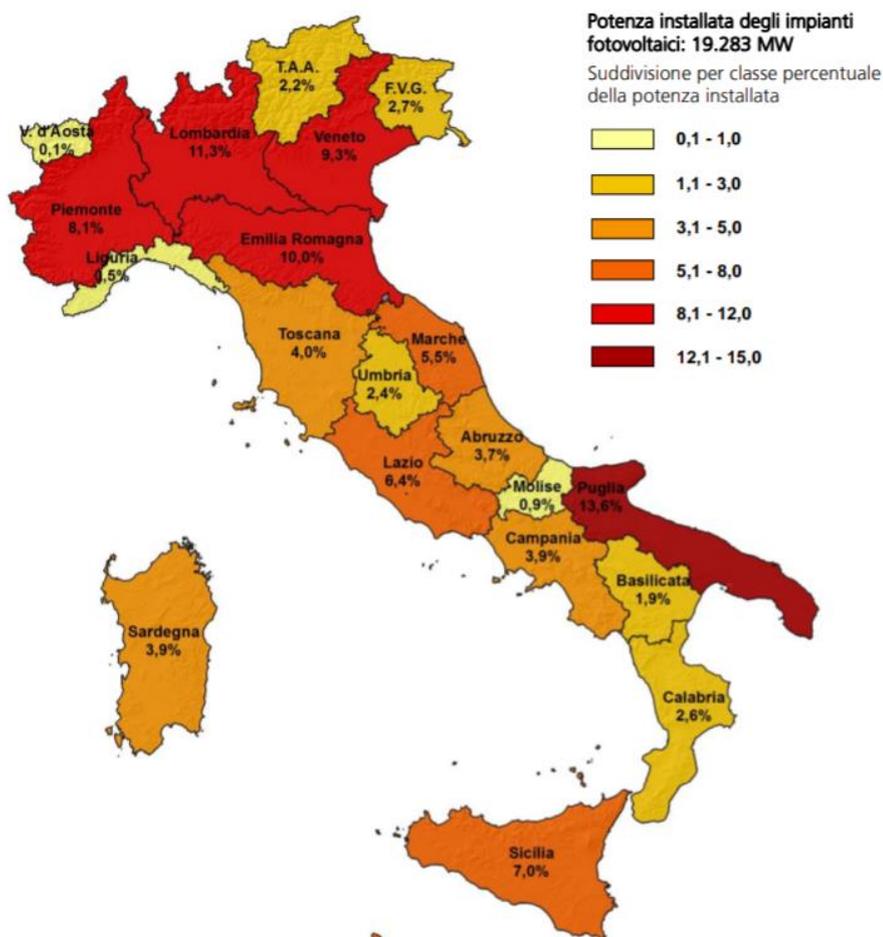


Figura 8 – Potenza (espressa in MW) installata degli impianti fotovoltaici nelle varie regioni (GSE, 2016)

Con le tecnologie ad oggi utilizzate nel campo delle energie prodotte da pannelli fotovoltaici, tramite dei calcoli è possibile dedurre che l'Italia potrebbe divenire autosufficiente per ciò che concerne l'energia prodotta, impiantando circa 230 mila ettari di superficie territoriale di pannelli fotovoltaici (prendendo come esempio un impianto da 1.000 MWp, occupante una superficie compresa tra gli 800 e i 900 ettari, che produce circa 1.000 GWh/anno). Anche se si riuscisse a ricoprire ampie superfici con i sistemi fotovoltaici bisognerebbe affrontare diversi problemi come la conservazione dell'energia, dato che in questo settore (come in altre fonti rinnovabili), permane l'impossibilità di programmazione e l'intermittenza dell'approvvigionamento energetico date dalle condizioni meteorologiche e dai moti che subisce la terra (rotazione, rivoluzione e traslazione).

Il vento e l'energia eolica

La tecnologia attualmente disponibile atta allo sfruttamento delle energie prodotte dal vento è rappresentata dalle turbine eoliche. Tutti gli aerogeneratori sfruttano l'energia eolica, questa è l'energia che si ottiene dal vento e che viene trasmessa sotto forma cinetica dalle correnti d'aria, convertita ed utilizzata in altre energie come l'elettrica o la meccanica. Oggi viene per lo più convertita in energia elettrica tramite una centrale eolica. L'elettricità viene prodotta per mezzo di un aerogeneratore accoppiato a una turbina che solitamente viene posta su un asse e messa in rotazione da pale; per assicurare un rendimento ottimale le turbine eoliche vengono installate di preferenza in zone aperte o su rilievi collinari o montuosi, e comunque in luoghi ove siano garantite adeguate condizioni di vento. Nella maggior parte dei casi gli aerogeneratori vengono collocati in gruppo dando vita ai cosiddetti "parchi eolici", per poter sfruttare vaste aree dalle condizioni particolarmente favorevoli e costituire nuclei apprezzabili di produzione elettrica da collegare alla rete di distribuzione.

Le macchine destinate alla produzione di elettricità sono le macchine rapide che offrono un buon rendimento (circa il 70%) e hanno due o tre pale a forma di ala di aeroplano per assicurare la portanza che genererà la coppia di rotazione. Negli aerogeneratori ad asse orizzontale la direzione del vento è parallela all'asse del rotore mentre in quelli ad asse verticale l'asse del rotore è perpendicolare al terreno e alla direzione del vento. L'aerogeneratore ad asse orizzontale è formato da una torre in acciaio di altezza tra i 60 e i 100 metri sulla cui sommità si trova un involucro (gondola) che contiene un generatore elettrico azionato da un rotore a pale lunghe tra i 20 e i 60 metri (solitamente 3, quasi mai 2, raramente 1). Esso genera una potenza molto variabile, che può andare da pochi kW fino a 5-6 MW, in funzione della ventosità del luogo e del tempo.

Il principale aspetto negativo degli impianti eolici è dato dal problema dell'intermittenza o variabilità aleatoria della fonte di energia, in questo caso il vento, il quale comporta che il settore eolico non possa sostituire completamente le fonti tradizionali, quali i combustibili fossili o l'energia idroelettrica, per i quali la potenza erogata è invece costante o direttamente controllabile in base alle esigenze. Tale fonte di energia trova quindi il suo ambito applicativo principalmente nell'integrazione alle reti esistenti, affiancata a impianti programmabili per soddisfare la necessità di potenza di picco ad ogni istante durante il giorno.

Gli impianti eolici presenti in Italia a fine 2016 sono 3.598, per una potenza efficiente lorda di 9.410 MW. Nel corso del 2016 la produzione da fonte eolica è stata pari a 17.689 GWh, corrispondente al 16,4% della produzione elettrica totale da fonti rinnovabili. Per la costruzione e il funzionamento degli impianti eolici hanno particolare rilevanza alcune caratteristiche ambientali e territoriali dei siti quali la ventosità, l'orografia, l'accessibilità. Per tali ragioni, nel Sud Italia risulta installato il 96,7% della potenza eolica nazionale e l'89,1% del parco impianti in termini di numerosità (Fig. 9).

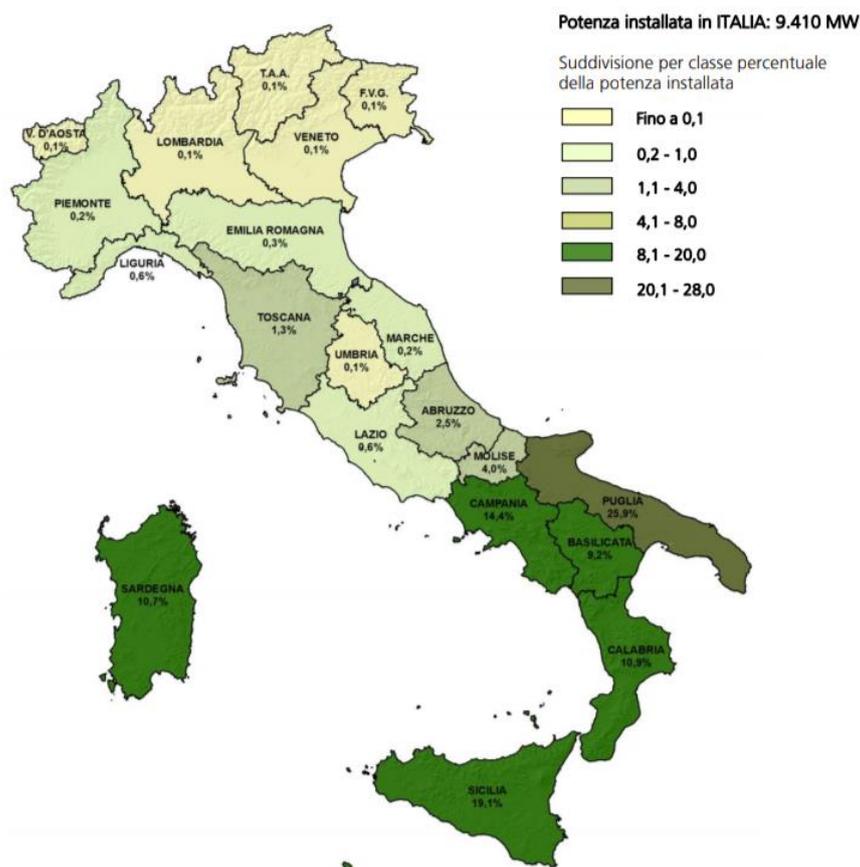


Figura 9 – Potenza eolica Italiana (espressa in MW) suddivisa nelle varie regioni (GSE,2016)

La regione con la maggiore potenza installata è la Puglia, con 2.440,9 MW; seguono Sicilia e Campania, rispettivamente con 1.795,2 MW e 1.350,6 MW.

L'energia idroelettrica

L'energia idroelettrica è una fonte di energia alternativa e rinnovabile, che sfrutta la trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale, contenuta in una certa massa d'acqua ad una certa quota altimetrica, in energia cinetica; tale energia cinetica viene infine trasformata in energia elettrica in una centrale idroelettrica grazie ad un alternatore accoppiato ad una turbina.

La classificazione degli impianti avviene convenzionalmente in base alla potenza installata: avremo quindi i grandi impianti (potenza maggiore di 10.000 kW), piccoli impianti (potenza compresa tra 1.000 e 10.000 kW), mini impianti (potenza compresa tra i 100 e i 1.000 kW) ed infine i micro-impianti (potenza inferiore ai 100 kW).

Una ulteriore distinzione tra le centrali idroelettriche è stilata in base alla diversa tipologia, avremo le centrali ad acqua fluente, le centrali a bacino e le centrali ad accumulo a mezzo pompaggio.

Le centrali ad acqua fluente sono posizionate sui corsi d'acqua, questi impianti non dispongono di alcuna capacità di regolazione degli afflussi, per cui la portata sfruttata coincide con quella disponibile nel corso d'acqua (a meno di una quota detta deflusso minimo vitale, necessaria per salvaguardare l'ecosistema); quindi la turbina produce energia con modi e tempi

totalmente dipendenti dalla disponibilità del corso d'acqua: se il corso d'acqua è in magra e si scende sotto un livello minimo di portata, cessa la produzione di energia elettrica.

Gli impianti idroelettrici a bacino (Fig. 10) si basano invece sull'utilizzo di un bacino idrico (serbatoio). Questo può essere di origine naturale (come i laghi) o artificiale, talvolta, per incrementare la portata dei bacini naturali, si prevede la creazione di sbarramenti (dighe). L'acqua, prelevata dal bacino, viene convogliata attraverso delle condotte forzate alle turbine idrauliche che ruotando generano energia elettrica. A differenza dei precedenti sistemi ad acqua fluente, gli impianti idroelettrici a bacino permettono di avere un controllo sui flussi d'acqua, riuscendo così a regolarne il deflusso in base alle esigenze in determinate ore della giornata o in determinati periodi dell'anno, proprio per questo motivo sono conosciuti anche come impianti idroelettrici a deflusso regolato.

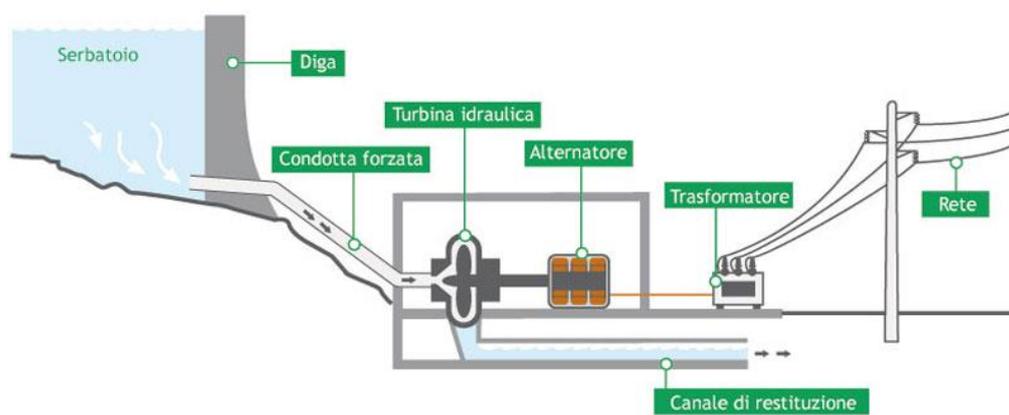


Figura 10– Schema centrale idroelettrica a bacino

La produzione di energia idroelettrica non provoca emissioni gassose o liquide che possano inquinare l'aria o l'acqua. Gli impianti mini-idroelettrici in molti casi, con la sistemazione idraulica che viene eseguita per la loro realizzazione, portano invece notevoli benefici al corso d'acqua (in particolare la regolazione e regimentazione delle piene sui corpi idrici torrentizi, specie in aree montane ove esista degrado e dissesto del suolo e, quindi, possono contribuire efficacemente alla difesa e salvaguardia del territorio). I grandi impianti idroelettrici a bacino possono presentare qualche problema in più dal punto di vista dell'inserimento ambientale e necessitano quindi di opportune valutazioni di impatto ambientale, tese a garantire l'assenza di interferenze con l'ambiente naturale.

Nel corso del 2016 la produzione di energia da fonte idraulica in Italia è risultata pari a 42.432 GWh, pari al 39% della produzione totale da fonti rinnovabili, affermandosi quindi la prima fonte di energia rinnovabile per ciò che concerne la produzione. Gli impianti contati su territorio italiano ammontano a 3.920: di questi, la maggioranza rientra nella categoria di impianti di piccole dimensioni (2.740 impianti con potenza inferiore ad 1 MW). La maggior parte degli impianti è localizzata nelle regioni settentrionali e, in particolar modo in Piemonte (820 impianti), in Trentino Alto Adige (765) e in Lombardia (594), le stesse regioni registrano di conseguenza la maggior concentrazione della potenza: rispettivamente 2.720 MW in Piemonte, 3.297 MW in Trentino Alto Adige, e 5.096 MW in Lombardia (Fig. 11).

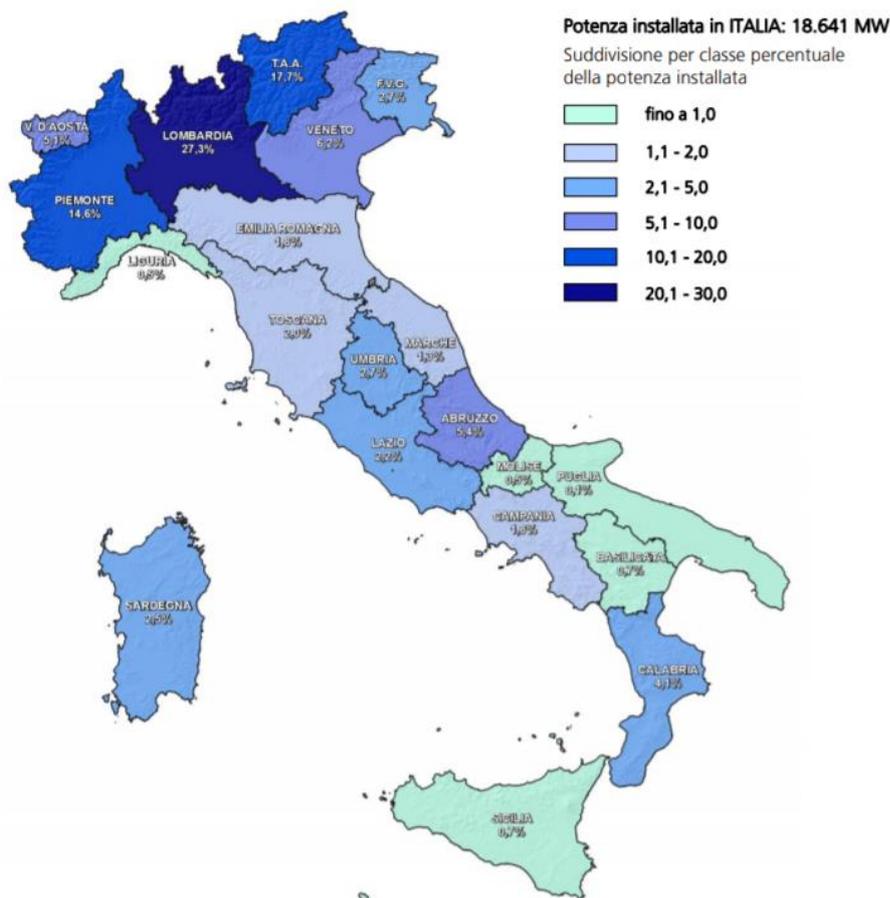


Figura 11 – Potenza (espressa in MW) ottenuta da impianti idroelettrici nel 2016 (GSE)

Energia da biomasse

Le biomasse, secondo il D.Lgs. 28/2011 nell'articolo 2 lettera e), sono: “le frazioni biodegradabili dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani” (Fig. 12). In questa definizione quindi rientra una enorme quantità di materiali, molto differenti tra loro, ma tutti aventi in comune una matrice di origine organica. Una biomassa può essere classificata secondo vari aspetti:

-si distingue una biomassa dedicata, nel caso in cui la biomassa viene costituita prettamente per scopi energetici, e una biomassa residuale, nel caso in cui la biomassa ottenuta proviene da processi diversi dalla precedente;

-si distingue una biomassa solida, una biomassa liquida e una biomassa gassosa;

-si distingue una biomassa in base alla matrice organica preponderante (come matrice lignocellulosica, matrice amidacea-zuccherina o alcooligena, matrice oleaginosa, matrice zootecnica).

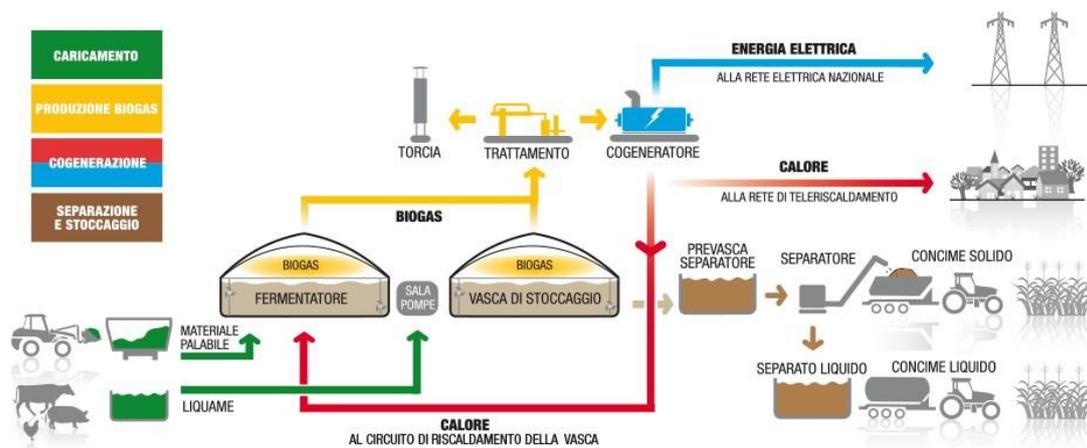


Figura 12 – Filiera di una matrice per la produzione di biogas

Nel settore delle biomasse in Italia si è registrato un notevole successo nel settore degli impianti a biogas. Aziende zootecniche con oltre 300 ettari a colture (mais, sorgo, triticale) e con presenza di almeno 500 capi sono quelle che se ne sono maggiormente avvantaggiate. Il comparto ha registrato dal 2008 a oggi investimenti per circa 4,5 miliardi di euro consentendo all'Italia di raggiungere la leadership europea del numero degli impianti con 1.600. La attuale politica di incentivi scoraggia però la realizzazione di nuovi impianti, ad esclusione di quelli per la riconversione a produzione di biometano.

Un settore molto investigato e promettente è quello relativo al recupero delle biomasse residuali. Dalle potature ad esempio è possibile ottenere sino a 1,5-2 tonnellate all'anno di biomasse (nocciolo, olivo), corrispondente a circa 500-600 kg_{ep}. Il raggiungimento della *parity* per questo tipo di impianti non è semplice, ma si avrebbero indubbi benefici sia a livello ambientale (oggi i residui sono per lo più bruciati a bordo campo) che occupazionale, per il notevole impiego di manodopera per il recupero ed il primo trattamento delle biomasse ritraibili.

Il limite principale è la loro disponibilità, estesa nel dominio dello spazio e concentrata nel dominio del tempo, per cui la loro utilizzazione passa attraverso soluzioni a livello di comprensorio più che aziendale, che richiedono pertanto specifiche politiche di incentivazione ed interventi a livello territoriale.

Agricoltura di precisione e nuovi modelli di meccanizzazione

La sostenibilità passa infine anche attraverso un nuovo modello di agricoltura, in grado di combinare redditività delle imprese e rispetto dell'ambiente. Ad esempio si stanno affermando, grazie a forme innovative di meccanizzazione, le lavorazioni non convenzionali, che ottimizzano l'uso delle risorse, contribuendo a ridurre il degrado del terreno attraverso la gestione integrata del suolo, dell'acqua e delle risorse biologiche, riducendo gli input esterni, come quelle mostrate in Figura 13.



Figura 13 – Macchine per la semina diretta

L'adozione di pratiche agronomiche conservative, sfruttando a proprio vantaggio i processi naturali utili alla produzione, prevede il minimo disturbo meccanico del suolo e una copertura permanente, integrate da avvicendamenti culturali.

Le macchine del futuro si avvantaggeranno anche di nuovi motori: i motori elettrici ed a idrogeno sembrano oggi le tecnologie più promettenti.

Un'altra sfida riguarda l'adozione dell'agricoltura di precisione, declinata in tutte le sue varie sfaccettature: irrigazione di precisione, fertilizzazione di precisione, trattamenti fitosanitari di precisione, con l'obiettivo di ridurre e razionalizzare i diversi input produttivi, in base alle effettive esigenze delle colture.

Conclusioni

La sfida del secolo è nutrire il pianeta con l'agricoltura in un contesto di mitigazione e di adattamento ai cambiamenti climatici: dovremo fronteggiare un aumento demografico che porterà la popolazione del pianeta a superare nei prossimi 30 anni i 9 miliardi di abitanti, con concentrazione nelle metropoli ed abbandono dei piccoli centri e dei territori rurali. I nuovi modelli alimentari per i paesi in crescita porteranno alla necessità di produrre almeno il 50% in più di cibo. Si rende necessario aumentare le superfici arabili e le rese ad ettaro, se vogliamo raggiungere questo obiettivo.

Al contempo, nonostante lo sforzo dell'Europa e delle nazioni più attente al futuro del pianeta, la terra continuerà a riscaldarsi, e gli effetti sugli ecosistemi diventeranno sempre più drammatici, se non si porranno in essere delle drastiche politiche energetiche per l'abbattimento dei gas serra.

In questo contesto, i settori delle bioscienze, e tra essi quello dell'Ingegneria dei biosistemi, sono chiamati a svolgere un ruolo importante, sia nei Paesi emergenti che nei Paesi più sviluppati.

Per i Paesi emergenti, è necessario contribuire alla crescita economica delle aziende e dei Paesi, introducendo modelli sostenibili di agricoltura e di meccanizzazione, in grado di ottimizzare il lavoro dell'uomo ed accrescerne la produttività. Per i paesi più sviluppati l'agricoltura deve combinare competitività, sostenibilità e qualità delle produzioni. Il tutto guardando anche alla necessità di adattarsi ai cambiamenti climatici e al riscaldamento globale.

Le attuali linee di ricerca dei nostri settori trattano oggi temi di grande interesse, perfettamente coerenti con il modello di sviluppo sostenibile che l'Unione Europea ha posto tra le proprie priorità fondamentali: dalla gestione delle risorse naturali ai sistemi energetici sostenibili, dalla sicurezza e qualità dei prodotti alimentari al benessere dei cittadini e dei lavoratori.

I problemi energetici ed ambientali sono globali e non possono essere risolti soltanto a livello Europeo e soprattutto non certo dal solo settore agro-forestale, ma soprattutto da quello industriale, civile e dei trasporti. Queste sfide possono però portare anche a delle opportunità per le aziende agricole, zootecniche e forestali ed il settore delle energie rinnovabili può rappresentare una occasione di diversificazione e crescita economica per molte di esse.

Bibliografia

- Adam U., 2017. Agriculture 4.0 – the Challenges Ahead and What To Do About Them. XXVII Club of Bologna Meeting "Agricultural Mechanization: Present Meets Future", Hanover (Germany), AGRITECHNICA, 12-13 November 2017 (<https://www.clubofbologna.org/en/meetings-proceedings.php?ANNO=2017>).
- Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., Sartori, L., 2016. Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of The Total Environment*, 545–546, pp. 227-235.
- Boubaker, K., Colantoni, A., Marucci, A., Longo, L., Gambella, F., Cividino, S., Gallucci, F., Monarca, D., Cecchini, M., 2016. Perspective and potential of CO₂: A focus on potentials for renewable energy conversion in the Mediterranean basin. *Renewable Energy*, 90, pp. 248-256.
- Colantoni, A., Monarca, D., Cecchini, M., Mosconi, E.M., Poponi, S., 2018, Small-scale energy conversion of agro-forestry residues for local benefits and European competitiveness. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1),10
- Diao, X., Silver J., and H. Takeshima H., 2016. Agricultural Mechanization and Agricultural Transformation. International Food Policy Research Institute, Washington, DC, IFPRI Discussion Paper 01527 April 2016.
- Kienzle J., 2017. Sustainable Agricultural Mechanization: The Nairobi Conference – Follow-up. XXVII Club of Bologna Meeting "Agricultural Mechanization: Present Meets Future", Hanover (Germany), AGRITECHNICA, 12-13 November 2017 (<https://www.clubofbologna.org/en/meetings-proceedings.php?ANNO=2017>).
- Kishida, Y., editor, 2018. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America." Farm Machinery. Research Corp. Tokyo, Vol.49, No.2, Spring-2018.
- Le Quere C. et al., 2018. Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data*, 10(1), pp. 405-448.
- Marucci A., Zambon I., Colantoni A., Monarca D., 2018. A combination of agricultural and energy purposes: Evaluation of a prototype of photovoltaic greenhouse tunnel. *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 82, p. 1178-1186.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W.W. III, 1972. *The Limits to Growth*, A Report for the club of Rome's project on the predicament of mankind, Universe Books, New York.
- Pichlmaier B., 2018. Trends and new technologies for agricultural machinery. XXVIII Club of Bologna Meeting "New Technologies And Services For Agricultural Machinery: Challenges And Limits". Bologna, EIMA International, 10-11 November 2018 (<https://www.clubofbologna.org/en/meetings-proceedings.php?ANNO=2018>).
- Zambon I., Monarca D, Cecchini M., Bedini R., Longo L., Romagnoli M., Marucci A., 2016. Alternative energy and the development of local rural contexts: An Approach to improve the degree of smart cities in the central-southern Italy. *Contemporary engineering sciences*, vol. 9, p. 1371-1386
- Zambon, I., Colantoni, A., Carlucci, M., Morrow, N., Sateriano, A., Salvati, L., 2017. Land quality, sustainable development and environmental degradation in agricultural districts: A computational approach based on entropy indexes. *Environmental Impact Assessment Review*, 64, pp. 37-46.
- BP, Energy Outlook, 2017 edition (<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2017.pdf>)
- Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. COM/2018/773 final
- GSE, 2018. Rapporto Statistico 2016 (https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20statistico%20GSE%20-%202016.pdf)
- IEA World Energy Outlook 2018, International Energy Agency (www.iea.org)
- IPCC, AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014 (www.ipcc.ch/report/ar5/syr/)
- N.N., 2017. Report: Consultative Meeting on a Mechanization Strategy. New Models for Sustainable Agricultural Mechanization in sub-Saharan Africa.FAO, 10-May-2017.

Adattamento al cambiamento climatico e sostenibilità delle aziende agricole italiane

Dono G., Dell'Unto D., Cortignani R.

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE), Università degli Studi della Tuscia, Viterbo, Italia

Riassunto

La sostenibilità delle aziende agricole richiede un adattamento al cambiamento climatico (CC) che supporti la redditività. Usiamo modelli di programmazione matematica di tre aree italiane per simulare i sentieri di adattamento delle loro aziende agricole a modifiche di rese, esigenze e disponibilità idriche. Sintetizziamo quei sentieri con indicatori di produttività dell'acqua, dei suoli e del lavoro. L'analisi econometrica rivela se essi riescono a tutelare la redditività del lavoro familiare e la sostenibilità economica delle aziende. Il cuore della zootecnia da latte italiana, basato su sistemi foraggeri d'intensità medio-alta, si adatta meglio. Margini minori hanno i sistemi basati sulla produzione intensiva di foraggio e gli allevamenti più estensivi. Le aziende non zootecniche riducono le colture meno redditizie. Ciò può ridurre l'impiego di lavoro, aggravando la disoccupazione. Per tutelare i compensi al lavoro familiare adattandosi al CC la crescita del fabbisogno irriguo va bilanciata da adeguati aumenti delle rese.

Abstract

The sustainability of Mediterranean farms requires that profitability is not deteriorated in adapting to climate change (CC). We use mathematical programming models of three Italian areas to simulate the adjustment paths of farms to changes in yields, water needs and availability. These paths are condensed by indicators of water productivity, soil and labor. The econometric analysis indicates if the paths manage to defend the family work profitability and farm sustainability. The Italian dairy farming core, based on medium-high intensity forage systems, fits better. Tighter margins have systems based on intensive fodder production and more extensive types. Non-livestock farms reduce less profitable crops. This can reduce labor use, worsening unemployment. To protect family work wages while adapting to CC, water needs growth must be balanced by adequate yields rises.

Parole chiave: cambiamenti climatici, adattamento, DSP, econometria, redditività del lavoro familiare agricolo

Introduzione

Valutare l'impatto del Cambiamento Climatico (CC) sulla disponibilità idrica è difficile e richiede di analizzare innanzitutto gli equilibri idrologici locali e le condizioni geofisiche e climatiche (Lionello e Scarascia, 2018, e García-Garizábal et al, 2014). Spesso ciò non basta, giacché la scarsità idrica locale di molte aree mediterranee obbliga a soddisfare la domanda trasferendo l'acqua tra bacini idrografici diversi: per cui vanno considerati equilibri idrologici e condizioni climatiche di aree anche molto lontane (Dono et al., 2019). Infine, è difficile specificare l'effetto congiunto delle forzanti climatiche e dei vincoli istituzionali e tecnici sulla domanda d'acqua, che è influenzata da fattori socio-economici e demografici. La complessità di questi temi è affrontata dai progetti AgrosceNari, MACSUR e DAFNE - Dipartimento di Eccellenza che, integrando i risultati di studi climatici, agronomici e zootecnici in modelli economici di programmazione matematica (MP), simulano l'impatto del CC e definiscono le possibilità di adattamento dell'agricoltura.

Di seguito mostriamo i risultati ottenuti in tre aree in cui operano tipologie di aziende agricole molto diverse tra loro e su cui simuliamo l'impatto di un CC che accresce le esigenze

irrigue, modifica la resa delle colture e riduce la disponibilità di acqua. Questi risultati, descritti in dettaglio in Cortignani et al. (2021), mostrano che la produzione, l'occupazione e il reddito agricolo cambiano in modo diverso nelle varie tipologie. Vari indicatori sintetizzano i loro percorsi di adattamento e con un'analisi di regressione ne mostriamo gli effetti sul reddito per unità di lavoro familiare aziendale. I nostri indicatori di produttività, da una parte, considerano l'uso del suolo, dell'acqua e del lavoro a livello aziendale e non si limitano alle singole colture. Dall'altra, valutano la capacità di assicurare redditività al lavoro familiare, ritenendo che ciò sia cruciale per la sostenibilità, giacché in gran parte delle aziende agricole italiane sono le famiglie a portare l'onere dei rischi d'impresa, compresi quelli di adattamento al CC (Corsi e Salvioni, 2012; van Vliet et al, 2015).

La prossima sezione esamina la recente letteratura scientifica sull'impatto del CC sulla disponibilità e la domanda di acqua nell'area mediterranea, e sull'adattamento delle aziende agricole. La sezione di materiali e metodi mostra le principali eredità del progetto AgrosceNari con le risposte al CC delle 3 aree di studio; poi descrive le simulazioni di quest'analisi, con gli indicatori che delineano le strategie di adattamento al CC. La sezione dei risultati descrive i percorsi emersi, seguono la discussione e la conclusione dell'esame.

Una panoramica sulla letteratura

Il CC dovrebbe alterare i regimi di disponibilità idrica nell'area mediterranea. Secondo García-Ruiz et al (2011) già nel corso del ventesimo secolo sono emerse nette tendenze di lungo periodo all'aumento della temperatura e alla riduzione delle piogge. La riduzione delle nevicate e del manto nevoso e l'anticipazione dello scioglimento della neve contribuiranno a ridurre la disponibilità idrica dei corsi fluviali in primavera e a renderli più irregolari in inverno (McMillan et al, 2016; Gobiet et al 2014). Secondo Lionello e Scarascia (2018) nel 21° secolo il tasso di riscaldamento annuale dell'area mediterranea supererà del 20% la media totale, con punte del 50% in estate e nelle aree continentali a nord del bacino. Il calo delle piogge ridurrà l'accumulo idrico nei bacini artificiali mediterranei e alla maggiore variabilità interannuale si assoceranno più eventi meteorologici estremi (Giorgi e Lionello, 2008).

In parallelo dovrebbero aumentare gli usi dell'acqua. Polebitski et al. (2011), Lott et al. (2013), Parandvash e Chang (2016) e Wang et al. (2017) affermano che le modifiche nel regime delle piogge e l'aumento della temperatura potranno anche accrescere la domanda pro capite. Secondo Köberl et al. (2016), Gli usi industriali dell'acqua dovrebbero aumentare di poco, mentre dovrebbe crescere molto l'impiego per proteggere i sistemi ecologici (Spears et al., 2013; Piniewski et al., 2014). Il CC dovrebbe modificare la domanda idrica anche riducendo il turismo estivo aumentando e quello primaverile e autunnale (Averyt et al, 2011). Infine, dovrebbe crescere l'uso dell'acqua per l'irrigazione (García-Garizábal et al. 2014; Zhao et al., 2015; Dono et al., 2016). Secondo Saadi et al. (2015) anticipazione e accorciamento del ciclo ridurranno le esigenze irrigue del grano e dei pomodori; le minori piogge e la maggiore evapotraspirazione in inverno-primavera accresceranno le irrigazioni di soccorso.

Venendo agli impatti del CC, vari studi integrano aspetti agronomici ed economici in modelli di programmazione matematica per identificare i sistemi agricoli più esposti e le loro possibilità di adattamento (Dono et al., 2016; Purola et al., 2018). Altri studi evidenziano l'influenza delle economie di scala, della diversificazione delle pratiche colturali e degli investimenti irrigui (Kahil et al., 2015; Harmanny e Malek, 2019). Pochi valutano l'impatto sulla redditività, in particolare del lavoro delle famiglie agricole, che influenza la sostenibilità aziendale (Smedzik-Ambrozy et al., 2019). Lo studio principale sui legami tra adattamento e

redditività è Reidsma et al. (2010) che applica un modello econometrico per concludere che l'adattamento al CC dipende dalla gestione degli input, dalle rotazioni colturali, dall'intensità dell'uso del suolo e dalle dimensioni aziendali.

In questa prospettiva, il nostro studio traccia le strategie di adattamento di tipologie diverse di aziende agricole in condizioni di esigenza irrigua crescente, calo delle disponibilità idriche e modifica delle rese colturali. Per identificare i sentieri di adattamento ricorriamo a indicatori di produttività che non guardano alle singole colture, ma considerano l'uso del suolo, dell'acqua e del lavoro da parte della tipologia aziendale nel suo insieme. Combinando modelli di programmazione matematica e approcci econometrici valutiamo, da una parte, gli effetti sul reddito netto, dall'altra, quelli sulla redditività del lavoro agricolo familiare.

Materiali e Metodi

Le 3 aree di studio e i dati impiegati. Il territorio *oristanese* (54.000 Ha) comprende due zone. Nella prima, un Consorzio di Bonifica fornisce acqua da una diga per irrigare fino a 36.000 ettari. Le colture irrigue sono riso, mais insilato, in successione a loietto, erba medica, ortaggi, agrumi; in asciutto, vigneti e oliveti, cereali autunno-vernini. L'allevamento bovino da latte sardo è localizzato in quest'area, con un sistema cooperativo ben organizzato che produce e commercializza prodotti caseari. La seconda area copre 18.000 Ha. L'irrigazione si svolge con prelievi da pozzi agricoli e gran parte dei suoli è adibita a pascolo per ovini e cereali asciutti. Il territorio *salernitano* si estende su 15.000 ha nel *bacino del Sele* da cui un Consorzio capta le acque per l'irrigazione. Si coltivano soprattutto ortaggi in serra e in pieno campo, alberi da frutto e foraggi per gli allevamenti bufalini, il cui latte è usato per produrre mozzarella. Nel territorio *padano* si focalizza l'attenzione sulle aziende bovine da latte di *Cremona e Piacenza* che producono per il Grana Padano su 68.000 ha. Queste coltivano foraggi, soprattutto mais a ciclo lungo, erba medica e cereali zootecnici. Le aziende cremonesi hanno mandrie più grandi, maggiori rese in latte e irrigano con l'acqua fornita da un Consorzio di Bonifica. Le aziende piacentine usano l'acqua dei loro pozzi, il che limita l'intensità d'irrigazione e l'incidenza delle colture irrigate sulla SAU (INEA, 2014).

Dono et al. (2016) descrive la procedura di raccolta dei dati dalla rete d'informazione contabile agricola (RICA) e da indagini dirette, con cui si sono costruite le tipologie aziendali che rappresentano l'agricoltura di Oristano. La stessa procedura è stata adottata nelle altre due zone. Ne sono scaturite 13 tipologie di aziende agricole (di seguito *tipologie*) a rappresentare Oristano (di cui 9 servite dal Consorzio); 7 per Salerno; 14 tipologie bovine da latte a Cremona e 9 a Piacenza. Interviste ad agricoltori, agronomi e dirigenti di cooperative agricole e amministratori regionali hanno permesso di definire le rese e i fabbisogni di lavoro, acqua e prodotti chimici per le fasi produttive delle colture nelle tre aree. Lo stesso è stato fatto per i fabbisogni alimentari del bestiame, con le razioni di mangime e la produzione di latte. I prezzi dei prodotti e dei fattori sono recuperati dai bollettini dei prezzi delle Camere di Commercio e dell'ISMEA. Le condizioni dei mercati locali sono state definite intervistando commercianti e dirigenti di cooperative e di Camere di Commercio. I vincoli in materia di terra, lavoro e acqua sono stati definiti sulla base del VI Censimento Agricolo Italiano, sul database RICA e sui registri dei Consorzi di Bonifica.

Simulazione di clima, produzione e impatto del CC. Dono et al. (2016) descrivono la costruzione del modello territoriale di Oristano che stima l'impatto del CC integrando analisi climatiche, agronomiche, zootecniche, statistiche ed economiche. Lo stesso processo è stato

svolto nelle zone di Cremona-Piacenza e di Salerno. Elemento chiave è la stima delle distribuzioni di probabilità (PDF) di alcune variabili incerte (rese del latte e delle colture e fabbisogni idrici) nei due scenari di piogge e temperature giornaliere che riproducono il clima corrente (2000-2010) e la previsione per il futuro (2020-2030). I dati climatici sono stimati con un modello di circolazione generale che stima la risposta atmosferica e oceanica su larga scala allo scenario futuro di emissioni SRES-A1B. Il risultato di questo modello è poi applicato con il *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS) che permette di rappresentare meglio la variabilità locale perché ne considera le caratteristiche fisiche delle aree di studio. Ne derivano scenari che, pur con diversità tra le tre zone, prevedono che in futuro le temperature giornaliere minime e massime aumenteranno di poco in primavera e molto in estate e autunno-inverno; il numero di giornate calde estive e di ondate di caldo aumenterà molto; la piovosità media si ridurrà di poco in primavera e molto in autunno-inverno; la variabilità crescerà in tutte le stagioni. Tali alterazioni del futuro rispetto al presente riflettono le tendenze climatiche degli ultimi 30 anni.

Delle temperature e umidità attuali e future s'è stimato l'effetto sulle esigenze irrigue e sulle rese con i modelli EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate*, v 0810; Williams, 1995) e DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer* v 4.6, Hoogenboom et al., 2012). La qualità e la quantità del latte e la mortalità degli animali sono state stimate con modelli di produzione animale basati sull'indice di temperatura e umidità (*THIndex*). Con i risultati di questi modelli si sono stimate le PDF delle rese e delle esigenze irrigue, poi impiegate in modelli di Programmazione Stocastica Discreta (DSP) per rappresentare le aspettative che guidano gli agricoltori nello scegliere le colture e le tecniche da adottare nei due scenari. Ciò comporta che i modelli DSP generano risultati produttivi ed economici nel presente e nel futuro le cui differenze si devono alle modifiche del clima (Dono et al., 2016).

La Tabella 1 riporta i principali risultati di EPIC e DSSAT in Agrosceari e rappresenta le rese e i fabbisogni irrigui del futuro come variazioni percentuali rispetto al presente. DSSAT è stato applicato per riso, orzo e grano duro, EPIC per le altre colture. Nel caso delle colture ortive e frutticole, i limiti dei modelli agronomici e la scarsità dei dati di calibrazione hanno indotto a simulare solo le esigenze irrigue. Per il futuro questi sono stati ottenuti stimando la PDF dell'evapotraspirazione netta (ETN) nei due scenari e applicando la sua variazione percentuale agli adacquamenti del presente. In tal modo si è assunto che gli agricoltori integrino l'evapotraspirazione mantenendo il suolo alla capacità di campo, e che soddisfare le esigenze irrigue del futuro mantenga invariate le rese delle colture ortofrutticole.

Il CC ha impatti diversi dovuti alla specifica sensibilità delle colture e alle condizioni pedo-climatiche delle aree. Solo il riso aumenta le rese più delle esigenze irrigue. Le rese del mais variano in funzione della precocità dell'ibrido. Le maggiori intercettazioni di radiazioni durante il ciclo colturale accrescono le rese dell'ibrido precoce FAO 700, ma le condizioni d'irrigazione ottimali aumentano molto i fabbisogni idrici. L'aumento della temperatura accorcia invece il ciclo di crescita degli ibridi di mais più diffusi (FAO 600), riducendo le radiazioni intercettate durante il ciclo colturale e, quindi, la produzione. Il calo delle rese interessa anche il mais a ciclo breve coltivato a Oristano e a Piacenza in successione al loietto. A Oristano il loietto è irriguo e, benché l'esigenza idrica cresca molto, il suo aumento delle rese bilancia il calo di produzione del mais in successione. Invece, a Piacenza il loietto è coltivato in asciutto, così le sue rese crescono poco e non bilanciano la minore produzione di mais. La riduzione della resa interessa tutte le foraggere in asciutto di Oristano, come il trifoglio e il pascolo, che sono rilevanti per l'allevamento ovino.

L'ETN medio annuo cresce del 3,2% a Oristano, del 7,5% a Cremona-Piacenza e del 17,7% a Salerno. Questi valori derivano da variazioni diverse durante l'anno: Salerno, ad esempio, mostra un divario tra un notevole aumento dell'ETN in gennaio-giugno e una grande riduzione in luglio-dicembre, con un aumento medio del 60% nei tre decenni di marzo e un calo del 62% in ottobre. Di conseguenza, gli impatti sul fabbisogno idrico delle varie colture dipendono dal periodo in cui queste sono coltivate.

Tabella 1. EPIC e DSSAT– impatti su rese e fabbisogni irrigui (variazioni percentuali sul presente).

Study area	Crop system/crop	Model	Yields Δ %	Water needs Δ %	
Oristano	Rice	DSSAT	7.7	3.2	
	Alfalfa		-1.5	4.2	
	Irrigated	silage corn 600		-6.7	-4.1
		silage corn 700	EPIC	3.1	4.3
		Ryegrass		19.8	40.0
	Rain-fed	Clover		-10.5	-
		Pasture		-4.7	-
		Barley	DSSAT	-0.8	-
		durum wheat		0.1	-
	Cremona-Piacenza	Alfalfa		-	7.5
Irrigated		silage corn 1st harv.		2.2	6.0
		silage corn 2nd harv.	EPIC	-2.4	8.1
		silage corn milk-rip.		-6.4	-0.5
		grain corn		2.2	12.4
Rain-fed		Ryegrass		3.9	-

Gli scenari simulati. Abbiamo applicato ai tre modelli di DSP lo scenario del presente e sei diversi scenari futuri. Questi ultimi hanno le stesse rese ed esigenze irrigue ma differiscono per disponibilità idrica. Il primo scenario futuro (CC) corrisponde alla simulazione Agroscevari, in cui non varia la disponibilità idrica mensile rispetto al presente. La disponibilità idrica mensile dello scenario futuro CC-0 è invece limitata al livello di utilizzo del presente. Altri quattro scenari futuri simulano cali della disponibilità dal 5% al 20% rispetto all'uso del presente (CC-5, CC-10, CC-15, CC-20). Questi scenari riducono sia l'acqua del Consorzio, sia quella prelevabile dai pozzi nei singoli periodi dell'anno. In breve, la prima simulazione indica la risposta solo a temperature e piogge del futuro; le altre indicano l'impatto integrato di piogge e temperature future e riduzioni di acqua disponibile.

Indicatori di reddito da lavoro, uso delle risorse e produttività. Le simulazioni con modelli DSP identificano i risultati dei percorsi di adattamento che massimizzano il reddito delle aree di studio e delle loro tipologie. La Tabella 2 riporta gli indicatori che ne sintetizzano i risultati sono sintetizzati ai fini dell'analisi econometrica. Gli indicatori sono definiti come rapporti e sono valutati come variazioni percentuali rispetto al presente per standardizzarne le indicazioni rispetto alle differenze dimensionali tra aziende. Inoltre, sono specificati rispetto all'insieme dell'attività aziendale e non per singola coltura o tipo di allevamento.

L'indicatore basilare è la variazione percentuale del reddito per ora di lavoro familiare usato in azienda (*reddito orario*). Variazioni di reddito aziendale e di uso del lavoro familiare in azienda modificano il *reddito orario* e, con esso, la sostenibilità dell'impiego della risorsa in azienda a parità di condizioni sul mercato del lavoro. Due indicatori rispecchiano gli effetti di modifiche delle superfici e delle rese colturali sulla produttività del suolo e dell'acqua. Uno

misura la variazione percentuale della PLV per ettaro (*produttività suolo*); l'altro misura la variazione percentuale della PLV irrigua per metro cubo d'acqua (*produttività acqua*). Nei nostri modelli i prezzi di mercato non variano, così, le PLV, e le conseguenti produttività del suolo e dell'acqua, variano solo a causa di modifiche nei modelli colturali dovute alle nuove condizioni di resa, esigenze irrigue e disponibilità idrica. Altri due indicatori di variazione percentuale riguardano gli acquisti di mangime per ettaro (*mangimi*) e l'impiego di lavoro familiare per ettaro (*lavoro*). Quest'ultimo aspetto è rilevante perché, anche se cala il reddito aziendale totale, l'abbandono di colture con bassa produttività del lavoro può far crescere il reddito per ora di lavoro.

Tabella 2. Indicatori di reddito da lavoro, uso delle risorse e produttività.

Indicatore	Descrizione	Specificazione
<i>Reddito orario</i>	Variazione percentuale del reddito per ora di lavoro familiare	$\Delta_b \% \frac{LI}{FLE}$
<i>Produttività suolo</i>	Variazione percentuale del valore delle colture per ettaro	$\Delta_b \% \frac{\sum_j (X_j * Y_j * P_j)}{\sum_j X_j}$
<i>Produttività acqua</i>	Variazione percentuale del valore delle colture irrigate per metro cubo di acqua utilizzata	$\Delta_b \% \frac{\sum_k (X_k * Y_k * P_k)}{TIW}$
<i>Mangimi</i>	Variazione percentuale degli acquisti di mangime per ettaro	$\Delta_b \% \frac{FP}{\sum_j X_j}$
<i>Lavoro</i>	Variazione percentuale dell'occupazione manodopera familiare per ettaro	$\Delta \% \frac{FLE}{\sum_j X_j}$

LI: reddito da lavoro; FLE: ore di lavoro familiare impiegato in azienda (h); X: superficie coltivata (ha); Y: resa delle colture (t/ha); P: prezzo unitario (€/t); j: generica coltura; k: coltura irrigata; TIW: uso dell'acqua (m³); FP: costo acquisti di mangimi (€).

Analisi di regressione. Cortignani et al. (2021) espone i dettagli dell'analisi di regressione che stima l'impatto dei percorsi di adattamento emersi dai modelli MP, in base ai rapporti tra *reddito orario* e i regressori *produttività suolo*, *produttività acqua*, *mangimi*, *lavoro*. I coefficienti dei regressori sono stimati per 8 gruppi di tipologie: bovini da latte Cremona; bovini da latte Piacenza; bovini da latte Oristano più bufale Salerno; ovini Oristano; risaie specializzate Oristano; colture arboree, serre e seminativi. Questi ultimi tre gruppi sono in Oristano e Salerno.

Con i risultati della regressione si calcolano le *elasticità* che misurano di quanto varia in percentuale il *reddito orario* a seguito di una variazione percentuale di ogni regressore. Ora, tutti i nostri indicatori già misurano variazioni percentuali, ne consegue che le nostre elasticità misurano l'effetto di un regressore nell'accelerare o rallentare la variazione del *reddito orario*. Ad esempio, se in una tipologia il *reddito orario* cresce, la sua elasticità rispetto a *produttività acqua* ($\epsilon_{prod. acqua}$) indica se allocare l'acqua alle colture con i maggiori aumenti di resa per metro cubo accelera o rallenta la crescita. Nello stesso caso, l'elasticità del *reddito orario* rispetto a *produttività suolo* ($\epsilon_{prod. suolo}$) indica se espandere le colture con i maggiori aumenti di resa ad ettaro accelera o rallenta la crescita di *reddito orario*. In breve, il confronto tra i risultati delle simulazioni DSP (aumento o riduzione del *reddito orario*) e le elasticità indica l'influenza dei percorsi di adattamento sulla redditività del lavoro.

Analisi dei Risultati

Simulazioni DSP: impatti di area. La Tabella 3 mostra i principali impatti del CC nelle tre aree ottenuti dai modelli DSP. La prima e la seconda riga riportano i risultati di Agrosceari sulle condizioni nel clima attuale e le loro modifiche in un futuro in cui i regimi di pioggia e temperatura accrescono le esigenze irrigue e cambiano le rese ma non variano la disponibilità idrica (CC). Nelle tre aree questo scenario genera cali di reddito analoghi che, però, dipendono da risposte adattative diverse. Salerno e Cremona-Piacenza cambiano molto l'uso del suolo (FKI diminuisce di più) riducendo l'area irrigata; Oristano cambia meno l'uso del suolo e non riduce l'area irrigata. Il ricorso al lavoro familiare si riduce molto a Salerno, tanto da aumentare il *reddito orario* nonostante il calo del reddito lordo; a Cremona-Piacenza e a Oristano a quest'occupazione non si riduce e ciò ne riduce il *reddito orario*.

Con minori disponibilità idriche emergono reazioni diverse delle tre aree. Cremona-Piacenza tollera meglio la riduzione, anche ad alti livelli, con cali minori di reddito totale e *orario*. L'impatto cresce a Oristano ed è forte a Salerno, dove un calo del 5-10% raddoppia gli impatti economici dovuti ai soli effetti di temperature e piogge. Cambia diversamente anche l'uso del lavoro. Salerno e Oristano riducono molto il lavoro salariato, Cremona-Piacenza ben poco. L'uso del lavoro familiare si riduce poco a Cremona-Piacenza e a Oristano; a Salerno cala più che proporzionalmente dei redditi e ciò fa crescere il *reddito orario*.

Tabella 3. Principali impatti delle simulazioni DSP.

Simulation	FKI	Colture irrigate % totale	Mangimi acquistati % autoprodotti	Superficie coltivata (ettari)	Impiego del lavoro		Reddito lordo (.000 €)	Reddito orario del lavoro (€/h)
					Esterno (.000 h)	Familiare		
B Oristano	100	39,1	69,8	54.168	792	3.783	114.003	17,6
CC	96,2	39,2	72,1	0,5	-1,1	0,1	-1,6	-2,9
CC-0	96,1	38,7	73,2	0,3	-2,5	-0,3	-1,7	-2,5
CC-10	94,7	36,6	77,3	-0,3	-9,6	-2,0	-2,1	-1,2
CC-20	92,8	34,6	86,2	-1,4	-17,1	-3,8	-2,9	-0,5
B Salerno	100	91,7	179,2	17.275	4.233	2.432	262.189	78,9
CC	92,3	87,6	182,4	-6,9	-14,7	-4,3	-1,3	3,3
CC-0	92,3	87,6	182,4	-6,9	-14,7	-4,3	-1,3	3,3
CC-10	88,6	85,5	184,6	-9,2	-23,1	-6,9	-2,9	4,4
CC-20	84,7	83,3	186,0	-11,7	-31,5	-11,2	-5,2	6,3
B Cremona-Piacenza	100	86,6	182,2	66.74	3.324	4.794	361.143	41,0
CC	81,3	80,4	152,3	1,6	1,1	0,0	-2,1	-3,8
CC-0	80,6	77,4	166,2	-1,3	0,2	-0,1	-2,1	-3,8
CC-10	78,7	74,5	183,5	-6,4	-1,1	-0,2	-2,2	-3,7
CC-20	76,3	71,5	209,3	-13,2	-2,7	-0,4	-2,3	-3,8

Analisi di regressione: adattamento delle tipologie. La Tabella 4 riporta gli effetti dei sentieri di adattamento su *reddito orario*. Prima presenta i valori medi degli indicatori che rappresentano quei sentieri. Tra questi include tre indicatori che mostrano l'effetto delle sole modifiche nell'uso del suolo e nella distribuzione dell'acqua tra colture (*produttività suolo_R* al netto di modifiche di resa; *produttività acqua_R* al netto di modifiche di resa ed esigenze irrigue; *reddito orario_L* al netto del calo delle rese di latte negli allevamenti). Poi, presenta l'elasticità del *reddito orario* su ogni regressore: questa va letta considerando che se *reddito orario* si riduce (come in Ovini) le elasticità con segno positivo riflettono modifiche che accelerano il declino, quelle con segno negativo lo rallentano. Veniamo ai risultati.

Bovini Cremona e Bovini Piacenza variano poco il *reddito orario*_L. I primi ampliano la coltivazione di foraggiere con più alto valore a ettaro e ciò accresce *produttività suolo*_R; la crescita delle rese aumenta ancora di più *produttività suolo*. I sistemi piacentini, in origine meno intensivi, espandono molto la coltivazione delle foraggiere con forti aumenti di resa (*produttività suolo*_R +17,8%, *produttività suolo* +19,2%): ciò frena il calo di *reddito orario* ($\epsilon_{prod.suolo}$ -0,23). Cambia anche la distribuzione dell'acqua, dedicata a colture con rese più alte (*produttività acquari* +17,2%). Tuttavia, l'aumento delle esigenze irrigue di queste colture riduce l'area che si può coltivare con la minore disponibilità idrica e ciò azzerà l'aumento di *produttività acqua*. Peraltro, queste colture hanno anche un impegno di manodopera più alto, che accresce l'uso del lavoro familiare e accentua il calo di *reddito orario* (ϵ_{lavoro} +0,62). **Ovini e Bovini-Bufale (OR-SA)** riducono il *reddito orario*_L. I due gruppi non hanno molte alternative colturali e possono espandere solo colture con scarse esigenze irrigue, il che riduce la *produttività suolo*_R. Peraltro queste colture richiedono meno lavoro e ciò ha effetti opposti sui due gruppi perché frena il calo di *reddito orario* in Ovini, che usa il lavoro con minore produttività ($\epsilon_{prod.suolo}$ -0,49); lo accelera in Bovini-Bufale ($\epsilon_{prod.suolo}$ +0,19) che lo usa con maggiore produttività. I due gruppi dedicano l'acqua disponibile solo alle colture di maggior valore aumentando la *produttività acquari*. Questa strategia potrebbe frenare il calo di *reddito orario* in Ovini ($\epsilon_{prod.acqua}$ -0,51) che, però, data la scarsità idrica, non riescono a sfruttarla e devono aumentare l'acquisto di mangimi (+25%). **Frutticole e Serre** aumentano il *reddito orario*. Il loro adattamento, da una parte, espande colture di basso valore, frenando la crescita del *reddito orario* ($\epsilon_{prod.suolo}$ -0,20 e -0,52); dall'altra, alloca l'acqua su colture di alto valore, accelerando la crescita ($\epsilon_{prod.acqua}$ +0,29 e +0,28). Espandere le colture di minore valore riduce l'uso del lavoro familiare: ciò accelera la crescita di *reddito orario* in Frutticole (ϵ_{lavoro} +0,95) ma non in Serre, dove anche le colture di minore valore hanno un'alta redditività ($\epsilon_{prod.suolo}$ -0,52). **Risaie** aumentano il *reddito orario* grazie alla maggiore resa del riso, che accresce *produttività acqua* ($\epsilon_{prod.acqua}$ +0,77). Tuttavia, la qualità del suolo non consente di bilanciare la minore disponibilità idrica espandendo colture irrigate ricche: ciò riduce la *produttività suolo* e frena la crescita del *reddito orario* ($\epsilon_{prod.suolo}$ -0,86). **Seminativi** aumentano *reddito orario* espandendo le superfici ortive in autunno-inverno, quando ETN si riduce. Tuttavia, le ortive invernali sono colture meno pregiate e la loro espansione accresce poco la *produttività suolo* (+0,5%) e accelera poco l'aumento di *reddito orario* ($\epsilon_{prod.suolo}$ +0,13). Così, ampliarne la coltivazione aumenta l'uso di lavoro (+2,8%) e ciò rallenta la crescita di *reddito orario* (ϵ_{lavoro} -0,53). In estate Seminativi allocano le minori disponibilità idriche su colture di più valore (*produttività acqua* +4,2%) che, però, hanno maggiori esigenze irrigue: ciò riduce la superficie coltivata e rallenta la crescita di *reddito orario* ($\epsilon_{prod.acqua}$ -0,20).

Tabella 4. Indicatori dei sentieri di adattamento ed elasticità calcolate ai valori medi.

Tipologie	Sentieri di adattamento						Elasticità reddito orario					
	Prod. suolo _R	Prod. suolo	Prod. acqua _{RI}	Prod. acqua	Lavoro	Mangimi	Reddito orario	Reddito orario _L	$\epsilon_{prod. suolo}$	$\epsilon_{prod. acqua}$	ϵ_{lavoro}	$\epsilon_{mangimi}$
Bovini Cremona	1,7	3,7	13,0	4,1	3,6	2,2	-4,7	0,4	-0,13	0,13	0,14	-0,07
Bovini Piacenza	17,8	19,2	17,2	0,4	11,1	0,8	-4,0	-0,5	-0,23	0,0002	0,62	-0,03
Bovini-Bufale (OR-SA)	-5,0	-4,7	3,4	-4,2	-2,3	0,9	-5,3	-2,2	0,19	-0,09	0,02	-0,02
Ovini	-1,3	-6,1	0,4	-2,3	-0,9	25,0	-10,4	-10,4	-0,49	-0,51	-0,01	0,30
Frutticole	-2,0	-2,0	2,1	-13,0	-2,6	-	2,8	-	-0,20	0,29	0,95	-
Serre	-5,9	-5,9	-0,2	-12,6	-1,1	-	2,9	-	-0,52	0,28	0,27	-
Risaie	-8,3	-6,7	3,8	4,0	-0,7	-	6,0	-	-0,86	0,77	0,01	-
Seminativi	0,5	0,4	3,3	4,2	2,8	-	3,1	-	0,13	-0,20	-0,53	-

(Or-Sa) = Oristano and Salerno

Discussione

I risultati dei modelli MP indicano forti difformità nel cambiamento dell'uso del suolo. Gli allevamenti bovini di Cremona-Piacenza aumentano l'autoproduzione di foraggio grazie alla crescita delle rese, che bilancia la riduzione della coltivazione dovuta alla crescita delle esigenze irrigue. Il reddito di queste aziende diminuisce per l'impatto del CC sulla produzione di latte, che causa un danno economico maggiore rispetto ad altre aree. Le aziende salernitane, in prevalenza non zootecniche, si adattano riducendo attività meno redditizie, con carichi di lavoro maggiori. Ciò riduce l'impiego del lavoro dipendente e familiare in misura maggiore del calo nel reddito totale, facendo crescere i redditi orari. Le aziende oristanesi sono a metà strada: riducono molto occupazione e reddito, come nel salernitano, ma mantengono la superficie coltivata, come nell'area Cremona-Piacenza.

I risultati della regressione rivelano la capacità di adattarsi sfruttando gli aumenti di resa per modificare l'uso dei suoli e del lavoro ed escludere attività meno redditizie. Le aziende zootecniche rispondono soprattutto agli impatti sulle colture foraggere: le modifiche nelle rese del mais dipendono dall'ubicazione dell'area e dalla durata del ciclo colturale, e gli ibridi a ciclo lungo godono della maggiore intercettazione di radiazioni, anche se con forti aumenti delle esigenze irrigue. In questo quadro, le aziende meno intensive espandono la coltivazione del mais a ciclo lungo, sfruttando la crescita della resa per intensificare i loro sistemi. Tuttavia, il fabbisogno di manodopera di questo ibrido accresce molto l'uso di lavoro familiare e ciò limita la crescita dei loro redditi orari. Le aziende più intensive, già coltivano i mais ibridi e riescono a sfruttarne di meno gli aumenti di resa; per converso, accrescono di meno l'uso del lavoro familiare; inoltre, riducono l'erba medica a favore del loietto asciutto. Una coltivazione alternativa per le due aree del Nord potrebbe essere la successione loietto-mais: però, il calo delle rese e l'aumento delle esigenze irrigue limitano la coltivazione di mais a ciclo breve e, dunque, l'espansione di questa successione. In ogni caso, questi cambiamenti nella produzione vegetale, anche quando supportano i livelli di reddito orario, non riescono a bilanciare gli effetti economici del calo nella produzione del latte.

Gli allevamenti bovini da latte di Oristano adottano già la successione loietto-mais, con un uso più intensivo dei terreni e una maggiore produttività del lavoro. Però, le perdite di resa del mais a ciclo breve e l'aumento delle esigenze irrigue del loietto, riducono l'adattabilità: in assenza di alternative irrigue più produttive, la minore disponibilità idrica induce a coltivare colture di valore minore e riduce la produttività del lavoro. La situazione peggiore è quella delle aziende ovine che si basano soprattutto su colture foraggere asciutte le cui rese calano molto:

ciò fa crescere gli acquisti di mangimi e riduce il *reddito orario*. L'acqua disponibile è davvero poca, dunque, sono molto limitati gli effetti di una sua razionalizzazione che dedichi la risorsa idrica a colture più produttive e riduca l'uso del lavoro familiare.

Le modifiche nell'uso dei suoli e del lavoro familiare hanno effetti diversi nelle aziende frutticole, con serre, seminativi e ortive. Quelle meno vincolate espandono l'attività autunno-invernale quando il calo della disponibilità idrica e la crescita delle esigenze irrigue delle colture sono minori. Ciò induce a espandere colture meno produttive e frena la crescita del *reddito orario*. I vincoli strutturali nelle aziende con serre, con arboree e con risaie costringono a ridurre le colture meno redditizie e, con esse, il lavoro familiare. Ciò accresce la redditività, sebbene a livelli diversi, poiché l'uso del suolo nelle aziende con serre è già di massima redditività e ridurre l'attività elimina colture ad alto reddito. In tutti questi casi le nostre simulazioni risentono molto della mancanza di modifiche nelle rese che avrebbero forti impatti di reddito e di concorrenza per l'acqua. Lo avvalorano i risultati delle risaie oristanesi, dove la crescita della resa è invece simulata e bilancia l'aumento delle esigenze irrigue, permettendo di affrontare meglio il calo nella disponibilità di acqua.

Il rapporto tra disponibilità di acqua, livelli di resa e necessità irrigue delle colture è una chiave di adattamento anche secondo Debaeke e Aboudrare (2004). In condizioni di scarsità idrica, gli ibridi a ciclo breve funzionano meglio a causa delle minori esigenze irrigue mentre quelli a ciclo più lungo funzionano meglio a latitudini subumide. Questa differenza è rilevante nei nostri scenari di CC poiché anche la nostra riduzione più grande, 20% in meno di acqua, modifica moderatamente le disponibilità idriche e mantiene le caratteristiche subumide nelle nostre aree, favorendo gli ibridi a ciclo lungo. Boutraa (2010) sottolinea l'equilibrio tra rese e variazioni dei fabbisogni irrigui, evidenziando la necessità di avere rese maggiori insieme a usi dell'acqua più efficienti. I nostri risultati confermano anche le indicazioni di Soto-García et al (2013) che collegano l'adattamento agricolo all'uso dell'acqua disponibile sulle colture più produttive. Lo stesso vale per le conclusioni di Hamdan e Salman (2005) e Chebil et al (2019) che indicano come vari percorsi di adattamento possano ridurre l'uso del lavoro familiare agricolo.

Conclusioni

Il nostro studio ha elaborato i risultati dei modelli di programmazione matematica con un'analisi econometrica. L'analisi riguarda tre aree agricole italiane molto diverse tra loro. Essa ha definito i percorsi di adattamento utilizzando indicatori di produttività che riflettono l'uso del suolo, dell'acqua e del lavoro a livello di tipologia aziendale e non si limitano alle singole colture. Inoltre, l'analisi valuta i risultati in termini di redditività del lavoro familiare, ritenendo che quest'indicatore sia cruciale per la sostenibilità delle aziende agricole italiane, condotte in gran parte da unità familiari.

I risultati mostrano che il cuore dell'allevamento bovino da latte italiano si adatta meglio agli impatti simulati, giacché adotta sistemi di produzione di foraggio d'intensità medio-alta, basati su ibridi di mais a ciclo lungo che reagiscono bene al CC. I potenziali di adattamento sono minori per le tipologie che gestiscono la terra in maniera più intensiva, con la successione di loietto e ibridi di mais a ciclo breve. Aumentare la resa delle colture di questa successione appare un obiettivo importante perché potrebbe accrescere l'adattabilità dei vari sistemi zootecnici italiani in un quadro di crescente scarsità d'acqua. Soffrono molto i sistemi pastorali del latte ovino, basati sulla gestione estensiva dei suoli. Facilitare l'accesso all'irrigazione da parte di queste aziende e aumentare la produttività dei pascoli e dei foraggi in asciutto diventa

dunque urgente. L'obiettivo è anche di limitare gli acquisti di mangimi, i cui prezzi potrebbero aumentare proprio per l'impatto del CC. Le strategie di adattamento per gli allevamenti zootecnici devono considerare gli impatti del CC sulla produzione di latte, esaminando opzioni che cambiano le tecnologie di allevamento e la struttura delle mandrie che, però, non possono essere valutate con i modelli utilizzati in questo studio. Le tipologie ortive, di seminativi, frutticoltura e serra, per lo più dell'Italia meridionale, si adattano abbandonando colture a minore produttività del lavoro. Ciò riduce l'occupazione generale e anche quella del lavoro familiare: un risultato grave in aree con tassi di disoccupazione già alti. C'è spazio per altri percorsi come l'espansione delle colture autunno-vernine, che preservano l'occupazione familiare e mostrano incrementi sostenibili delle esigenze irrigue. Il costo è però di un calo della redditività che potrebbe ridurre la sostenibilità economica di quelle tipologie nel tempo. Per adattarsi al clima futuro mantenendo i compensi al lavoro familiare, l'aumento dei fabbisogni irrigui va contrastato con quello delle rese.

L'impatto e l'adattamento al CC sono stati studiati con approcci econometrici su dati osservati in passato o con modelli MP che simulano scenari futuri. Qui si è usato un approccio econometrico che valuta i risultati di analisi basate su modelli MP. Studi futuri potrebbero sviluppare l'analisi econometrica con forme funzionali più adatte a rappresentare gli impatti e i percorsi adattativi. Inoltre, vanno migliorate le simulazioni dei modelli MP integrando l'influenza del CC su fitopatie e parassiti, gli effetti dello sviluppo tecnologico sulle rese, il quadro di mercato di prodotti e fattori. In particolare, rimane basilare il confronto con quanto accade al resto del mercato del lavoro, poiché la sostenibilità di un sistema produttivo dipende anche dalle alternative offerte dal resto dell'economia alle risorse che esso impiega.

Ringraziamenti e finanziamenti

Lo studio è stato supportato dai progetti AgrosceNari (www.agrosceNari.it, D.M. 8608/7303/2008), Macsur (www.MACSUR.eu, DM 2660/7303/2012), Ministero Agricoltura (MiPAAF) e DAFNE - Dipartimento di Eccellenza, (www.unitus.it/it/dipartimento/dafne/eccellenza-nella-ricerca-e-nella-didattica/articolo/sintesi-del-progetto, Legge 232/2016,) Ministero Università (MIUR). I finanziatori non hanno interferito nello svolgimento di questo lavoro.

Bibliografia

- Averyt, K., Fisher, J., Huber-Lee, A., Lewis, A., Macknick, J., Madden, N., Rogers, J., Tellinghuisen, S. (2011). Freshwater use by U.S. power plants: electricity's thirst for a precious resource. A report of the Energy and Water in a Warming World initiative. Union of Concerned Scientists, Cambridge, MA.
- Boutraa, T. (2010). Improvement of water use efficiency in irrigated agriculture: a review. *Journal of Agronomy*, 9(1), 1-8. <https://doi.org/10.3923/ja.2010.1.8>.
- Chebil, A., Frija, A., Makhlof, M., Thabet, C., Jebari, S. (2019). Effects of Water Scarcity on the Performances of the Agricultural Sector and Adaptation Strategies in Tunisia. In *Agricultural Economics-Current Issues*. IntechOpen.
- Corsi A., Salvioni C. (2012). Off- and On-Farm Labour Participation in Italian Farm Households. *Applied Economics*, 44(19): 2517-2526.
- Cortignani R., Dell'Unto D, Dono G (2021). Paths of adaptation to climate change in major Italian agricultural areas: Effectiveness and limits in supporting the profitability of farms. *Agricultural Water Management*, vol. 244.
- Debaeke, P., Aboudrare, A. (2004). Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy*, 21(4), 433-446. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2004.07.006>.
- Dono, G., Cortignani, R., Dell'Unto, D., Deligios, P., Doro, L., Lacetera, N., Mula, L., Pasqui, M., Quaresima, S., Vitali, A., Roggero, PP. (2016). Winners and losers from CC in agriculture: Insights from a case study in the Mediterranean basin. *Agricultural Systems*, 147 (2016) 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.013>.
- Dono, G., Severini, S., Dell'Unto, D., Cortignani, R. (2019). Italy, in: Molle F, Sanchis-Ibor C, Avellà-Reus L, *Irrigation in the Mediterranean, Technologies, Institutions and Policies*, Pages 151-183, Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- García-Garizábal, I., Causapé, J., Abrahao, R., Merchan, D. (2014). Impact of CC on Mediterranean irrigation demand: historical dynamics of climate and future projections. *Water resources management*, 28(5), 1449-1462
- García-Ruiz, J.M., López-Moreno, J.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S. (2011). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105 (2011), 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>.
- Giorgi, F., Lionello, P. (2008). CC projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change* 63(2-3): 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M. (2014). 21st century CC in the European Alps—A review. *Science of the Total Environment* 493 (2014) 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>.

- Hamdan, M.R., Salman, A. (2005). Impact of irrigation water scarcity on the socio-economics of agricultural sector and food security in Jordan. *Food security under water scarcity in the Middle East: Problems and solutions*. Bari: CIHEAM, 399-407.
- Harmanny, K.S., Malek, Ž. (2019). Adaptations in irrigated agriculture in the Mediterranean region: an overview and spatial analysis of implemented strategies. *Regional environmental change*, 19(5), 1401-1416. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01494-8>.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijsman, A.J., Tsuji, G.Y., Koo, J. (2012). *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii (CD-ROM).
- INEA (2014). *Atlas of Italian Irrigation Systems*. Zucaro R, Corapi A (Eds) Istituto Nazionale di Economia Agraria, Roma. Available at: www.inea.it.
- Kahil, M.T., Connor, J.D., Albiac, J. (2015). Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe. *Ecological Economics*, 120.
- Köberl, J., Prettenthaler, F., Bird, D.N. (2016). Modelling CC impacts on tourism demand: A comparative study from Sardinia (Italy) and Cap Bon (Tunisia). *Science of the Total Environment* 543 (2016) 1039–1053. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.099>.
- Lionello, P., Scarascia, L. (2018). The relation between CC in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18 (5), 1481-1493.
- Lott, C., Tchigriaeva, E., Rollins, K. (2013). The effects of CC on residential municipal water demand in Nevada. A technical report for the Nevada EPSCoR Project: vulnerability and resilience of urban water systems under a changing climate.
- McMillan, H., Montanari, A., Cudennec, C., Savenije, H., Kreibich, H., Krueger, T., Liu, J., Mejia, A., Van Loon, A., Aksoy, H., Di Baldassarre, G., Huang, Y., Mazvimavi, D., Rogger, M., Sivakumar, B., Bibikova, T., Castellarin, A., Chen, Y., Finger, D., Gelfan, A., Hannah, D.M., Hoekstra, A.Y., Li, H., Maskey, S., Mathevet, T., Mijic, A., Pedrozo Acuña, A., Polo, M.J., Rosales, V., Smith, P., Viglione, A., Srinivasan, V., Toth, E., van Nooyen, R., Xia, J. (2016). *Panta Rhei 2013–2015: global perspectives on hydrology, society and change*. *Hydrological Sciences Journal* (2016) 61 (7), 1174–1191.
- Parandvash, H., Chang, H. (2016). Analysis of long-term CC on per capita water demand in urban versus suburban areas in the Portland metropolitan area, USA. *G. Journal of Hydrology* 538 (2016) 574–586. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.035>.
- Piniewski, M., Laize, C.L.R., Acreman, M.C., Okruszko, T., Schneider, C. (2014). Effect of CC on Environmental Flow Indicators in the Narew Basin, Poland. *Journal of Environmental Quality* Jan;43(1):155-67 <https://doi.org/10.2135/jeq2011.0386>.
- Polebitski, A.S., Palmer, R.N., Waddell, P. (2011). Evaluating Water Demands under CC and Transitions in the Urban Environment. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2011, 137: 249-257. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000112](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000112).
- Puroola, T., Lehtonen, H., Liu, X., Tao, F., Palosuo, T. (2018). Production of cereals in northern marginal areas: An integrated assessment of climate change impacts at the farm level. *Agricultural systems*, 162, 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.018>.
- Reidsma, P., Ewert, F., Lansink, A.O., Leemans, R. (2010). Adaptation to climate change and climate variability in European agriculture: the importance of farm level responses. *European journal of agronomy*, 32(1), 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.003>.
- Saadi, S., Todorovic, M., Tanasijevic, L., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., Lionello, P. (2015). CC and Mediterranean agriculture: impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield. *Agricultural Water Management*, 147, 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.008>.
- Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V., García-Bastida, P.A., Alcon, F., Martin-Gorriz, B. (2013). Effect of water scarcity and modernisation on the performance of irrigation districts in south-eastern Spain. *Agricultural water management*, 124, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.03.019>.
- Smedzik-Ambrozny K., M. Guth, S. Stepien, A. Brelik, The Influence of the European Union's Common Agricultural Policy on the Socio-Economic Sustainability of Farms (the Case of Poland). *Sustainability*, 2019, 11(24), 7173
- Spears, M., Harrison, A., Sankovich, V., Gangopadhyay, S. (2013). Literature synthesis on climate change implications for water and environmental resources. US Department of the Interior Bureau of Reclamation, Technical Memorandum, 86-68210.
- van Vliet, J.A., Schut, A.G., Reidsma, P., Descheemaeker, K., Slingerland, M., van de Ven, G.W., Giller, K.E. (2015). De-mystifying family farming: Features, diversity and trends across the globe. *Global food security*, 5, 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.03.001>.
- Wang, X.J., Zhang, J.Y., Shamsuddin, S., Oyang, R.L., Guan, T.S., Xue, J.G., Zhang, X. (2017). Impacts of climate variability and changes on domestic water use in the Yellow River Basin of China. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 22(4), 595-608. <https://doi.org/10.1007/s11027-015-9689-1>.
- Williams, J.R. (1995). The EPIC model, 1995. In: Singh, V.P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, pp. 909–1000
- Zhao, G., Webber, H., Hoffmann, H., Wolf, J., Siebert, S., Ewert, F. (2015). The implication of irrigation in CC impact assessment: a European-wide study. *Global change biology*, 21(11), 4031-4048. <https://doi.org/10.1111/gcb.13008>.

Valutazione economica di tecnologie per l'adattamento e la mitigazione in agricoltura

Viaggi D.

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Università di Bologna, Viale Fanin, 50, 40127 Bologna

Riassunto

Questo contributo propone una sintesi delle problematiche economiche legate agli effetti dei cambiamenti climatici e al ruolo delle tecnologie di adattamento e mitigazione, soffermandosi su alcuni percorsi di ricerca e valutazione economica orientati ad affrontare tali problematiche. Dopo avere esaminato i principali elementi di scenario, il lavoro discute i costi e i benefici degli interventi, mettendo in evidenza tre aspetti principali: a) i problemi aperti nella valutazione degli effetti economici; b) il tema del rischio e dell'informazione; c) il ruolo determinante e crescente delle politiche.

Abstract

The paper provides a review of economic evaluation topics linked to the effects of climate change and to technologies for adaptation and mitigation, focusing on selected research and evaluation issues. The paper deals initially with costs and benefits of climate-related actions and then focuses on three main aspects: a) the open problems in the evaluation of economic effects; b) the issue of risk and uncertainty; c) the major and growing role of public policies.

Parole chiave: cambiamento climatico; analisi economica; politiche; impatto; scenari

Introduzione

I cambiamenti climatici hanno raccolto un'attenzione crescente negli ultimi anni. All'esigenza di rispondere a tali cambiamenti, hanno fatto fronte diverse proposte tecnologiche e organizzative sia di adattamento, sia di mitigazione. Esempi del primo tipo riguardano nuove varietà, la ricollocazione geografica della produzione e l'uso più diffuso dell'irrigazione. Esempi del secondo includono tecniche di riduzione delle emissioni climalteranti, compresa la fissazione di carbonio nei suoli e nella vegetazione.

Dal punto di vista delle policy, dopo che per anni il tema del clima ha avuto un ruolo secondario negli interventi, con il Green Deal della Commissione Europea e la seguente strategia *Farm to Fork*, ha assunto invece il ruolo di driver principale degli interventi, non disgiunto dalla preoccupazione per lo sviluppo economico e la competitività.

Questo contributo propone una *overview* dei problemi di valutazione economica legati agli effetti dei cambiamenti climatici e alle tecnologie di adattamento e mitigazione, mettendo in evidenza sia i limiti dei metodi disponibili, sia alcuni possibili percorsi di sviluppo futuro.

Il lavoro è organizzato in tre sezioni principali. Nella prima si discutono costi e benefici dell'adattamento e della mitigazione del cambiamento climatico, in relazione alle decisioni delle aziende agricole e forestali. Nella seconda si affronta il tema del rischio e dell'incertezza. Nella terza si ricordano i principali temi ed esigenze di innovazione nell'ambito delle politiche. Infine, il lavoro termina con alcune considerazioni di prospettiva.

Costi e benefici dell'adattamento e mitigazione del cambiamento climatico

La comprensione del fenomeno del cambiamento climatico, in un'ottica economica, viene frequentemente declinata attraverso tre aspetti principali (McCarl et al., 2016; McCarl e Hertel, 2018): a) l'impatto del cambiamento climatico sui sistemi agricoli ed alimentari; b) la comprensione dei fenomeni di adattamento; c) il tema della mitigazione. L'insieme di queste tematiche rispecchia i costi e i benefici, nonché le opportunità ed i vincoli per il settore agricolo ed alimentare legati al cambiamento climatico.

La comprensione di tutti questi fenomeni può avere diverse chiavi di lettura. Tra queste, lo snodo principale riguarda gli effetti del cambiamento climatico e le conseguenze in termini di comportamento a livello di coltura/appezzamento e poi di azienda agricola. L'impatto sull'azienda agricola ha effetti a cascata sulle filiere e sui mercati. Gli andamenti dei prezzi delle commodities sui mercati internazionali sono stati influenzato fortemente negli ultimi decenni proprio dagli effetti del cambiamento climatico (oltre che dalla domanda), sia in termini di trend, sia in termini di volatilità dei prezzi. Questi effetti si traducono anche in impatti sulle opportunità di sviluppo economico, peraltro fortemente differenziate con danni maggiori a carico dei paesi economicamente ed istituzionalmente più deboli (Nath e Behera, 2011).

La comprensione di questi fenomeni richiede la consapevolezza (della percezione) dei costi e dei benefici del cambiamento climatico e della loro distribuzione tra gli attori. Da un punto di vista strettamente privato e "micro" il tema principale è quello della variabilità di tali costi e benefici a seconda delle condizioni aziendali ed ambientali. Come conseguenza, le strategie di adattamento da parte delle aziende possono essere molto diverse. Un tema importante in questo caso è la velocità di reazione delle aziende agli stimoli legati al cambiamento climatico. Questa dipende sicuramente dal potenziale economico del cambiamento (redditività) o dal costo del non cambiamento. A questo va sommata la percezione generale del cambiamento climatico e le relative aspettative. Anche per questo motivo, la velocità di adattamento dipende da una serie di elementi, non solo di natura economica, in buona parte comuni, più in generale, all'adozione delle innovazioni, quali: familiarità con la tecnologia, attitudine al rischio, le caratteristiche dell'azienda (dimensioni, coerenza strategica delle innovazioni proposte), le caratteristiche individuali dell'agricoltore (età, educazione, capitale umano), l'inserimento in reti che supportano o promuovono l'innovazione, l'accesso a informazione e assistenza tecnica, le relazioni di filiera (mercati input, output), il contesto istituzionale, sociale, culturale.

È importante notare anche come il cambiamento climatico abbia effetti diversi a seconda delle regioni o dei paesi, con alcune aree geografiche, ad esempio nord Europa, che potrebbero beneficiare del cambiamento climatico a differenza delle regioni mediterranee.

Un aspetto trasversale a tutti questi elementi è la componente di bene pubblico ed esternalità insita nel tema del cambiamento climatico, con riferimento ad un triplice aspetto: a) la distribuzione di costi e benefici attuali nella stessa area; b) gli impatti attraverso l'esportazione di emissioni e gli effetti globali; c) gli effetti sulle generazioni future. È importante anche la visione più generale del legame tra cambiamento climatico e gestione dei servizi ecosistemici, che contribuisce alla natura di bene pubblico del fenomeno.

Questi elementi hanno come corollario l'impossibilità di combattere il cambiamento climatico attraverso decisioni di natura puramente individuale (sia dal lato dei produttori, sia dal lato dei consumatori) e la necessità quindi dell'intervento pubblico. Per questi motivi, nell'ambito del tema del cambiamento climatico sono particolarmente importanti le politiche,

comprese quelle che interessano direttamente il settore agricolo (ad esempio le misure dei PSR), delle quali si parlerà successivamente.

Un altro aspetto importante del problema è che l'adattamento al cambiamento climatico (ma anche la mitigazione a costi ragionevoli) richiede un approccio su scala territoriale finalizzato al coordinamento nell'uso delle risorse. Esempi sono risorse come l'acqua e l'energia. Per l'acqua, ad esempio, oltre alla evidente importanza della disponibilità irrigua e del risparmio di risorsa, un tema importante è il coordinamento tra disponibilità ed uso, vista l'aumentata variabilità degli eventi piovosi, nonché il coordinamento tra fornitori ed utilizzatori (ad esempio tra agricoltori e consorzi che forniscono acqua).

Un tema emerso e divenuto preponderante negli ultimi anni è quello dell'economia circolare attraverso la chiusura dei cicli, quali quello del carbonio (incluso il riuso di biomassa), dell'acqua, e dei fertilizzanti. Da un punto di vista economico, il tema della circolarità può essere declinato in un'ottica di ricerca del livello ottimale di circolarità, tenendo conto dei costi crescenti di livelli incrementali di chiusura dei cicli.

Per quanto riguarda in particolare la mitigazione, è necessario mettere in evidenza che questa rappresenta un costo netto per le aziende che attuano misure di mitigazione. L'elemento tuttavia più importante è probabilmente la diversificazione di questo costo tra aziende, della quale è necessario tenere conto al fine di intervenire con misure che permettano azioni di mitigazione al minore costo possibile (Viaggi et al. 2016).

Dal lato della domanda di mitigazione, esistono in letterature numerosi studi sul valore economico della riduzione di emissioni. Anche in questo caso uno degli elementi principali è senza dubbio la variabilità delle stime, dovuta a differenze di metodo ed ipotesi, visto che si tratta di valutazioni in gran parte basate su scenari futuri (Gallerani et al., 2008). Studi recenti dimostrano che queste simulazioni sono corroborate da una effettiva percezione dell'importanza del cambiamento climatico, alla quale corrisponde una rilevante disponibilità a pagare da parte delle famiglie (Zavalloni et al., 2021).

Incertezza, rischio e informazione

Uno degli elementi caratteristici dell'intensificazione del cambiamento climatico riguarda l'incertezza e il rischio (Boyd e Bellemare, 2020.). L'incertezza ha diversi aspetti. Da un lato si profila il problema dell'aumento dell'incertezza a medio-lungo periodo, in termini di andamenti climatici e connessi impatti sui mercati e sulle modalità tecniche di produzione. Dall'altro, aumenta l'incertezza a breve termine, legata agli andamenti meteo caratterizzati da una tendenza all'aumento della variabilità.

Da un punto di vista decisionale, è sempre più difficile trattare questi problema secondo le classiche modalità economiche legate alla rappresentazione del rischio attraverso la configurazione di diversi stati di natura ciascuno legato ad una certa probabilità. Il motivo è che il cambiamento climatico mette in discussione sia gli stati di natura possibili (la cui gamma si sta ampliando) sia le relative probabilità che possono avere distribuzioni sempre più lontane dai dati storici.

L'aumento dell'incertezza spiega comportamento decisionali sempre più distanti dall'ipotesi di massimizzazione del profitto, in quanto gli agricoltori sono costretti sempre più spesso a scelte che permettano di contenere il rischio. Inoltre, stanno prendendo una importanza crescente gli strumenti di gestione del rischio legati a fattori climatici, quali le assicurazioni basate su indici meteo e climatici.

È importante ricordare come il contenimento del rischio sia legato anche alle capacità informative e previsionali, da cui un peso crescente di servizi come quelli agrometeorologici e quelli che rientrano nell'agricoltura di precisione legati al supporto alle decisioni (ad esempio consiglio irriguo, monitoraggio della crescita, etc.). Queste azioni di coordinamento implicano anche un ruolo importante per servizi di carattere collettivo, quali quelli informativi, che potranno beneficiare in modo sempre maggiore di tecnologie digitali, fino ad arrivare a veri e propri territori smart.

Politiche

Il tema del clima ha ormai assunto un ruolo centrale nelle policy dell'Unione Europea. Questa centralità è giustificata non solo dall'importanza del fenomeno, ma anche dalle sue numerose componenti di esternalità e bene pubblico, che, per definizione, non possono essere affrontate esclusivamente attraverso gli incentivi forniti dal mercato.

Al clima sono legati strettamente documenti strategici recenti, quali i già ricordati *European Green Deal* e *Farm to Fork*, ma anche la collegata strategia sulla Biodiversità. Come conseguenza, centrale è ormai l'aspetto climatico anche nella PAC e nella Bioeconomia in generale. La PAC vede misure di carattere climatico da tempo nel secondo pilastro, in particolare all'interno degli interventi agroambientali, ma, con la riforma prevista per il periodo 2022-2027, sono previsti importanti interventi anche nel primo pilastro, in particolare nell'ambito degli ecoschemi. La Bioeconomia ha come cardine la riduzione della dipendenza dalle fonti fossili di carbonio e l'uso di approcci per quanto possibile circolari ed è quindi guidata dall'obiettivo di ridurre l'impatto dell'economia sul cambiamento climatico.

A questa centralità e alle specificità dei problemi di carattere climatico (in particolare il legame tra dimensioni locale e globale), fa riscontro una evoluzione degli approcci e degli strumenti di policy utilizzati, nonché dei problemi di ricerca economica riguardanti lo studio delle politiche (Viaggi et al., 2021).

In primo luogo, è importante osservare una decentralizzazione degli interventi, che, pur partendo da una impostazione strategica condivisa a livello "alto" (fino al globale), delegano il disegno degli interventi ai livelli nazionali e regionali (ad esempio attraverso i piani strategici della PAC).

In secondo luogo, vista la complessità del problema, non esiste un unico strumento risolutivo, ma piuttosto la necessità di trovare appropriati policy mix per ciascuna realtà agricola e forestale e per ciascun contesto territoriale. Questo vale non solo all'interno degli strumenti dello stesso contesto di policy (come la *Green architecture* della PAC che offre di fatto un menu di soluzioni da combinare localmente), ma anche e soprattutto tra ambiti diversi di policy, ad esempio le politiche per il clima e l'ambiente e quelle legate ai settori produttivi.

Un ruolo crescente è quello del consumatore e della trasmissione lungo le filiere degli incentivi derivanti dalle scelte di acquisto. Questo richiede maggiore attenzione a strumenti informativi e di educazione. Richiede inoltre adeguate soluzioni di certificazione e contrattuali tra privati per trasmettere gli incentivi opportuni fino agli agricoltori. Un ambito di interesse emergente è proprio quello dell'inserimento di clausole legate all'ambiente e al clima all'interno di contratti di produzione. Nuovi strumenti stanno emergendo inoltre, quali pagamenti a risultato, che già in alcune realtà sono collegati al mercato dei crediti del carbonio. In particolare, una tipologia di strumenti in fase di sviluppo è quella dell'implementazione combinata di un sistema di crediti di carbonio (legato al mercato mondiale della CO₂) e di

sistemi di pagamento a risultato per le aziende agricole a forestali che si impegnano in attività di stoccaggio del carbonio (si veda la selezione di casi di studio prodotti dal progetto H2020 CONSOLE: <https://console-project.eu>).

Si tratta di un tema che offre opportunità particolari ad alcuni settori, come quello forestale e si connette alla rinnovata attenzione a specifiche risorse, quali il suolo.

Proprio per la complessità del problema e per la necessità di mobilitare attori diversi, anche gli approcci multi-attore e partecipativi hanno un ruolo particolare nell'ambito delle azioni legate al cambiamento climatico.

Conclusioni e prospettive

La lotta al cambiamento climatico rappresenta un campo in cui diventa sempre più centrale l'interazione tra impresa, territorio e dimensione globale. Da questo punto di vista, le tecnologie non rappresentano delle soluzioni di per sé, ma piuttosto delle opzioni di scelta all'interno del processo di costruzione sociale dei valori. Dal punto di vista dell'analisi economica, questi elementi comportano la necessità di muovere l'attenzione dalla "meccanica" dei costi all'"esplorazione del possibile", da studiare attraverso una opportuna valorizzazione dell'inter-, multi- e transdisciplinarietà, ma, soprattutto, da affrontare attraverso strategie in grado di valorizzare imprenditorialità e visione. In questo, resta tuttavia un ruolo centrale delle politiche, sia per le importanti componenti di bene pubblico ed esternalità dei servizi trattati, sia per la necessità di coordinamento tra attori e di anticipazione dei problemi in modo da tenere opportunamente conto della distribuzione intergenerazionale di costi e benefici.

La configurazione del problema economico del cambiamento climatico dipende dagli scenari futuri di cambiamento climatico, a loro volta strettamente legati ai trend socio-economici, sia a livello di comportamenti individuali sia a livello di governance. A questi si sommano gli scenari di cambiamento tecnologico, peraltro non indipendenti dai precedenti. In particolare, diversi percorsi evolutivi della popolazione e dei modelli di vita e consumo, possono dare luogo a diversi livelli di pressione sul clima, con risultati completamente diversi anche in termini di impatto sui prezzi agricoli e sul settore agroalimentare, forestale e della bioeconomia in generale (Riahi et al., 2017; Popp et al., 2017).

Il tema trasversale principale resta l'incertezza, che, in termini economici, si traduce nella necessità di lavorare su forme organizzative che aumentino la resilienza e permettano la riduzione del rischio. In tale contesto, le valutazioni economiche hanno un ruolo crescente, che deve essere però accompagnato da una consapevolezza dei limiti e della capacità di usare strumenti in grado di fare capire ed "apprezzare" gli elementi di indeterminatezza e di variabilità dei risultati, da vedere più che in passato non tanto come una debolezza dell'analisi economica, quanto come un aspetto essenziale del contributo informativo delle discipline economiche e sociali.

Bibliografia

- Boyd C.M. e Bellemare M.F., 2020. The microeconomics of agricultural price risk. *Annual Review of Resource Economics*, 12: 149-169.
- Gallerani V., Bartolini F., Viaggi D., 2008. Valutazione dell'impatto economico dei cambiamenti climatici sui sistemi agro-forestali. *Italian Journal of Agronomy*, 4: 33-44.
- McCarl B.A., Thayer A.W., Jones J.P.H., 2016. The challenge of climate change adaptation for agriculture: an economically oriented review. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 48 (4): 321-344.
- McCarl B.A., Hertel T.W., 2018. Climate change as an agricultural economics research topic. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 40 (1): 60-78.
- Nath P.K. e Behera B., 2011. A critical review of impact of and adaptation to climate change in developed and developing economies. *Environment, Development and Sustainability*, 13 (1): 141-162.

- Popp, A. et al. 2017. Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Global Environmental Change*, 42: 331–345.
- Riahi, K. et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42: 153–168.
- Viaggi D., Kantelhardt J., Raggi M., Villanueva A., 2021. Provision of public goods by agriculture and forestry: economics, policy and the way ahead. *Land use policy*, 107 (August 2021): 105273.
- Viaggi D., Raggi M., Minarelli F., 2016. Analisi del costo di produzione della tecnica LAA3 in confronto con LAA2 ed LAA1 nel 2015 e Valutazione delle mitigazioni ottenute sul totale GHG a livello regionale Report finale progetto ClimatechangER, Bologna.
- Zavalloni M., D'Alberto R., Raggi M., Viaggi D., 2021. Farmland abandonment, public goods and the CAP in a marginal area of Italy. *Land Use Policy*, 107: 104365.

La gestione del suolo per la mitigazione dei cambiamenti climatici

Marinari S., Chiti T.

Dipartimento per la Innovazione nei Sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali, Università della Tuscia, Via S. Camillo de Lellis, snc, 01100 Viterbo.

Riassunto

La gestione del carbonio organico del suolo (SOC) presente nei terreni agricoli rappresenta un tema centrale nella politica climatica Europea. La stima del contenuto di SOC nelle diverse tipologie di terreni coltivati e nei vari sistemi di gestione agricola (e.g. convenzionale vs. biologico) è diventata cruciale. In questa ottica le pratiche di gestione sostenibile, come la gestione dei residui e dell'acqua e l'intensità delle lavorazioni, rappresentano un valido strumento per contrastare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici e raggiungere la sostenibilità ambientale. Recentemente la creazione di un *database* per i Paesi del Mediterraneo (LIFE-MediNet) ha permesso una dettagliata caratterizzazione delle riserve di SOC nei terreni agricoli, ma allo stesso tempo ha evidenziato una mancanza di dati circa la gestione e gli effetti del cambio di gestione sul SOC nei vari contesti ambientali. Tale mancanza suggerisce nuovi spunti alla ricerca in agricoltura.

Abstract

The management of soil organic carbon (SOC) in agricultural land represents a central theme in the European climate policy. The assessment of SOC in the different agricultural systems, in particular the effect of management changes (e.g. conventional vs. organic) on SOC has become crucial. From this perspective, sustainable management of soil, waste and water as well as the processing intensity, represent a valid tool for countering the negative effects of climate change and achieving environmental sustainability. Recently the creation of a database for Mediterranean countries (LIFE-MediNet) has allowed a detailed characterization of SOC reserves in agricultural land, but at the same time highlighted a lack of data on the management effects on SOC in the various environmental contexts. This lack suggests new perspective for agricultural research.

Parole chiave: riserve di carbonio nel suolo, sistemi agricoli, gestione sostenibile,

Introduzione

La mappa del contenuto di carbonio organico dei suoli (SOC) in Europa (FAO and ITPS 2020) indica che quasi la metà dei suoli presenta un basso contenuto di SOC, principalmente nell'Europa centro meridionale (Rusco et al., 2001), ma anche in alcune zone dell'Europa nord-occidentale (Riley e Bakkegard, 2006; Sleutel et al., 2007; Barraclough et al., 2015). Il basso contenuto di SOC può essere messo in relazione principalmente con la conversione dei suoli naturali a terreni coltivati, come osservato da Arrouays et al. (1995) in Francia, dove tali diminuzioni raggiungono circa il 50% del SOC originario. Studi recenti hanno evidenziato che nei Paesi del Mediterraneo i terreni coltivati sono mediamente impoveriti in materia organica e quindi presentano una capacità potenziale di sequestrare SOC più elevata rispetto ad altri ecosistemi (Chen et al., 2019).

Nei suoli Europei sono presenti circa 70-75 gigatonnellate di carbonio (Jones et al., 2005), e tali quantità aumentano se si estende la profondità di riferimento degli inventari da 0-30 cm a 0-100 cm (Ward et al., 2016). Tuttavia, è noto che la sostanza organica si decompone più rapidamente a temperature più elevate (EEA, 2012), a condizione che ci sia umidità sufficiente,

quindi l'aumento delle temperature correlato agli attuali cambiamenti climatici aggraverà il rilascio di gas ad effetto serra (GHG) dal suolo (es. anidride carbonica o metano) a causa dell'aumento dei processi di decomposizione e mineralizzazione (Crowther et al., 2016); inoltre, l'aumento della produttività degli ecosistemi a seguito del riscaldamento globale non sembrerebbe in grado di controbilanciare la perdita di SOC dai suoli (Crowther, 2017).

Ulteriori perdite di SOC sono da mettere in relazione ad altri fattori come la gestione e il degrado forestale, il prosciugamento e la combustione delle torbiere, il disturbo eccessivo e l'insufficiente reintegro di sostanza organica nei suoli coltivati e nei pascoli, e la perdita di suolo dovuta alla crescente urbanizzazione (van der Esch et al., 2017). Gli scenari futuri del cambiamento climatico prevedono un aumento dei fenomeni di erosione eolica, soprattutto su suoli sabbiosi con scarsa copertura vegetale (Borrelli et al., 2014), ma anche un aumento della frequenza e dell'intensità delle piogge, con un aumento dei fenomeni franosi (Gariano e Guzzetti, 2016). Nelle zone meridionali dell'UE, il cambiamento climatico ridurrà la disponibilità di acqua con conseguente diminuzione delle produzioni agroalimentari. Inoltre, a causa del clima più secco si avrà un aumento del rischio di salinizzazione dei suoli delle aree costiere (Kreuzwieser e Gessler, 2010). Viceversa, nell'Europa settentrionale, il riscaldamento potrebbe aumentare le rese produttive ma, il concomitante aumento delle precipitazioni potrebbe portare ad una maggiore perdita di elementi nutritivi per lisciviazione (Brinkman, 1982).

Nel quadro delle azioni previste per il contenimento delle emissioni di GHG in atmosfera la gestione delle superfici agricole necessita particolare attenzione e la stima del contenuto di SOC nelle diverse tipologie di gestione dei suoli agricoli assume un ruolo fondamentale. In questo contesto, la gestione del SOC presente nei suoli agricoli rappresenta un tema centrale nella politica climatica Europea (decisione n. 529 del 2013 del regolamento UE), pertanto tecniche più sostenibili di gestione agricola rappresentano un valido strumento per mitigare gli effetti negativi dei cambiamenti climatici.

Sui terreni coltivati, le riserve di carbonio possono essere aumentate mediante pratiche di gestione sostenibile quali il ritorno di biomassa al suolo, la riduzione dell'intensità della lavorazione del terreno, il miglioramento della gestione dei residui organici, il miglioramento dell'efficienza e la produttività dell'uso delle risorse naturali. Nonostante si evidenzii l'importanza di una gestione sostenibile dei suoli coltivati, la letteratura internazionale, prodotta negli ultimi 20 anni, inerente lo studio degli effetti dei sistemi di gestione agricola sulle emissioni di CO₂ in atmosfera è, ad oggi, ancora limitata. Una ricerca bibliografica su Scopus utilizzando nel titolo "Soil C" oppure "Soil CO₂ emission" e nelle parole chiave, riassunto e titolo "Agricultural practices" o "Cropland management" o "Agricultural management" ha restituito 237 pubblicazioni prodotte nel periodo 1996 – 2018. Tali ricerche sono state condotte principalmente in Cina (71 articoli), in Europa (34 articoli), nel Mediterraneo (64 articoli), in Italia (22 articoli) e in altri paesi del mondo (46 articoli). Nell'ambito delle ricerche condotte sui sistemi agricoli, l'agricoltura biologica è stata particolarmente studiata per i benefici che complessivamente può fornire all'alimentazione umana e all'ambiente. Per esempio, in uno studio condotto in ambiente mediterraneo (Mancinelli et al., 2010), il sistema biologico non ha mostrato differenze nelle emissioni di CO₂ dal suolo rispetto a quelli convenzionali (8,98 Mg C-CO₂ ha⁻¹ vs. 8,06 Mg C-CO₂ ha⁻¹) nell'arco temporale di una rotazione colturale di tre anni. D'altra parte, gli input di C nel sistema biologico sono risultati mediamente superiori rispetto al convenzionale (9,46 Mg C ha⁻¹ vs. 5,57 Mg C ha⁻¹) da cui è scaturito un rapporto input/output di C mediamente più elevato nei sistemi biologici (1,10 contro 0,72). È noto che le riserve di carbonio e le emissioni di CO₂ nei sistemi agricoli sono fortemente influenzati dal tipo di

gestione in particolare dalle pratiche di fertilizzazione, irrigazione, lavorazione del suolo, gestione delle colture di copertura. Tuttavia, si registrano fluttuazioni nelle emissioni di CO₂ dal suolo in base alle condizioni stagionali, con le punte di massima nei periodi di temperatura e umidità del suolo favorevoli al processo di respirazione (Mancinelli et al., 2015). Nell'ambito degli impegni che le singole nazioni hanno rispetto agli accordi internazionali sul clima, è richiesto ai Paesi di aumentare l'accuratezza dell'inventario delle emissioni e degli assorbimenti di GHG dai suoli coltivati, in particolare per i Paesi del Mediterraneo. In questo contesto, è stata effettuata una raccolta delle informazioni esistenti sul SOC per i terreni agricoli, prati e pascoli e le loro forme di gestione, al fine di creare un *database* per la definizione di nuovi coefficienti per valutare i cambi di gestione/coltura nell'area Mediterranea.

Database progetto Medinet

Le informazioni sul SOC nei sistemi agricoli sono numerose e derivano sia da progetti di ricerca che dagli agricoltori, ma non sono sistematizzate e processate in maniera che possano essere utili ai fini dell'inventario delle emissioni e degli assorbimenti. Recentemente la creazione di un *database* per i paesi del Mediterraneo (LIFE-MediNet) ha permesso una dettagliata caratterizzazione delle riserve di SOC nei terreni agricoli. Con il progetto LIFE MediNet è stata fatta una revisione delle informazioni esistenti sul SOC per i Paesi del Mediterraneo al fine di armonizzare i dati e riunire tutte le informazioni sulla stessa coltura per produrre stime valide per tutti i paesi interessati, che presentano caratteristiche simili nei sistemi di gestione agricola e per il clima. I dati sono stati raccolti dalla letteratura scientifica, da tre *database* nazionali del suolo (CARBOSOL-Spagna, SeisNet-Spagna e INFO SOLO-Portogallo) e dal database europeo LUCAS. Tutti i dati sono stati armonizzati e, laddove necessario, trasformati per produrre stime in Mg C ha⁻¹ per ogni punto di campionario al livello standard IPCC 0-30 cm. Il *database* consolidato finale di MediNet contiene 8537 punti, distribuiti tra tutte le nazioni del Mediterraneo (Chiti et al. 2018).

L'analisi dei dati ha evidenziato come le principali differenze siano presenti tra i vari tipi di coltura e i regimi di umidità (secco vs. umido), in accordo con la classificazione climatica proposta dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC* (2006). La temperatura media annuale e il tipo di suolo sono risultati meno rilevanti. Pertanto, i dati sono stati aggregati per tipo di coltura/umidità. I dati mostrano come gli *stock* di SOC siano, indipendentemente dal tipo di coltura, sempre più elevati nei climi umidi rispetto ai climi secchi e che i vigneti sono il tipo di coltura con il minor contenuto di SOC, mentre un uso più naturale del suolo (pascoli e arbusteti), determina contenuti di SOC più elevati. L'IPCC stima le perdite o i guadagni di SOC dovuti ai cambiamenti d'uso del suolo avvengano in un arco temporale di 20 anni, mentre dopo tale periodo si presume che il suolo non stia più emettendo né sequestrando carbonio.

Sulla base dei risultati mostrati e della metodologia per il calcolo delle emissioni IPCC sopra delineata, è stato possibile perfezionare i fattori di emissione o di assorbimento nei Paesi Mediterranei che risultano dalla sostituzione di una coltura con un'altra. I risultati vengono presentati separatamente per i climi umidi e secchi (Tabelle 1 e 2).

Il progetto MediNet ha dimostrato come sia possibile trovare informazioni da più fonti, che possono essere combinate e utilizzate per migliorare in modo sostanziale la qualità dei fattori di emissione utilizzati per stimare le emissioni dai suoli agricoli e dalle praterie nella regione Mediterranea. Il progetto ha anche dimostrato che queste informazioni sono disperse e non immediatamente utilizzabili a questo scopo, almeno senza una sostanziale organizzazione, trasformazione e/o riempimento delle lacune informative. È emersa altresì una mancanza di dati

circa la gestione e gli effetti del cambio di gestione sul SOC nei vari contesti ambientali, offrendo nuovi spunti alla ricerca in agricoltura, soprattutto nell'ottica della nuova Politica Agricola Comune, che sarà attiva dal 2021.

Tabella 1. Fattori di emissione/assorbimento proposti per le transizioni di uso del suolo nei Paesi mediterranei / climi umidi.

Transizione di cambio di uso Climi Umidi		A					
		Colture annuali	Oliveti	Vigneti	Frutteti	Pascoli	Arbusteti
Da	Colture annuali	0	-1.02	-1.38	-0.78	0.70	1.51
	Oliveti	1.02	0	-0.35	0.24	1.72	2.54
	Vigneti	1.38	0.35	0	0.60	2.07	2.89
	Frutteti	0.78	-0.24	-0.60	0	1.48	2.29
	Pascoli	-0.70	-1.72	-2.07	-1.48	0	0.82
	Arbusteti	-1.51	-2.54	-2.89	-2.29	-0.82	0

Unità: Mg C ha⁻¹ a⁻¹
Numeri negativi significano emissioni / Numeri positivi significano assorbimenti
Celle grigie significano: differenze statisticamente non significative

Tabella 2. Fattori di emissione/assorbimento proposti per le transizioni di uso del suolo nei Paesi mediterranei / climi secchi.

Transizione di cambio di uso Climi secchi		A					
		Colture annuali	Oliveti	Vigneti	Frutteti	Pascoli	Arbusteti
Da	Colture annuali	0	-0.27	-0.44	-0.08	0.32	0.48
	Oliveti	0.27	0	-0.17	0.19	0.59	0.75
	Vigneti	0.44	0.17	0	0.36	0.76	0.92
	Frutteti	0.08	-0.19	-0.36	0	0.40	0.56
	Pascoli	-0.32	-0.59	-0.76	-0.40	0	0.16
	Arbusteti	-0.48	-0.75	-0.92	-0.56	-0.16	0

Unità: Mg C ha⁻¹ a⁻¹
Numeri negativi significano emissioni / Numeri positivi significano assorbimenti
Celle grigie significano: difference statisticamente non significative

Proposte

Nel contesto delle misure di adattamento e mitigazione del clima quelle che interessano il suolo assumono una particolare importanza in quanto aumentare il SOC contribuisce a migliorare il suolo come risorsa capace di fornire numerosi servizi per l'ambiente. Un maggior contenuto di SOC ne migliora la struttura e incrementa la capacità di ritenzione idrica, prevenendo fenomeni erosivi e favorendo il ripristino di terreni degradati. Pertanto, l'incremento del SOC contribuisce positivamente alla multifunzionalità degli ecosistemi. Inoltre, i suoli sono fonti di altri gas serra, in particolare protossido di azoto e metano, e le loro emissioni possono essere ridotte dalla gestione del suolo, ad es. aggiungendo alcuni tipi di materia organica (Ho et al., 2015). Rispetto alla gestione del suolo è auspicabile poter

migliorare la sua resilienza al cambiamento climatico considerando le varie aree climatiche e tipologie di suolo. Pertanto, gli approcci e le proposte devono essere necessariamente definiti su scala locale, considerando l'enorme varietà di paesaggi e di tipologie di suolo in Europa.

Conclusioni

L'ottimizzazione della sinergia tra le varie azioni di mitigazione del cambiamento climatico, e la definizione di specifici obiettivi politici richiede dati pedologici sia a livello nazionale che europeo. Rispetto alle categorie di uso del suolo, la stratificazione in specifiche sottocategorie è essenziale per ottenere stime più precise. Nei suoli coltivati, i dati disponibili sono insufficienti per determinare i coefficienti dovuti all'effetto della gestione agricola. In generale, il clima influisce particolarmente sugli stock di C (es. umido vs. secco). In questo quadro sorge la necessità di poter disporre di strumenti e tecnologie avanzate per valutare la vulnerabilità del SOC in diversi ecosistemi soggetti agli attuali cambiamenti climatici, e la resilienza del suolo al clima e all'acqua in aree di particolare interesse produttivo come quelle agricole. Infine, è necessario definire strategie politiche e nuove tecnologie per ottenere la produzione di alimenti, mangimi e bioenergia attraverso il ripristino delle aree degradate restituendo carbonio al suolo.

Bibliografia

- Arrouays D., Balesdent J., Mariotti A., Girardin C., 1995. Modelling organic carbon turnover in cleared temperate forest soils converted to maize cropping by using ^{13}C natural abundance measurements. *Plant Soil*, 173: 191–196.
- Barraclough D., Smith P., Worrall F., Black and Bhogal A., 2015. Is there an impact of climate change on soil carbon contents in England and Wales? *European Journal of Soil Science*, 66: 451–462. doi:10.1111/ejss.12253
- Borrelli P., Märker M., Panagos P., Schütt B., 2014. Modelling soil erosion and river sediment yield for an intermountain drainage basin of the Central Apennines, Italy. *Catena*, 114: 45-58
- Brinkman R., 1982. Clay transformations: aspects of equilibrium and kinetics. In: *Soil Chemistry. B. Physicochemical Models. Developments in Soil Science 5B*. G.H. Bolt (ed.). 2nd ed. Elsevier, Amsterdam. pp. 433-458.
- Chen S., Arrouays D., Angers D.A., Martin M.P., Walter C., 2019. Soil carbon stocks under different land uses and the applicability of the soil carbon saturation concept. *Soil and Tillage Research*, 188: 53-58.
- Chiti T., Pellis G., Manso S., Canaveira P., Perugini L., De Angelis P., Neves R., Papale D., Paulino J., Pereira T., Pina A., Pita G., Santos E., Domingos T., Scarascia-Mugnozza G., 2018. Soil Carbon Data on Cropland and Grassland in the Mediterranean Region. Final Report for Action A5 of Project MediNet. <http://www.lifemedinet.com/>
- Crowther T., Todd-Brown K., Rowe C., et al. 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* 540: 104–108. doi.org/10.1038/nature20150
- Crowther T., 2017. Quantifying the losses of soil carbon in response to warming at a global scale. In *FAO (2017). Proceeding of the Global Symposium on Soil Organic Carbon 2017*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome.
- EEA, European Environment Agency 2012. Variations in topsoil organic carbon content across Europe. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/soil-organic-carbon-1>
- FAO and ITPS. 2020. Global Soil Organic Carbon Map V1.5: Technical report. Rome, FAO.
- Gariano S.L., Guzzetti F., 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162: 227-252.
- Ho A., Ijaz U.Z., Janssens T.K.S., Ruijs R., Kim S.Y., de Boer W., Termorshuizen A., van der Putten W.H. and Bodelier P.L.E., 2017. Effects of bio-based residue amendments on greenhouse gas emission from agricultural soil are stronger than effects of soil type with different microbial community composition. *GCB Bioenergy*, 9: 1707-1720. doi.org/10.1111/gcbb.12457.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) 2006. In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.), *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, vol. 4. Published: IGES, Japan.
- Jones R.J.A., Hiederer R., Rusco E., Montanarella L. 2005. Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. *European Journal of Soil Science*, 56: 655–671
- Kreuzwieser J., Gessier A., 2010. Global climate change and tree nutrition: influence of water availability. *Tree Physiology*, 30: 1221–1234. doi.org/10.1093/treephys/tpq055.
- Mancinelli R., Campiglia E., Di Tizio A., Marinari S. 2010. Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by conventional and organic cropping systems in Mediterranean environment. *Applied Soil Ecology*, 46: 64-72 doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.06.013.
- Mancinelli R., Marinari S., Brunetti P., Radicetti E., Campiglia E., 2015. Organic mulching, irrigation and fertilization affect soil CO₂ emission and C storage in tomato crop in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 152: 39-51,
- Riley H., Bakkegard M. 2006. Declines of soil organic matter content under arable cropping in southeast Norway. *Acta Agric Scand Sec B Soil Plant Science*, 56(3): 217-223
- Rusco E., Jones R., Bidoglio G., 2001. Organic Matter in the soils of Europe: Present status and future trends. European Soil Bureau Soil and Waste Unit, Institute for Environment and Sustainability JRC Ispra. EUR 20556 EN.

- Sleutel S., De Neve S. & Hofman G., 2007. Assessing causes of recent organic carbon losses from cropland soils by means of regional-scaled input balances for the case of Flanders (Belgium). *Nutr Cycl Agroecosyst* 78: 265–278. doi.org/10.1007/s10705-007-9090-x
- Ward S.E., Smart S.M., Quirk H., Tallowin J.R.B., Mortimer S.R., Shiel R.S., Wilby A., Bardgett R.D., 2016. Legacy effects of grassland management on soil carbon to depth. *Global Change Biology*, 22: 2929–2938, doi: 10.1111/gcb.13246
- Van der Esch S., ten Brink B., Stehfest E., Bakkenes M., Sewell A., Bouwman A., Meijer J., Westhoek H. and van den Berg M. 2017. Exploring future changes in land use and land condition and the impacts on food, water, climate change and biodiversity: Scenarios for the Global Land Outlook. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Valorizzazione microbiologica del *biochar* per la mitigazione

Di Mattia E.

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali – DAFNE - Università Degli Studi della Tuscia via San Camillo De Lellis, snc, 01100 Viterbo

Riassunto

Il *biochar*, talvolta da intendersi come *charcoal* (ossia carbone vegetale), è un materiale solido carbonioso spesso derivante dalla pirolisi delle biomasse vegetali di scarto valorizzate energeticamente. L'impiego agrario del *biochar* nelle tecnologie per la mitigazione è in crescente aumento in quanto il materiale è in grado di erogare, in modo multifunzionale, vari servizi ecosistemici, tra i quali spicca il sequestro del carbonio, la bonifica del sistema suolo-acqua, la gestione della fertilità e dei prodotti biofertilizzanti. Il controllo degli effetti *priming* a carico della sostanza organica del suolo, talvolta indotti anche dal *biochar* e dalle pratiche di sovescio, costituisce un tema centrale di grande interesse che si collega alla valorizzazione applicativa dei materiali pirolizzati come *carrier* degli inoculanti microbici in agricoltura e nella vivaistica. Questi contesti applicativi implicano l'adozione di varie strategie di controllo della crescita microbica sul *biochar* in modo da potenziare la "qualità funzionale" dello stesso con la formazione del biofilm microbico. Il *biofilm* microbico sul *charcoal* è controllabile con tecniche di inoculazione microbica, stratificazione cellulare e controllo selettivo della biodiversità. Quest'ultimo può essere ottenuto con l'applicazione di molecole di origine batterica e vegetale in grado di modulare l'assetto microbiomico del materiale migliorandone la funzionalità biogeochimica e produttiva.

Abstract

Biochar, sometimes referred to as charcoal, (i.e. charred plant residues), is a solid carbonaceous material often derived from the pyrolysis of waste plant biomass used for energy purposes. The agricultural use of biochar in climate mitigation technologies is increasing as the material is able to provide, in a multifunctional way, various ecosystem services among which carbon sequestration, remediation of the soil-water system, management of fertility and biofertiliser products, stand out. The control of priming effects on soil organic matter, sometimes also induced by biochar and green manure practices, is a central theme of great interest that is linked to the application of pyrolysed materials as carriers of microbial inoculants in agriculture and plant nurseries. These application contexts imply the adoption of various strategies to control microbial growth on the charcoal in order to enhance its functional quality with the formation of microbial biofilm. The microbial biofilm on charcoal can be controlled with techniques of microbial inoculation, cell stratification and selective control of biodiversity, sometimes defined by the application of molecules of bacterial and plant origin that can modulate the microbiomic structure of the material improving its biogeochemical and productive functionality.

Parole chiave: PGPR, policaprolattone, *biofilm*, ramnolipidi, *priming* positivo

Introduzione

La necessità di contenere gli impatti dei cambiamenti climatici impone l'attuazione di strategie e di tecniche mitigative che comprendano varie azioni volte alla riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra ed alla riduzione delle concentrazioni di tali gas nell'atmosfera. Il *charcoal* naturale, prodotto dagli incendi boschivi, e i *biochar* vegetali, prodotti dall'attività antropica, costituiscono uno strumento di potenziamento degli effetti mitigativi del suolo come materiali ammendanti, adsorbenti e generalmente stabili alla degradazione microbica. I *biochar*

sono una categoria estremamente eterogenea di prodotti pirolizzati che si connotano per l'elevata multifunzionalità ambientale in quanto valorizzati nelle filiere bioenergetiche, nel biorisanamento del suolo e nella produttività agraria. La valorizzazione del biochar per la gestione agroambientale e per la mitigazione impone una sfida applicativa a forte carattere multidisciplinare che implichi lo studio del *biochar* in termini microbiologici per comprenderne appieno gli esiti funzionali determinati in parte dalle colonizzazioni microbiche sessili *de novo* di questo materiale che intercorrono dopo il trattamento termico-pirolitico.

Il biochar e la crescita microbica biofilmogena

Molti microrganismi, tra cui i funghi, i batteri fitopatogeni, i patogeni umani e i batteri promotori dell'accrescimento vegetale (PGPR: *Plant growth promoting rhizobacteria*) presentano varie modalità di crescita sessile, formando colonizzazioni biofilmogene persistenti e adesive su materiali diversi come ad esempio sui tessuti vegetali, sulle plastiche, sui metalli, sulle matrici silicee, sul *biochar* e su materiali ecocompatibili (Biavati e Sorlini, 2008, Lorite et al., 2013, Boni et al., 2018). Alcuni studi scientifici hanno consentito di verificare che molte specie batteriche possono formare il biofilm anche su diversi nanomateriali modificandone le proprietà topografiche, funzionali e applicative (Kargar et al., 2012, Sarioglu et al., 2015, De Cesare et al., 2017, Cheng et al., 2019). Ad esempio è stato dimostrato che le appendici batteriche (flagelli, fibrie e pili) vanno ad interagire efficacemente con la superficie del materiale assicurando la stabilizzazione cellulare anche nelle zone topograficamente più inaccessibili e degradandosi, a seguito di fenomeni fisiologici controllati, possono formare stratificazioni macromolecolari, talvolta di natura proteica, in grado di alterare le proprietà chimiche e morfologiche del nanomateriale (Rizzello et al., 2012, Friedlander et al., 2013).

La maggior parte dei materiali vegetali pirolizzati supporta la crescita microbica biofilmogena e recentemente si sta prospettando e validando l'uso applicativo del *biochar* come ammendante in grado di veicolare gli inoculanti rizobici e varie altre coformulazioni microbiche biofertilizzanti (Egamberdieva et al., 2018, Backer et al., 2018).

In uno studio recente, Ghazi (2017) ha riportato che il *biochar* ottenuto dalla paglia di riso è in grado di supportare l'inoculo di *Rhizobium phaseoli* su fagiolo rosso, favorendo la sopravvivenza rizobica e migliorando le risposte di nodulazione con specifico riferimento al peso secco dei noduli, che aumenta del 28,5% rispetto a quanto osservato per la vermiculite e la torba.

La valorizzazione degli inoculanti microbici PGPR, mediante l'applicazione diretta del biofilm PGPR, potrebbe anche costituire una strategia utile alla persistenza e alla sopravvivenza cellulare nei prodotti commerciali essendo il biofilm stesso una matrice organica strutturata e biochimicamente complessa in grado di fornire protezione e supporto metabolico per la vita microbica in quanto le popolazioni cellulari a seguito del loro rilascio ambientale, si trovano spesso impegnate a vincere la sfida dell'insediamento attivo nella nicchia rizosferico-vegetale (Backer et al., 2018). Uno studio sull'efficacia di *B. subtilis* ceppo 6051 nel biocontrollo del fitopatogeno *P. syringae* pv *tomato* DC3000 ha dimostrato la centralità del ruolo giocato dall'attività biofilmogena del ceppo di *Bacillus* correlata alla produzione di surfactina. Infatti il mutante M1 di 6051, incapace di formare biofilm e di produrre questo biosurfattante, ha manifestato una ridotta efficacia protettiva nei confronti di *Arabidopsis* come pianta ospite modello di studio (Bais et al., 2004).

Le modalità di inoculo dei PGPR su vari materiali e sul *biochar*, spesso finalizzate ad ottenere una funzionalità applicativa potenziata dei supporti, possono essere diverse e includono

tecniche di inoculazione microbica, tecniche di immobilizzazione cellulare sui materiali e di controllo selettivo della biodiversità mediante applicazione di molecole naturali condizionanti. Recentemente Chuaphasuk, & Prapagdee, (2019) hanno immobilizzato *Arthrobacter* sp. TM6 e *Micrococcus* sp. MUI su *biochar* di manioca per ottenere un *biochar* “funzionalizzato” con batteri cadmio resistenti ad attività PGPR nei confronti del Giglio di Siam per incentivare e supportare l’attività di fitorisanamento di un suolo contaminato. In questo lavoro entrambe le specie batteriche sono state coltivate in sistemi di crescita *batch* posti in agitazione a 150 rpm alla temperatura di 28 °C per 3 giorni in un mezzo un liquido di coltura M9 contenente il 2% di *biochar*. Al termine dell’incubazione le cellule, non adese al materiale, sono state eliminate dallo stesso con ripetute fasi di lavaggio in tampone fosfato 50 mM (pH 7.0) consentendo il recupero del materiale colonizzato fatto asciugare all’aria prima del suo utilizzo.

In modo analogo Boni et al., (2018), considerando la necessità di potenziare le proprietà adsorbenti del *biochar* di faggio nei confronti del cadmio, hanno ottenuto un effetto di bioattivazione del *biochar* (*biocharcoal*) inducendo la formazione di un biofilm monostratificato del ceppo 15A di *P. fluorescens* resistente ai metalli pesanti, mediante incubazione *batch* a 120 rpm a 28 °C per 4 giorni avendo cura, anche in questo caso, di eliminare le cellule planctoniche non adese mediante fasi di lavaggio del materiale e di asciugatura previo recupero su filtro. Il *biocharcoal* così ottenuto, nel confronto con quello non trattato, ha mostrato di possedere una maggiore efficacia nella rimozione del cadmio da acque contaminate (Figura 1) implementandone i parametri di adsorbimento fino a un massimo di quattro volte.

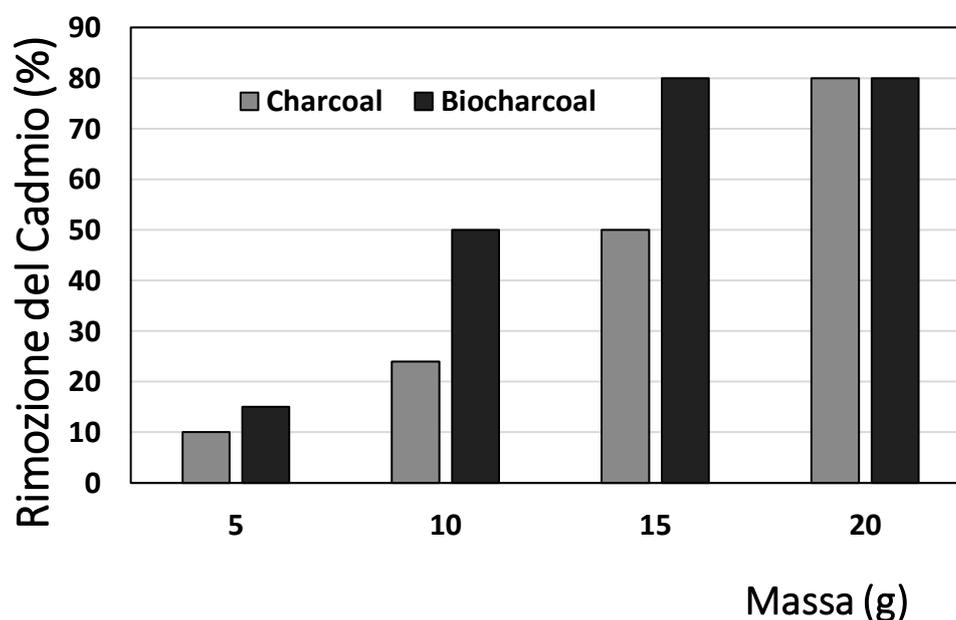


Figura 1. Rimozione del cadmio da acque contaminate applicando basse concentrazioni di Charcoal e di Biocharcoal funzionalizzato con il biofilm monostratificato di *P. fluorescens* ceppo 15A (Adattato da Boni et al., 2018).

La possibilità di stratificare e immobilizzare le cellule, aumentando lo spessore dei biofilm microbici, quando desiderati, costituisce certamente uno degli aspetti più rilevanti della loro valorizzazione ecologica, funzionale e applicativa non soltanto nel settore della rimozione dei

metalli pesanti dai reflui ma anche in quello della biofertilizzazione con i PGPR (Battin et al., 2007, Ansari & Ahmad, 2018, Suarez et al., 2019).

D'altra parte, per alcuni materiali ecocompatibili, la difficoltà di ottenere stratificazioni biofilmogene, consistenti nello spessore, è nota: Lemos et al., (2016), grazie all'uso di un apposito dispositivo di misurazione fluidodinamica ha trovato che i biofilm prodotti da *P. fluorescens* ATCC 13525 su polietilene e su acciaio inossidabile presentano notevoli e significative variazioni di spessore nell'intervallo 0-300 μm . Alcune nostre esperienze sperimentali hanno fatto riscontrare in modo analogo che la formazione di un biofilm compatto e multistrato su policaprolattone ad alta densità, da parte del ceppo 15A di *P. fluorescens* può essere difficile da ottenere (Figura 2 a e 2 b), in parte per le caratteristiche idrofobiche di questo materiale. Il *biochar* di faggio, ottenuto con pirolisi lenta e a bassa temperatura, presenta a sua volta scarsa idrofilicità e tende ad essere poco colonizzato da 15 A in termini di copertura topografica estesa (Figura 2 c e 2 d).

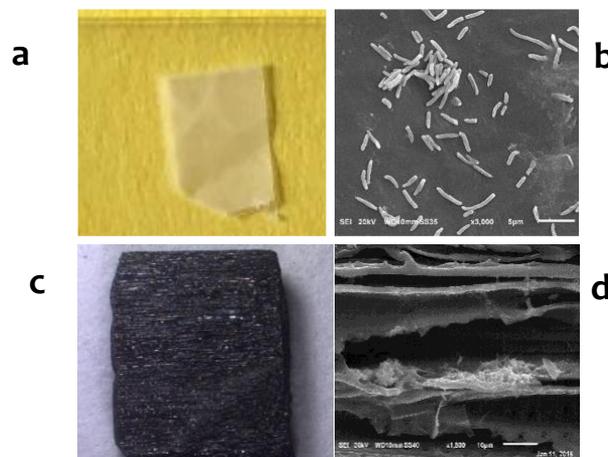


Figura 2 (a, b, c, d). Materiali *carriers* per la crescita biofilmogena monostrato di *P. fluorescens* ceppo 15A. Legenda: a) policaprolattone ad alta densità; b) biofilm di 15A su policaprolattone ad alta densità; c) biochar di faggio; d) crescita sessile di 15A su biochar di faggio (Foto Elena Di Mattia).

Le nanofibre e i nanomateriali ecocompatibili elettrofilati offrono interessanti prospettive applicative come *carriers* inoculanti per il suolo da utilizzare, eventualmente anche in modo combinato con il *biochar*, per supportare la crescita biofilmogena monospecie dei PGPR in modalità adesiva, persistente e pluristratificata (Taheran et al., 2016, De Cesare et al. 2019, De Cesare et al., 2020). De Cesare et al., (2019) hanno osservato che le nanoreti del policaprolattone elettrofilato, costituite principalmente da nanofibre con diametro medio inferiore ai 100 nm, inducono in *Burkholderia terricola*, PGPR IF25, l'espressione di vari tratti fenotipici peculiari delle fasi adesive iniziali biofilmogene: tra questi la copiosa secrezione di film condizionanti, l'assunzione di comportamenti chemiotattici specializzati e la produzione di sofisticate strutture di ancoraggio radiali.

Recentemente questo stesso gruppo di ricerca ha documentato la creazione di un nanomateriale di policaprolattone elettrofilato in grado di riprodurre in modo tridimensionale la complessità spaziale dei vari componenti del suolo nei sub-microaggregati generando una sorta di impalcatura di sostegno in grado di indurre, in *B. terricola*, la formazione di un biofilm maturo altamente complesso, stratificato e denso da valorizzare in ambito agroambientale (De Cesare et al., 2020). Ogni procedura inoculante adottata dovrebbe comunque favorire la crescita biofilmogena dei preparati microbici sulle varie tipologie di *biochar* che possono variare

notevolmente per la loro igroscopicità e idrofobicità e per le loro caratteristiche chimiche, addirittura talvolta ecotossiche (Mathew & Zakaria, 2015, Dieguez-Alonso et al., 2018). L'idrofobicità del materiale, o di alcune parti dello stesso, gioca un ruolo centrale per stabilire la forza del contatto adesivo cellulare iniziale che è modulata dal grado di idropatia cellulare della specie considerata (Cheng et al., 2019, De Cesare et al., 2020). In un nostro studio (Di Mattia et al., 2008) abbiamo riscontrato che la formazione di biofilm di *P. fluorescens*, ceppo DSMZ 50090, su materiali plastici e sintetici ad uso spaziale, poteva variare notevolmente e diminuire in funzione dell'idrofobicità degli stessi soprattutto in relazione a quanto osservato per il vetro assunto come materiale di controllo a caratteristiche maggiormente polari (Figura 3).

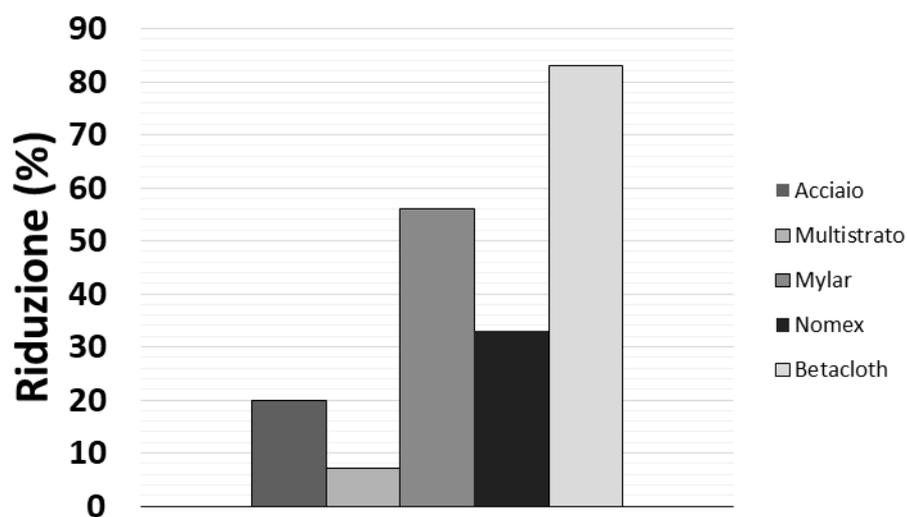


Figura 3. Riduzione % (rispetto al vetro) della formazione di un biofilm maturo di *P. fluorescens* su materiali ad uso spaziale presentanti caratteristiche diverse in termini di idrofobicità (Adattato da: Di Mattia et al., 2008).

In generale, è stato riferito che le interazioni idrofobiche sono favorite tra batteri relativamente idrofobici e superfici apolari, mentre le cellule con caratteristiche superficiali idropatiche preferiscono aderire ai materiali con caratteristiche polari (Hori e Matsumoto, 2010). De Cesare et al. (2020) hanno potuto verificare che in *B. terricola* la formazione del biofilm maturo e denso era pressoché assente nelle zone super-idrofobiche del nanomateriale in quanto principalmente localizzata in corrispondenza delle zone meno idrofobiche dell'impalcatura tridimensionale di supporto alla stratificazione.

Nel considerare il controllo della colonizzazione microbica del *biochar* è pertanto necessario valutare attentamente la sua idrofobicità e il potere selettivo, delle varie tipologie, nei confronti della biodiversità ambientale poiché questo *carrier*, in base alle interazioni apolari preferenziali con alcune specie batteriche compatibili, potrebbe essere in grado di condizionare la funzionalità microbiomica del biofilm multispecie risultante.

L'applicazione dei glicolipidi ramnolipidici di origine batterica, principalmente prodotti da *P. aeruginosa*, potrebbe essere di grande aiuto per il controllo selettivo del contatto adesivo iniziale di varie specie microbiche sui materiali idrofobici e sul *charcoal*. I ramnolipidi sono molecole naturali ecocompatibili e biocompatibili, e per la loro natura anfipatica sono valorizzati in agricoltura come agenti bagnanti e nella gestione agronomico-irrigua dei suoli, anche in forma combinata con il *biochar* (Vu et al., 2015). I glicolipidi utilizzati come sostanze naturali condizionanti si sono dimostrati in grado di promuovere o limitare la formazione dei biofilm su vari materiali (Di Mattia et al, 2008, Biavati e Sorlini, 2008) e per la loro solubilità in acqua si prestano bene per essere applicate sul *biochar* a bassa concentrazione e combinate con altre molecole naturali derivanti da scarti agricoli come il tirosolo (Figura 4) agendo anche da modulatori del *quorum sensing* (*QS*) microbico così come verificato per il ceppo 15A (Di Mattia et al., 2013).

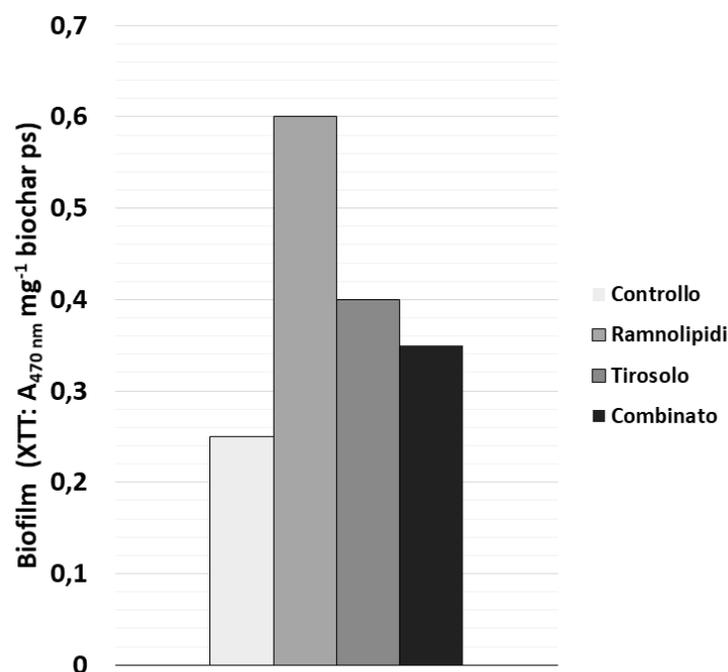


Figura 4. Aumento della formazione del biofilm di *P. fluorescens* ceppo 15 A per azione dell'effetto condizionante e modulatore del *QS* determinato dall'aggiunta di ramnolipidi batterici e di tirosolo (Adattato da: Di Mattia et al., 2013).

Il *biochar* e la mitigazione climatica: l'incognita microbiologica

Il *biochar* costituisce un prodotto di scarto, dello sfruttamento bioenergetico delle biomasse, che può contribuire consistentemente alla mitigazione climatica agendo come potenziatore del sequestro della CO₂ nel sistema suolo-pianta e microrganismi (Zimmerman & Ouyang, 2019). Se valorizzato come ammendante del suolo può costituire una forma di sostanza organica (SO) stabile con un *turnover* estremamente lento e, se usato come *carrier* di supporto all'insediamento dei consorzi microbici PGPR biofertilizzanti, può assicurare effetti biometrici consistenti di accumulo della sostanza secca vegetale nei sistemi colturali e agroforestali. L'interazione di questo materiale con i consorzi microbici tellurici è di fondamentale importanza per garantire gli effetti positivi legati ai ridotti tassi di mineralizzazione della SO

pirolizzata (pirSO) apportata al suolo e coinvolta nei fenomeni di *priming negativo* del carbonio organico. Comunque, si sta progressivamente affermando l'ipotesi che la riproducibilità degli effetti positivi indotti dal biochar sulla stabilizzazione del pool organico del suolo, sia tutt'altro che certa. Alcuni studi (Watanabe & Sato, 2015, Zimmerman & Ouyang, 2019) hanno verificato che il *biochar* può contenere varie SO labili e solubili in grado di incentivare i processi di mineralizzazione della SO del suolo attraverso la stimolazione delle attività di co-metabolismo microbico a carico di tutte le frazioni organiche e del *biochar* stesso, causando il *priming* positivo (Figura 5).

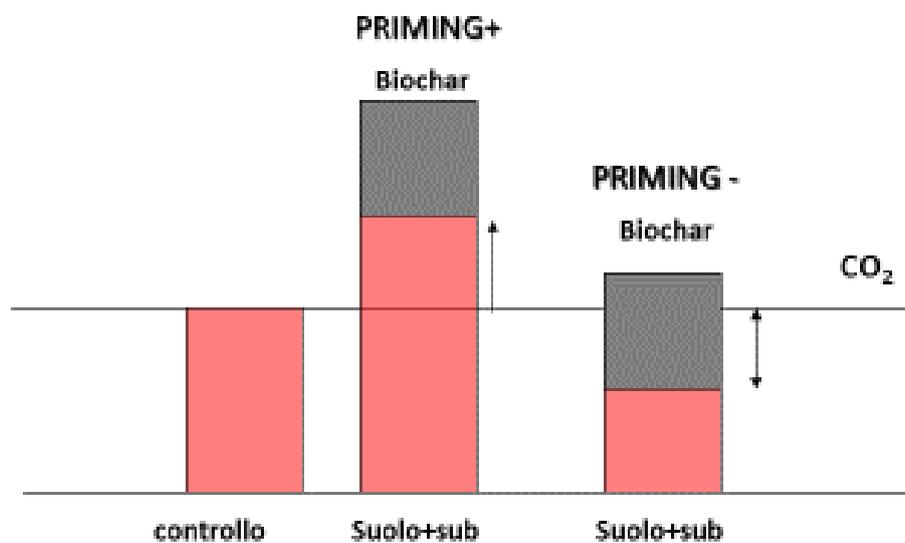


Figura 5. Effetti di *priming negativo* e di *priming positivo* indotti dal biochar e dalla SO (pirSO e SO in nero).

L'imprevedibilità degli effetti *priming*, ossia dei cambiamenti brevi e intensi del tasso di mineralizzazione della SO (pirSO o della SO labile del suolo) a causa dell'aggiunta di nuova SO, spesso vegetale, è documentata da decenni e suscita costantemente una rinnovata attenzione (Zimmerman & Ouyang, 2019). Nella prospettiva dell'uso combinato del *biochar* con varie tipologie di apporto vegetale (sovescio) e con i fertilizzanti, si sta attentamente seguendo l'esito del *priming apparente* e delle emissioni imputabili agli eventuali effetti di *priming positivo* (Watanabe & Sato, 2015). In particolare Senbayram et al. (2019) ha verificato che l'uso di *biochar* alcalini su suoli acidi produce effetti correttivi dell'acidità ma causa l'arricchimento di phyla batterici ecologicamente rilevanti nell'aumento delle emissioni.

La struttura porosa del materiale pirolizzato vegetale può effettivamente offrire varie nicchie ecologiche e micrositi favorevoli per l'insediamento microbico e la crescita sessile e Zackrisson et al. (1996) ha osservato che molti microrganismi presenti in questo habitat tendono ad essere protetti dalla predazione. Pietikäinen et al. (2000) hanno inoltre dimostrato che la comunità microbica insediata sul *charcoal* utilizza, almeno in parte, i composti organici labili che possono essere adsorbiti su questo materiale e pertanto utilizzati come substrato per la crescita. La SO labile, adsorbita sul *charcoal*, può indubbiamente esercitare azioni selettive nei confronti della crescita microbica e Nocentini et al. (2010) hanno potuto osservare che l'inoculo batterico

di un suolo bruciato, arricchito sul *charcoal* in presenza di glucosio a bassa concentrazione, poteva presentare un tratto fenotipico dominato di tipo *r* (ossia di zimogeno), ed essere associato ad una riduzione degli effetti *priming positivi* a carico del materiale pirolizzato. Quanto riportato in questo e in altri lavori attribuirebbe un ruolo significativo alla teoria ecofisiologica della *selezione r/K* (Fontaine et al., 2003) nel controllo dell'intensità co-metabolica dei processi di mineralizzazione a carico della SO e del *biochar* (Zimmerman & Ouyang, 2019). La gestione ecologica del *biochar* in termini di crescita microbica sessile dello zimogeno sarebbe pertanto da tenere in debita considerazione nel controllo del *priming positivo* indotto dalla competizione *r/k* nel *continuum* microbiomico del suolo.

La valorizzazione dei PGPR con il *biochar*, soprattutto in riferimento alle specie generalmente associate al rapido consumo dei composti labili e ai tratti fenotipici dominati *r*, così come *Bacillus* spp., *Burkholderia* spp. e *Pseudomonas* spp., potrebbe delineare interessanti prospettive applicative degli inoculanti batterici in questo ambito con specifico riferimento al controllo degli effetti mitigativi del *biochar* utilizzato come ammendante.

Conclusioni

La valorizzazione del *biochar* per la mitigazione climatica richiede a tutt'oggi di perfezionare le conoscenze delle relazioni funzionali tra i materiali vegetali pirolizzati e il microbioma tellurico-ambientale. La colonizzazione microbica del *biochar* è prettamente biofilmogena e considerando le molteplici attività di ricerca in atto sul controllo del biofilm non si può escludere che l'impiego di alcune sostanze naturali (biosurfattanti, estratti vegetali e molecole recuperate da scarti) e dei nanomateriali, renderà del tutto attuabile la valorizzazione microbiologica di questo materiale mediante il controllo selettivo della biodiversità microbica del biofilm presente sul *biochar*. La produzione di biofertilizzanti a base di batteri PGPR veicolati con *biochar* e di ammendanti *charcoal* con specie batteriche biofilmogene *r* in grado di favorire il sequestro del carbonio, potrà indubbiamente contribuire alla sfida di ridurre in agricoltura le emissioni di gas ad effetto serra.

Bibliografia

- Ansari F., Ahmad I., 2018. Biofilm Development, Plant Growth Promoting Traits and Rhizosphere Colonization by *Pseudomonas entomophila* FAP1: A Promising PGPR. *Advances in Microbiology*, 8(3): 235-251.
- Backer R., Rokem J.S., Ilangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D.L. 2018. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Biostimulants for Sustainable Agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1473.
- Bais H.P., Fall R., Vivanco J.M. (2004). Biocontrol of *Bacillus subtilis* against Infection of *Arabidopsis* Roots by *Pseudomonas syringae* Is Facilitated by Biofilm Formation and Surfactin Production. *Plant Physiology*, 134: 307-319.
- Battin T.J., Sloan W., Kjelleberg S., Daims H., Head I.M., Curtis T.P., Eberl L., 2007. Microbial landscapes: new paths to biofilm research. *Nature Reviews Microbiology*, 5: 76-81.
- Biavati B. & Sorlini C., 2008. *Microbiologia agroambientale*. Ed. Zanichelli-CEA, ISBN 978-8808-18054-4.
- Boni M.R., Chiavola, A., Antonucci, A., Di Mattia E., Marzeddu S., 2018. A novel treatment for Cd-contaminated solution through adsorption on beech charcoal: the effect of bioactivation. *Desalination and Water Treatment*, 127: 104-110.
- Cheng Y., Feng G., Moraru C.I., 2019. Micro- and Nanotopography Sensitive Bacterial Attachment Mechanisms: A Review. *Frontiers in Microbiology*, 10: 191.
- Chuaphasuk, C. & Prapagdee B., 2019. Effects of biochar-immobilized bacteria on phytoremediation of cadmium-polluted soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 23679-23688.
- De Cesare F., Di Mattia E., Macagnano A., 2017. Fishing bacteria with a nanonet. *Materials Today*, 20(5): 284-285.
- De Cesare F., Di Mattia E., Zussman E., Macagnano A., 2019. A study on the dependence of bacteria adhesion on the polymer nanofibre diameter. *Environmental Science: Nano*, 6(3): 778-797.
- De Cesare F., Di Mattia E., Zussman E., Macagnano A., 2020. A 3D soil-like nanostructured fabric for the development of bacterial biofilm for agricultural and environmental uses. *Environmental Science: Nano*, 7: 2546-2572.
- Dieguez-Alonso A., Funke A., Anca-Couce A., Rombolà A.G., Ojeda G., Bachmann J., Behrendt F., 2018. Towards Biochar and Hydrochar Engineering—Influence of Process Conditions on Surface Physical and Chemical Properties, Thermal Stability, Nutrient Availability, Toxicity and Wettability. *Energies*, 11: 496.

- Di Mattia E., Bianconi G., Canganella F., 2008. Induzione di biofilm batterici su materiali utilizzati dell'industria spaziale e valutazione dell'effetto bioprotettivo dovuto a pretrattamento con biosurfattanti. *Rivista Italiana di Compositi e Nanotecnologie*, 4(1): 7-14.
- Di Mattia E., Trovatelli F., Canganella F., 2013. Biosurfactants and Tyrosol as quorum sensing molecules affecting PGPR biofilm formation on Biochar. In Gallego, J.B., Cardinali G., Casella, S., Cocolin, L., Neviani E. - Proceedings of the second MD 2013 "Microbial Interactions in Complex Ecosystems", Ed. SIMTREA p. 309-310, ISBN 978-88-908636-5-3.
- Egamberdieva D., Hua M., Reckling M., Wirth S., Bellingrath-Kimura S.D., 2018. Potential effects of biochar-based microbial inoculants in agriculture. *Environmental Sustainability*, 1, 19-24.
- Fontaine S., Mariotti A., Abbadie L., 2003. The priming effect of organic matter: a question of microbial competition? *Soil Biology and Biochemistry* 35, 837-843.
- Friedlander R. S., Vlamakis H., Kim P., Khan M., Kolter R., Aizenberg J. 2013. Bacterial flagella explore microscale hummocks and hollows to increase adhesion. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 110, 1–6.
- Ghazi A.A., 2017. Potential for biochar as an alternate carrier to peat moss for the preparation of Rhizobia bio inoculum. *Microbiology Research Journal International*, 18(4): 1-9.
- Hori K. & Matsumoto S., 2010. Bacterial adhesion: from mechanism to control. *Biochemical Engineering Journal*, 48: 424–434.
- Kargar M, Wang J., Nain A. S., Behkam B., 2012. Controlling bacterial adhesion to surfaces using topographical cues: a study of the interaction of *Pseudomonas aeruginosa* with nanofiber-textured surfaces. *Soft Matter*, 8: 10254.
- Lemos M., Wanga S., Ali A., Simões M., Wilson D.I., 2016. A fluid dynamic gauging device for measuring biofilm thickness on cylindrical surfaces. *Biochemical Engineering Journal*, 106: 48-60.
- Lorite G.S., Janissen R., Clerici J.H., Rodrigues C.M., Tomaz J.P., Mizaikoff B., Kranz C., de Souza A.A., Cotta M., 2013. Surface Physicochemical Properties at the Micro and Nano Length Scales: Role on Bacterial Adhesion and *Xylella fastidiosa* Biofilm Development. *PLoS ONE*, 8(9): e75247.
- Mathew S. & Zakaria Z.A., 2015. Pyrolytic acid—the smoky acidic liquid from plant biomass. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 611–622.
- Nocentini C., Guenet B., Di Mattia E., Certini G., Bardoux G., Rumpel C., 2010. Charcoal mineralisation potential of microbial inocula from burned and unburned forest soil with and without substrate addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 42 (9): 1472-1478.
- Pietikäinen J., Kiikkilä O., Fritze H., 2000. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, 89: 231–242.
- Rizzello L., Galeone A., Vecchio G., Brunetti V., Sabella S., Pompa P.P., 2012. Molecular response of *Escherichia coli* adhering on to nanoscale topography. *Nanoscale Research Letters*, 7: 575.
- Sarioglu O.F., Celebioglu A., Tekinay T., Uyar T., 2015. Evaluation of contact time and fiber morphology on bacterial immobilization for development of novel surfactant degrading nanofibrous webs. *RSC Advances*, 5: 102750–102758.
- Senbayram M., Saygan E.P., Chen R., Aydemir S., Kaya C., Wu D., Bladogatskaya E., 2019. Effect of biochar origin and soil type on the greenhouse gas emission and the bacterial community structure in N fertilised acid sandy and alkaline clay soil. *Science of the Total Environment*, 660: 69-79.
- Suarez C., Piculell M., Modin O., Langenheder S., Persson F., Hermansson M., 2019. Thickness determines microbial community structure and function in nitrifying biofilms via deterministic assembly. *Scientific Report*, 9: 5110.
- Taheran M., Naghdi M., Brar S.K., Knystautas E., Verma M., Surampalli R.Y., Valero J.R., 2016. Development of adsorptive membranes by confinement of activated biochar into electrospun nanofibers. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 7: 1556–1563.
- Vu K.A., Tawfiq K., Chen G., 2015. Rhamnolipid Transport in Biochar-Amended Agricultural Soil. *Water Air Soil Pollution*, 226:256.
- Watanabe S. & Sato S., 2015. Priming effect of bamboo (*Phyllostachys edulis Carrière*) biochar application in a soil amended with legume. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61: 934-939.
- Zackrisson O., Nilsson M.C., Wardle D. 1996. Key ecological function of charcoal from wildfire in the Boreal forest. *Oikos*, 77: 10–19.
- Zimmermann A.R., & Ouyang L., 2019. Priming of Pyrogenic C (biochar) mineralization by dissolved organic matter and vice versa. *Soil Biology and Biochemistry*, 130: 105-112.

Intensificazione sostenibile dei sistemi foraggeri al servizio della zootecnia da latte

Borreani G.¹, Ferrero F.¹, Comino L.², Tabacco E.¹

¹Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari (DISAFA), Università degli Studi di Torino, Largo Braccini, 2 10095 Grugliasco (TO).

²Associazione Regionale Allevatori Piemonte (ARAP), Via Torre Roa, 13 Fraz. Madonna dell'Olmo 12100 Cuneo.

Riassunto

La produzione di alimenti di elevata qualità nutrizionale e sanitaria ottenuti dal sistema foraggero aziendale rappresenta nella situazione contingente un'opportunità imprescindibile per il contenimento degli impatti legati all'attività zootecnica. I sistemi foraggeri attuali hanno raggiunto un grado di semplificazione e intensificazione tali da richiedere un impiego sempre maggiore di fattori produttivi esterni da risorse non rinnovabili per mantenere i livelli produttivi necessari a soddisfare la domanda crescente di prodotti di origine animale. Questo ha determinato dei risvolti negativi sulla sostenibilità economica del comparto con un conseguente aumento degli impatti ambientali associati all'attività di allevamento. Ripensare all'organizzazione di un sistema foraggero dinamico, guidato dall'evoluzione dei mercati e dalla situazione climatica in continuo mutamento, basandosi maggiormente su pratiche agronomiche innovative che integrino risorse prative e leguminose foraggere con sistemi di conservazione dei foraggi efficienti, ha dimostrato di poter mitigare gli effetti legati all'emissione di gas climalteranti e all'inquinamento di acqua e suolo. Esperienze in aziende commerciali della pianura Padana che, da oltre un decennio, operano seguendo questi principi supportano la fattibilità di questo sistema.

Abstract

The production of high nutritional and health quality feeds obtained from the forage system represents an essential opportunity for reducing the impacts related to livestock activities. Current forage systems have reached a degree of simplification and intensification that require a greater use of external inputs from non-renewable resources to maintain the production levels required to satisfy the growing demand for products of animal origin. This has led to negative implications on the economic sustainability of the dairy sector with a consequent increase of environmental impacts. The organization of a dynamic forage system, that follows the evolution of markets and the climatic conditions, that is based on innovative agronomic practices that integrate grass and legume forages, and adopts efficient forage conservation systems, has shown to be useful to mitigate the effects linked to the emission of greenhouse gases and to the pollution of water and soil. Experiences in dairy farms of the Po plain, showed the feasibility of dynamic forage systems on environmental and economic sustainability.

Parole chiave: *sostenibilità filiera latte; gestione fertilizzazione azotata; autoproduzione componenti razione; consumi energetici; sistema foraggero*

Introduzione

Gli Stati europei stanno aumentando costantemente i loro sforzi in azioni politiche orientate alla riduzione delle emissioni di gas serra (GHG) nell'ambiente. Gli allevamenti di bovini da latte hanno messo in atto sistemi di gestione sempre più intensivi, che richiedono elevati input di beni durevoli e non durevoli. Questi input sono responsabili dei significativi fabbisogni energetici diretti e indiretti, che contribuiscono all'emissione di CO₂ in atmosfera

(Todde et al., 2018). L'83% dei consumi diretti e indiretti di energia delle aziende zootecniche è connesso all'utilizzo di input, di cui il 43% connesso ai concentrati proteici e il 17% ai fertilizzanti impiegati in azienda (Todde et al., 2018). Il consumo di energia è collegato al numero di capi allevati in azienda e alla produzione di latte per capo in lattazione, ma quando espressa per 100 kg di latte standardizzato per contenuto di grasso e proteina (FPCM) emerge una diluizione degli impatti con conseguente minor impatto delle aziende più produttive (Figura 1). Dalla Figura 1 emerge anche che gli input consumati contribuiscono per più del 50% alle emissioni di CO₂ equivalenti. Ne consegue che ogni azione in grado di migliorare l'efficienza degli input esterni (gasolio, fertilizzanti azotati, consumo di plastica, agrofarmaci, concentrati proteici per gli animali, ecc.) senza ridurre la produttività è in grado di ridurre significativamente gli impatti sull'emissione di gas climalteranti.

Negli ultimi anni, ricercatori, *decision makers*, consumatori e il mercato delle materie prime più volatile hanno indirizzato le aziende zootecniche a identificare modelli di gestione più sostenibili che permettano di mantenere la redditività economica. Negli ultimi decenni, il comparto del latte è stato interessato da un processo di semplificazione dei sistemi foraggeri e di intensificazione produttiva, che nel territorio italiano ha visto la riduzione del numero di aziende, la crescita del numero di capi allevati in azienda e della loro capacità produttiva, e il conseguente aumento della quantità di latte prodotta per ettaro di superficie coltivata (Alvarez et al., 2008; Borreani et al., 2013; Bava et al., 2014).

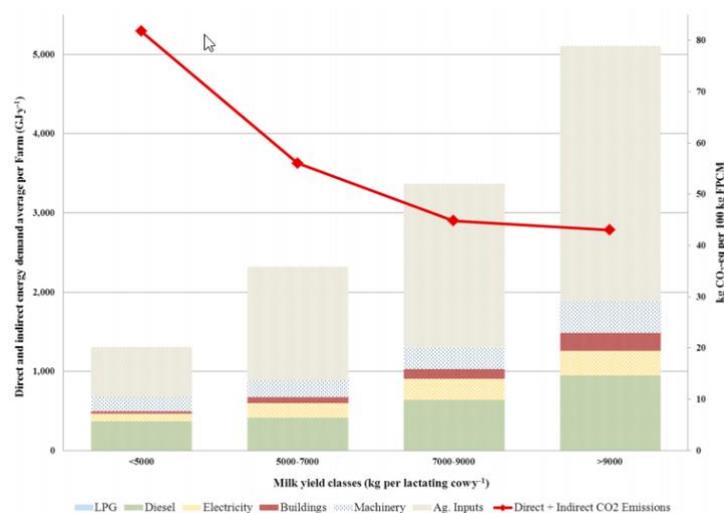


Figura 1. Fabbisogno energetico diretto e indiretto espresso come media per azienda zootecnica (GJ/anno) e relative emissioni di carbonio dirette e indirette per produrre 100 kg di latte (Da Todde et al., 2018).

Contemporaneamente, l'intensificazione dei sistemi di allevamento è stata accompagnata da una forte crescita della coltivazione del mais da insilato e di erbai foraggeri ad alti input sulle superfici aziendali in tutta Europa, mentre la componente proteica delle razioni alimentari è stata lasciata alla farina di estrazione di soia acquistata dal mercato internazionale (Borreani et al., 2013; Lehuger et al., 2009).

In quest'ottica, per rispondere alla forte richiesta a livello mondiale di prodotti di origine animale, risulta necessario mantenere elevate le produzioni, e uno degli strumenti più efficaci per ridurre gli impatti delle aziende zootecniche da latte è quello di aumentare l'efficienza produttiva, tecnica, agronomica ed economica dei sistemi più intensivi.

Efficientamento del bilancio azotato e valorizzazione dei reflui zootecnici

La produzione dei fertilizzanti soprattutto quelli azotati contribuisce in maniera rilevante al consumo diretto e indiretto di energia a livello globale, e nel caso degli Stati Uniti, contribuisce per circa il 30% di tutta l'energia consumata in agricoltura (Beckman et al., 2013). Negli ultimi 50 anni a livello globale si è osservata una diminuzione dell'efficienza di uso dell'azoto a livello dei sistemi colturali (Figura 2; Lassaletta et al., 2014), questo significa che, per ogni kg di azoto impiegato in campo, sempre meno azoto viene asportato nelle produzioni agrarie, aumentando il rischio di lisciviazione e volatilizzazione di molecole contenenti azoto che contribuiscono ad incrementare gli impatti ambientali connessi alle attività agricole. Parte della riduzione di questa efficienza è da imputare ad un aumento delle quantità di fertilizzanti azotati di sintesi non coerente con gli asporti di azoto nella produzione delle colture. La necessità di ridurre gli apporti di concimi di sintesi è anche legata all'aumento della fissazione di azoto da parte di sistemi colturali che hanno previsto l'aumento delle leguminose foraggere e da granella per soddisfare i crescenti fabbisogni di proteina a livello globale e all'aumento dei fertilizzanti organici derivanti dalle attività zootecniche (Figura 2). Riportare alla parità il bilancio tra gli output di azoto asportato con le produzioni agrarie e gli input di azoto ricevuti dalle colture in campo (fertilizzanti azotati di sintesi, deposizione atmosferica, azotofissazione e azoto organico) è uno degli obiettivi principali per contribuire alla sostenibilità ambientale e alla riduzione dei costi delle attività agricole nel loro complesso.

Passando dal livello di sistema colturale all'intero sistema azienda, si osserva che nel caso particolare delle aziende zootecniche, l'azoto che viene introdotto deriva prevalentemente da due fonti: dai fertilizzanti azotati e dall'acquisto di alimenti zootecnici dal mercato. Infatti, da un'analisi dei flussi di azoto in 46 aziende zootecniche della Pianura Padana risulta che il 70% dell'azoto che entra nel sistema proviene dagli alimenti acquistati, soprattutto per soddisfare i fabbisogni proteici degli animali in lattazione (Figura 3). Ne consegue che le possibili azioni di riequilibrio del bilancio del sistema azienda devono agire su differenti aspetti quali la riduzione delle concimazioni azotate di sintesi; il miglioramento dell'efficienza di utilizzo dei reflui zootecnici attraverso la riduzione delle perdite; l'aumento dell'autoproduzione di alimenti proteici sulla superficie agricola utilizzata (SAU); e l'aumento dell'efficienza di conversione della proteina in stalla (più proteina nel latte con razioni a minor contenuto proteico). A ulteriore supporto della necessità di riportare l'equilibrio negli apporti di azoto, l'alterazione del bilancio (apporti – asporti) contribuisce ad aumentare l'emissione di protossido di azoto in atmosfera, come riportato in Figura 4, nel caso della coltura del frumento concimata con 0 kg N/ha, 144 kg N/ha (dose prossima agli asporti colturali) e 288 kg N/ha (dose sbilanciata) (Powlson et al., 2011). Si può osservare che creando uno sbilancio negli apporti, le emissioni di N₂O aumentano di oltre 4 volte rispetto a quelle di una dose di concimazione equilibrata.

Anche un utilizzo più efficiente dei reflui concorre a ridurre il surplus di sistema. Il beneficio è sia diretto, perché una maggiore quota di azoto apportato dai reflui può essere utilizzato dalle colture (riduzione della volatilizzazione), sia indiretto, perché il maggior apporto di azoto organico consente di ridurre i quantitativi di fertilizzanti azotati di sintesi. Occorre adottare metodologie che consentono l'interramento immediato o l'iniezione dei reflui per ridurre le perdite di volatilizzazione dell'ammoniaca, ricorrere alla separazione della parte solida per incrementare l'efficienza di trasporto negli appezzamenti aziendali più lontani e poter utilizzare la parte chiarificata per un'eventuale fertirrigazione, e infine effettuare la digestione anaerobica per ottenere una maggiore disponibilità dell'azoto nel breve periodo (Webb et al., 2013).

La capacità potenziale di accumulo di sostanza organica nel suolo (SOC) a seguito di somministrazione di fertilizzanti organici viene alterata quando si creano forti sbilanci nell'apporto di azoto (Poffenbarger et al., 2017). Infatti, il sistema suolo in queste condizioni non è più in grado di accumulare SOC e i processi di mineralizzazione e di denitrificazione aumentano esponenzialmente la quantità di azoto inorganico (nitrati e ammoniacale) nel suolo (Figura 5), con maggior rischio di inquinamento delle acque di falda e dell'atmosfera.

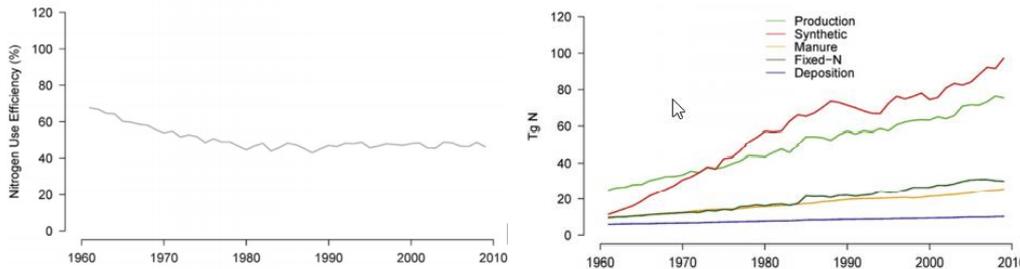


Figura 2. Efficienza di uso dell'azoto (NUE) a livello mondiale negli ultimi 50 anni ed evoluzione dei componenti del bilancio globale di azoto a livello dei sistemi colturali (Da Lassaletta et al., 2014).

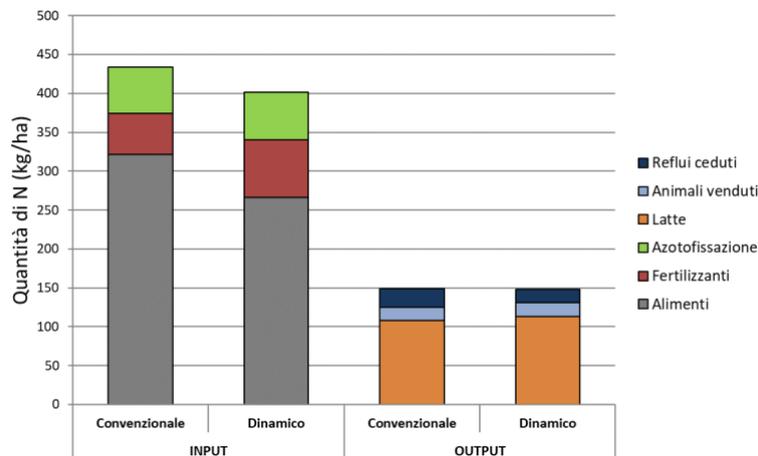


Figura 3. Flussi di N per ettaro di superficie coltivata in 46 aziende zootecniche da latte in Pianura Padana.

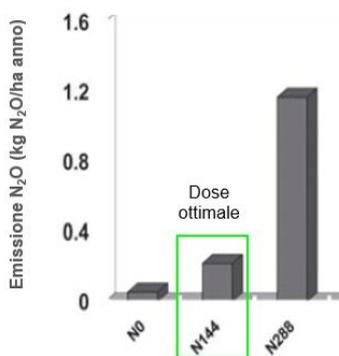


Figura 4. Emissioni di protossido di azoto (N_2O) nella coltura del frumento in relazione alla dose di concimazione azotata (Da Powlson et al., 2011).

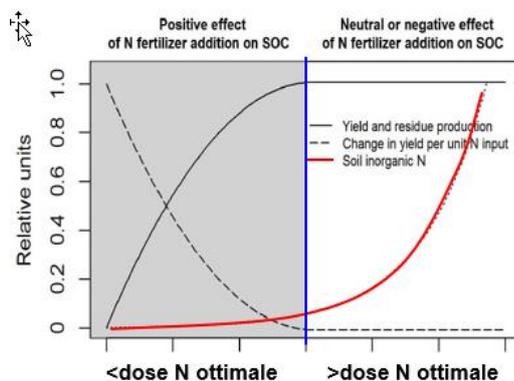


Figura 5. Effetto della dose di N applicato alle colture in relazione alla produttività della coltura, alla disponibilità di azoto inorganico nel suolo e alla capacità di accumulare sostanza organica nel suolo a seguito dell'aggiunta di sostanza organica (Da Poffenbarger et al., 2017).

Ruolo del sistema foraggero nel migliorare la sostenibilità dell'azienda zootecnica

L'organizzazione e la gestione del sistema foraggero aziendale al servizio della stalla diventa uno dei punti chiave per ridurre la pressione sull'ambiente senza sacrificare il ritorno economico dell'azienda (Tabacco et al., 2018). Per questo obiettivo occorre incrementare la produzione aziendale di energia netta latte e di proteina utilizzabile per unità di superficie coltivata, evitando nel contempo di incrementare l'utilizzo di input produttivi che rischia di aumentare l'impatto ambientale dell'attività agricola nel suo complesso. Gli strumenti da adottare prevedono la valorizzazione di doppie colture, di prati avvicendati e leguminose foraggere, la massimizzazione dell'efficienza produttiva per unità di input esterno, la valorizzazione dei reflui aziendali per ridurre le concimazioni minerali e il mantenimento dei prati permanenti per la loro capacità di immagazzinare carbonio organico nei suoli. Quindi diventa strategica la massima valorizzazione in stalla degli alimenti autoprodotti sulla SAU aziendale attraverso la formulazione di razioni efficienti che valorizzino la componente proteica di leguminose foraggere e da granella. Per ottenere foraggi di alta qualità risulta necessario scegliere lo stadio ottimale di raccolta e adottare sistemi di conservazione efficienti che permettano di mantenere l'energia netta latte e la componente proteica del foraggio in campo. Attraverso l'adozione di sistemi di insilamento che consentono di abbinare il taglio precoce dei foraggi prativi alla massima efficienza di conservazione, è possibile ottenere un aumento della produttività del sistema foraggero nel suo complesso e della quantità di latte prodotto per ettaro di superficie coltivata (intensificazione sostenibile). In Figura 6 è riportato l'effetto dell'adozione di sistemi foraggeri dinamici (anni 2018-2019) in 8 aziende della Pianura Padana rispetto alla situazione convenzionale (anno 2014). È evidente il concetto di intensificazione sostenibile, che si esprime in una maggiore quantità di latte per ettaro supportata dal sistema foraggero e da una riduzione dei quantitativi di azoto minerale impiegato nella campagna.

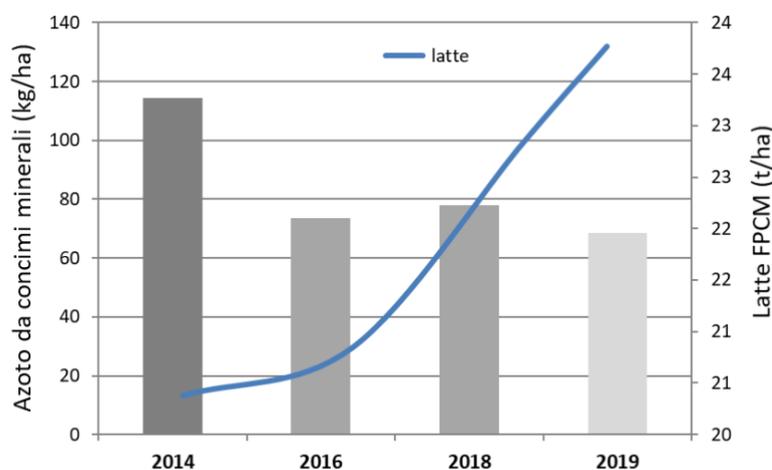


Figura 6. Effetto della conversione aziendale da sistema foraggero basato sulla monosuccessione del mais a sistemi foraggeri dinamici in 8 aziende zootecniche da latte della Pianura Padana sulla produzione media di latte per ettaro coltivato e sull'utilizzo di azoto minerale (Life project Forage4Climate).

La produzione di alimenti sulla SAU deve essere programmata in relazione alle esigenze delle differenti categorie di animali (rimonta, asciutta e gruppi produttivi) per migliorare le efficienze e ridurre gli sprechi che accrescono gli impatti ambientali e diminuiscono il ritorno

economico dell'azienda. Tabacco et al. (2018) sulla base dei dati raccolti a livello di azienda agricola in Pianura Padana hanno osservato che l'adozione di un sistema foraggero dinamico associata alla formulazione di razioni sempre più efficienti (*precision feeding*), ha il potenziale di ridurre del 20% i costi di produzione di una tonnellata di sostanza secca (s.s.) e nel contempo ridurre le emissioni di CO₂ equivalenti del 17% rispetto al sistema convenzionale basato sulla coltura del mais in monosuccessione (Tabella 1). Tali risultati sono stati ottenuti con la riduzione dell'impiego dei concimi minerali azotati a seguito della valorizzazione dei reflui aziendali e all'azotofissazione delle leguminose foraggere introdotte nel sistema foraggero (32% della SAU). L'impiego di agrofarmaci si è ridotto grazie al ripristino della rotazione colturale per la coltura del mais e all'introduzione dei prati avvicendati che hanno ridotto la pressione delle infestanti del mais in monosuccessione e di alcuni insetti quali la *Diabrotica virgifera virgifera*. Il ripristino della rotazione colturale ha permesso, oltre al mantenimento delle produzioni di s.s. per ettaro (16,5 t/ha per il sistema dinamico verso 15,3 t/ha del sistema in monosuccessione), di fornire più energia metabolizzabile (EM) e proteina grezza per unità di superficie rispetto al sistema precedente (177 vs. 154 GJ di EM/ha e 1930 vs. 1241 kg proteina/ha).

Tabella 1. Fattori della produzione e costi per ottenere 1 tonnellata di sostanza secca o di proteina (modificato da Tabacco et al., 2018) (p.a., principio attivo).

Per produrre	Sistema foraggero		Riduzione (%)
	Convenzionale	Dinamico	
Azoto minerale (kg)			
1 t di s.s.	4,7	1,6	-65
1 t di proteina	58	15	-75
Agrofarmaci (g p.a./ha)			
Diserbanti	1314	171	-87
Insetticidi	85	13	-85
Energia consumata (GJ)			
1 t di s.s.	1,6	1,3	-23
1 t di proteina	20	11	-43
Manodopera (h)			
1 t di s.s.	1,30	1,28	-2
1 t di proteina	16	11	-31
Costi sostenuti (€)			
1 t di s.s.	83	66	-20
1 t di proteina	1116	569	-44
Carbon footprint (kg CO₂-eq)			
1 t di s.s.	249	207	-17
1 t di proteina	3063	1824	-40

Supponendo che le tendenze dei prezzi delle materie prime rimangano simili a quelle dell'ultimo decennio, questa analisi indica che il sistema foraggero dinamico può essere un'alternativa sempre più redditizia rispetto a sistemi foraggeri basati sulla monocoltura del mais, fornendo nel contempo una riduzione degli impatti ambientali legati al consumo di input nei campi e nella stalla.

Conclusioni

L'adozione di nuovi modelli di sistemi foraggeri dinamici disegnati al servizio della stalla permette di ridurre l'impronta carbonica insieme ai costi di produzione del latte e il potenziale

ecotossicologico dell'attività agricola, migliorando l'efficienza energetica dell'intero sistema produttivo e conseguendo appieno l'obiettivo di un'intensificazione sostenibile della produzione di latte in Pianura Padana.

Parte dei risultati presentati sono frutto del lavoro svolto nell'ambito dell'attività del WP 2 del Progetto TECH4MILK «Tecnologie e soluzioni innovative al servizio della filiera latte piemontese per promuoverne la competitività e la sostenibilità» finanziato nell'ambito del POR FESR 2014/2020 - Azione I.1b.2.2. Piattaforma tecnologica bioeconomia della Regione Piemonte.

Bibliografia

- Bava L., Sandrucci A., Zucali M., Guerri M., Tamburini A., 2014. How can farming intensification affect the environmental impact of milk production? *Journal Dairy Science*, 97: 4579-4593.
- Beckman J., Borchers A., Jones, C.A., 2013. Agriculture's supply and demand for energy and energy products. EIB-112, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, May 2013.
- Borreani G., Coppa M., Revello-Chion A., Comino L., Giaccone D., Ferlay A., Tabacco E., 2013. Effect of different feeding strategies in intensive dairy farming systems on milk fatty acid profiles, and implications on feeding costs in Italy. *Journal of Dairy Science*, 96: 6840-6855.
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environmental Research Letters*, 9: 105011.
- Poffenbarger, H.J., Barker D.W., M.J. Helmers M.J., Miguez F.E., Olk D.C., Sawyer J.E., Six J., Castellano M.J., 2017. Maximum soil organic carbon storage in Midwest U.S. cropping systems when crops are optimally nitrogen-fertilized. *Plos ONE*, DOI:10.1371/journal.pone.017229.
- Powlson D.S., Whitmore A.P., Goulding K.W.T., 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62: 42-55
- Tabacco E., Comino L., Borreani G., 2018. Production efficiency, costs and environmental impacts of conventional and dynamic forage systems for dairy farms in Italy. *European Journal of Agronomy*, 99: 1-12.
- Todde G., Murgia L., Caria M., Pazzona A., 2018. A comprehensive energy analysis and related carbon footprint of dairy farms, Part 2: investigation and modeling of indirect energy requirements. *Energies*, 11: 463. doi:10.3390/en11020463.
- Webb J., Sørensen P., Velthof G., Amon B., Pinto M., Rodhe L., Salomon E., Hutchings N., Burczyk P., Reid J., 2013. An assessment of the variation of manure nitrogen efficiency throughout Europe and an appraisal of means to increase manure N efficiency. *Advances in Agronomy*, 119: 371-442.

Impatto del cambiamento climatico (*global warming*) sulla produzione di latte

Bernabucci U.

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali – DAFNE - Università degli Studi della Tuscia - Via San Camillo De Lellis, snc, 01100 Viterbo.

Riassunto

La qualità e la salubrità degli alimenti sono aspetti cruciali. I fattori ambientali, climatici in particolare, assumono una forte importanza in tutta la filiera produttiva del latte. Il cambiamento climatico (*global warming*), associato ad un aumento della durata e della intensità di condizioni di stress da caldo, influisce negativamente sulla quantità e sulla qualità del latte, sulla efficienza riproduttiva e sulla salute degli animali, con alterazione delle caratteristiche casearie del latte, aumento della incidenza di mastiti e di altre malattie e riduzione dei tassi di concepimento soprattutto in animali ad alta capacità produttiva. Interventi di tipo nutrizionale e strutturale possono mitigare le condizioni di stress da caldo; è altresì necessaria la selezione di soggetti più resistenti e resilienti, attraverso interventi di miglioramento genetico.

Abstract

The quality and healthiness of food are crucial aspects. The environment, such as the climate, is an important factor for the entire milk production chain. Climate change (*global warming*), associated with an increase in the duration and intensity of heat stress conditions, negatively affects the quantity and quality of milk, reproductive efficiency and animal health, with alteration of the cheesemaking characteristics of milk, increased incidence of mastitis and other diseases and reduced conception rates especially in animals with high productive capacity. Nutritional and structural interventions can mitigate the conditions of heat stress, also necessary is the selection of more resistant and resilient subjects, through genetic improvement interventions.

Parole chiave: milk yield, milk quality, cheesemaking properties, climate change, heat stress.

Introduzione

Il cambiamento climatico, definito come lo squilibrio a lungo termine delle condizioni meteorologiche come la temperatura, il vento e le caratteristiche delle precipitazioni di una regione specifica, è una delle principali sfide che l'umanità deve affrontare. Il clima terrestre si è riscaldato nell'ultimo secolo ($0,74 \pm 0,18$ °C) con gli anni '90 e 2000 che sono stati i più caldi in assoluto (IPCC, 2007). Il cambiamento climatico è una sfida fondamentale per l'umanità poiché influisce in modo profondo e pervasivo sul modo in cui viviamo sul nostro Pianeta. Tutte le attività umane sono influenzate dalla variabilità del clima e dal suo cambiamento, dovuto sia a fattori naturali (cambiamenti dei cicli naturali dei meccanismi atmosferici e oceanici), sia alle attività antropiche (produzione di gas serra).

La fase di intenso riscaldamento globale che stiamo vivendo negli ultimi decenni, è iniziata in modo inequivocabile dagli anni '50 e ha mostrato un'accelerazione dalla fine degli anni '80 come evidenziato da molti studi (IPCC 2014, Baldi et al., 2006, Zampieri et al., 2016). Questo aumento ha influenzato sia la temperatura media mensile che i valori stagionali insieme agli eventi climatici estremi (IPCC, 2014).

Il riscaldamento globale (Figura 1) produce effetti misurabili attraverso indicatori fisici come, ad esempio, l'innalzamento del livello del mare, l'aumento del contenuto di calore degli

oceani, la diminuzione della copertura superficiale di neve e ghiaccio (sia marina che terrestre), l'aumento della frequenza di giornate molto calde e di piogge molto intense (IPCC, 2014).

La crescente preoccupazione per il comfort termico degli animali da allevamento è giustificata non solo per i Paesi che occupano zone tropicali, ma anche per Paesi in zone temperate dove le temperature ambientali elevate stanno diventando un problema (Nardone et al., 2010, Segnalini et al., 2011, 2013).

Lo stress termico influenza negativamente la produttività degli animali da allevamento e quindi mette a repentaglio sia la filiera alimentare umana che l'economia del settore. I progressi nelle strategie di gestione alleviano in parte l'impatto dello stress da caldo sulle prestazioni degli animali durante le stagioni calde. Tuttavia, gli effetti negativi dello stress da caldo diventeranno più evidenti in futuro se il cambiamento climatico continuerà, come previsto, e se la popolazione mondiale e l'approvvigionamento alimentare continueranno ad aumentare (Rousch, 1994).

Effetto dello stress da caldo sulla produzione di latte

Gli animali iniziano molte risposte acute di acclimatazione per sopravvivere allo stress termico, ma alcuni di questi adattamenti possono alla fine influire negativamente sulla produttività a lungo termine.

L'effetto negativo dello stress da caldo sulla produzione di latte è noto. Johnson et al. (1962) hanno mostrato una riduzione lineare della produzione di latte (-0,26 kg / giorno) quando il THI (*temperature-humidity index*, Armstrong, 1994) superava il valore di 70. In uno studio di due anni condotto in condizioni di campo, abbiamo riscontrato una diminuzione di 0,27 kg di latte per unità THI solo se le vacche Holstein sono state esposte a THI superiore a 68 (Figura 2) e risultati simili sono stati riportati da Ravagnolo et al. (2000). In un nostro studio (Bernabucci et al., 2014) abbiamo riscontrato che la produzione di latte è influenzata sfavorevolmente dal THI a partire da 8 giorni prima del giorno del test (Figura 3). L'effetto negativo più elevato è stato osservato 4 giorni prima del giorno del test. In particolare, le perdite di latte sono state le seguenti: 0,91, 1,16 e 1,27 kg/giorno per la prima, la seconda e la terza lattazione, rispettivamente. Bouraoui et al. (2002) in uno studio di due anni, hanno trovato una correlazione negativa tra la produzione di latte e il THI giornaliero ($r = -0,76$). La produzione di latte è diminuita di 0,41 kg/capo/giorno per ogni aumento di unità THI superiore a 69. Bohmanova et al. (2007) hanno riportato diversi tassi di declino della produzione di latte per unità di THI, che vanno da -0,40 a -0,27 e da -0,59 a -0,23 kg in Georgia e Arizona, rispettivamente.

Effetto dello stress da caldo sulla qualità del latte

Lo stress da caldo influisce negativamente anche sulla qualità del latte (Bernabucci e Calamari, 1998; Calamari e Mariani, 1998; Bernabucci et al., 2002, 2014, 2015; Bertocchi et al., 2014). Al di sopra di 72 THI, il contenuto di proteine del latte diminuisce, mentre la risposta del contenuto di grassi del latte sembra ritardata, con risultati talvolta contraddittori.

Bernabucci et al. (2014), considerando la percentuale di proteine e la resa, hanno osservato che l'effetto del THI era significativo e la perdita giornaliera di proteine variava da -0,02 a -0,10 %/giorno e da -0,01 a -0,07 kg/giorno. L'effetto dello stress da caldo sul contenuto di grassi del latte non è chiaro e sono stati riportati risultati controversi. Abeni et al. (1993) hanno trovato valori più bassi del contenuto di grassi del latte quando il valore del THI era

superiore a 75 (3,46 g/100 g punto di THI <75 vs. 3,17 g/100 g punto di THI > 75, rispettivamente). Bernabucci et al. (2015) hanno riportato una marcata e significativa diminuzione del grasso del latte durante l'estate (3,20 g/100 g) rispetto ai valori osservati in inverno (3,80 g/100 g) e in primavera (3,61 g / 100 g). Inoltre, Summer et al. (1999) hanno osservato una diminuzione del contenuto di grassi del latte durante l'estate rispetto all'autunno, che andava da un minimo in giugno-agosto (3,36-3,38 g/100 g) ad un massimo in novembre (3,67 g/100 g). Al contrario, Cowley et al. (2015) non hanno riscontrato differenze significative per il contenuto di grassi del latte tra vacche in condizioni di termoneutralità o sottoposte a stress termico da caldo.

Infine, gli effetti negativi del THI sulle proteine del latte e sul grasso sono stati chiaramente dimostrati nei nostri studi retrospettivi (Figura 4, Bertocchi et al., 2014).

Confrontando la produzione di latte durante l'estate e la primavera in un allevamento da latte situato nell'Italia centrale, abbiamo riscontrato una minore produzione di latte (-10%) e anche una percentuale di caseina e un indice di caseina (rapporto caseina/proteine totali) inferiori in estate rispetto alla primavera (2,18 vs. 2,58% e 72,4 vs. 77,7%, rispettivamente; Bernabucci et al., 2002). Per quanto riguarda il contenuto di caseina del latte, Cowley et al. (2015) hanno trovato differenze tra le vacche allevate a condizioni di termoneutralità e il gruppo stressato (28,1 vs. 26,8 g/L, rispettivamente). In accordo, Bernabucci et al. (2015) hanno riscontrato un contenuto di caseina nel latte più elevato in inverno (2,75 g/100 g) e in primavera (2,48 g/100 g) rispetto alla stagione estiva (2,27 g/100 g).

La caseina del latte è costituita da diverse frazioni, denominate caseine α_s1 , α_s2 , β , κ e γ . L'effetto dello stress da caldo in vacche esposte a stress termico sulle frazioni di caseina del latte e la loro distribuzione è stato studiato da Cowley et al. (2015). Questi autori hanno riscontrato per le vacche sottoposte a stress termico, un aumento della caseina α_{s1} (%) e, al contrario, una diminuzione della caseina α_{s2} . Bernabucci et al. (2015) hanno trovato che il latte prodotto in estate aveva un contenuto inferiore di α_s -caseine ($\alpha_{s1} + \alpha_{s2}$) e maggiore di κ -caseina rispetto alle altre stagioni, mentre la β -caseina era simile. Questi risultati potrebbero portare a cambiamenti delle proprietà tecnologiche delle caseine e ad una diversa attitudine di caseificazione del latte.

Infatti, le condizioni climatiche influiscono in modo significativo sulle proprietà di coagulazione del latte. Abeni et al. (1993) hanno riportato un tempo di coagulazione aumentato (negativo) quando il valore del THI era superiore a 75. Questo risultato è in accordo con quello di Mariani et al. (1994) che hanno osservato i valori massimi per il tempo di coagulazione in luglio (18,97 min) e agosto (19,42 min) e il minimo in gennaio (15,73 min). Inoltre, il tempo di rassodamento della cagliata è significativamente maggiore (negativo) quando le vacche sono sottoposte a stress da caldo. Abeni et al. (1993) hanno osservato un aumento del tempo di rassodamento della cagliata quando il valore del THI era superiore a 75. Gli stessi autori hanno osservato una diminuzione della consistenza del coagulo sempre con valori di THI superiori a 75. Questo risultato è stato confermato da un nostro studio (Bernabucci et al., 2015), in cui è stata osservata una significativa diminuzione della compattezza della cagliata in estate (21,98 mm) rispetto ad inverno (35,93 mm) e primavera (33,60 mm).

Le caratteristiche igienico-sanitarie del latte possono risentire dell'effetto dello stress da caldo (Figura 4). Le cellule somatiche del latte sono principalmente leucociti; aumentano nel latte in risposta ad un'inflammation o infezione nella ghiandola mammaria. Per quanto riguarda le variazioni stagionali, Bernabucci et al. (2015) e Summer et al. (1999) hanno riportato un aumento del contenuto di cellule somatiche in estate rispetto alle stagioni invernali

e primaverili. Infatti, analisi del latte prodotto nel nord Italia dimostrano che in estate il contenuto di cellule somatiche aumenta (Bertocchi et al., 2014, Figura 4).

D'altra parte, le alte temperature influenzano e possono favorire la crescita e la proliferazione di batteri anche patogeni e dei loro vettori, come le mosche. È noto che una maggiore presenza di batteri ambientali aumenta il rischio di infezione della mammella. I livelli più elevati di batteri totali nel latte sono stati osservati durante l'estate (Figura 4).

Come risultato, le caratteristiche del latte prodotto da vacche allevate in condizioni di stress da caldo portano ad un peggioramento della resa in formaggio (la quantità di formaggio ottenuta da 100 kg di latte). Mariani et al. (1995) hanno riportato variazioni stagionali della resa del formaggio Grana Padano a 24 ore e hanno osservato valori minimi nei mesi di luglio e agosto, mentre la resa in formaggio più alta è stata riscontrata nei mesi di ottobre e novembre (Figura 5).

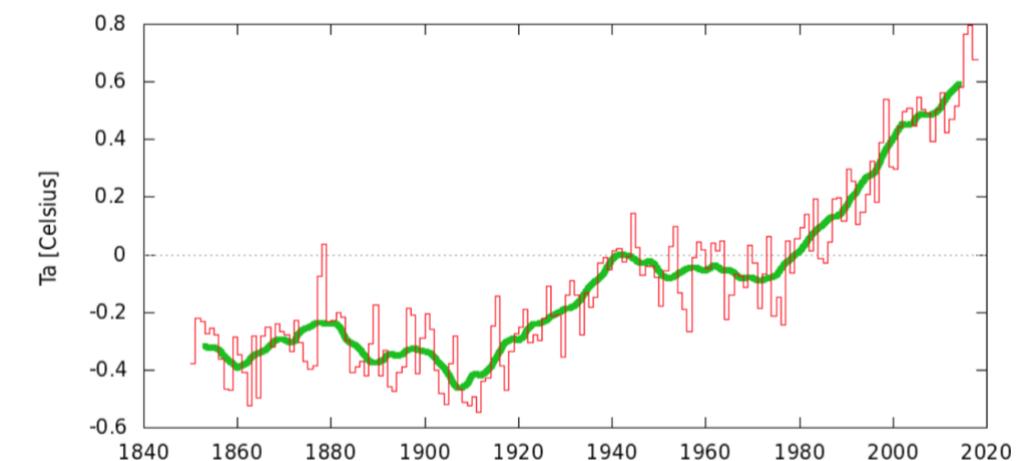


Figura 1. Temperatura media annuale globale (°C) alla superficie, basata sul dataset HadCRUT4 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>) (adattato da Pasqui e Di Giuseppe, 2019).

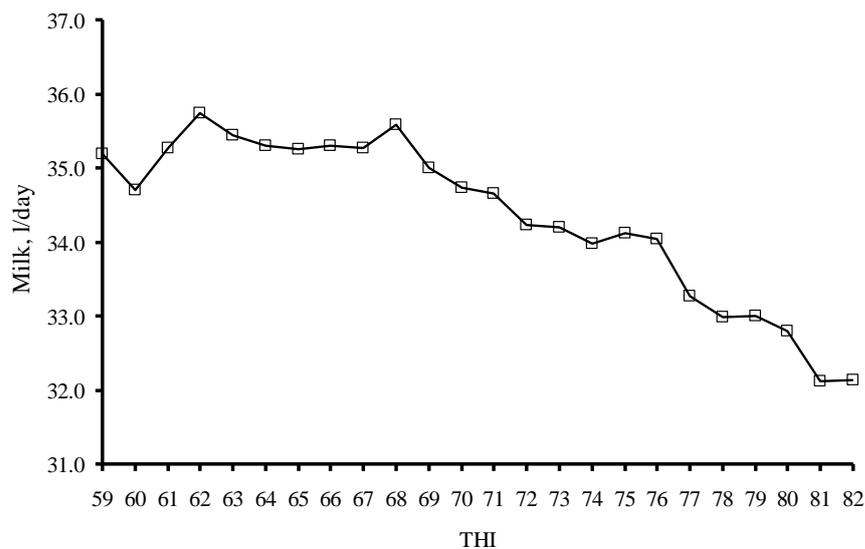


Figura 2. Effetto del *temperature-humidity index* (THI) sulla produzione di latte in vacche di razza Frisona (adattato da Bernabucci et al., 2014).

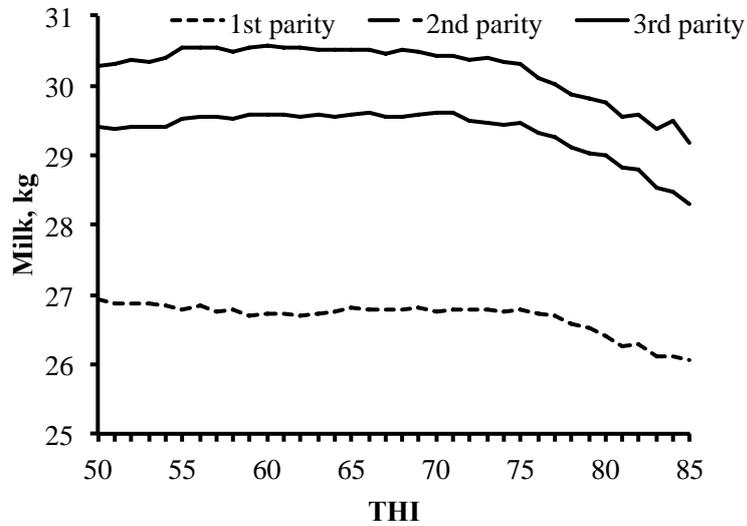


Figura 3. Andamento della produzione di latte in vacche da latte di razza Frisone in funzione del numero di lattazione (*parity*) e del *temperature-humidity index* (THI) (adattato da Bernabucci et al., 2014).

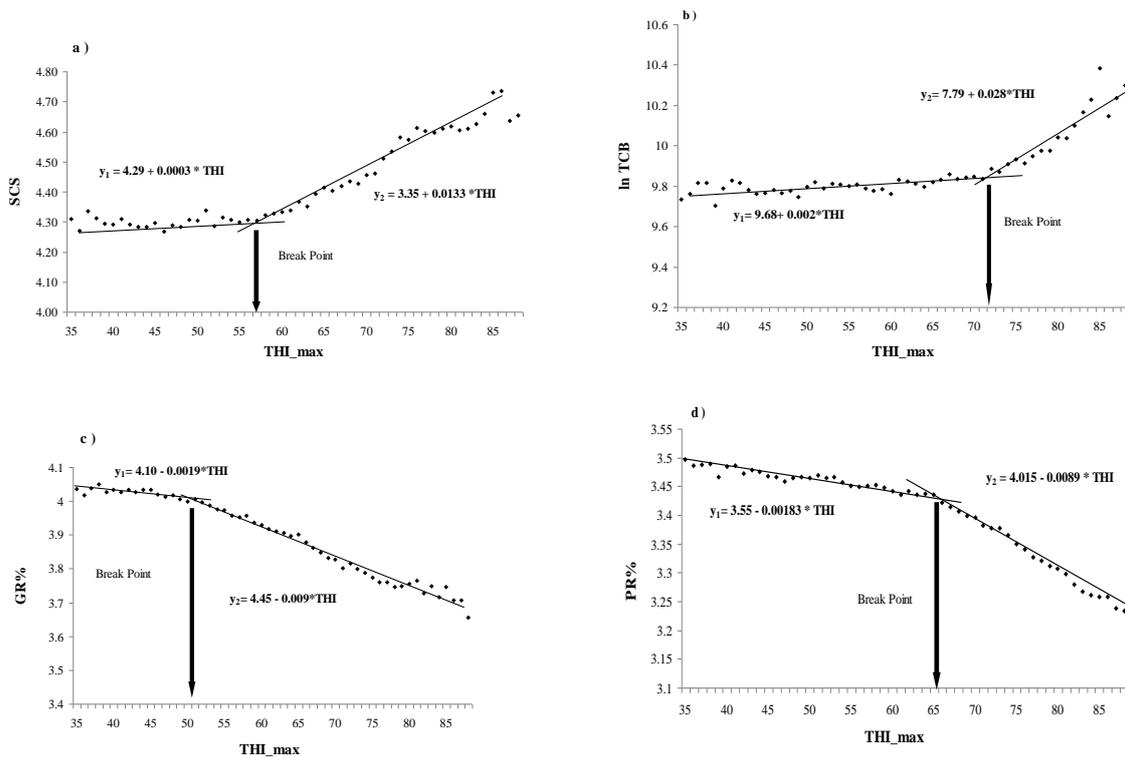


Figura 4. Caratteristiche del latte in relazione all'indice THI (*temperature-humidity index*) registrato due giorni prima del giorno del campionamento. È stato rilevato un *break-point* a: 57,3 THI per (a) le cellule somatiche (SCS); 72,8 THI per (b) la conta batterica totale (LnTBC); 50,2 THI per (c) la percentuale di grasso (GR%); 65,2 THI per (d) la percentuale di proteine (PR%) (adattato da Bertocchi et al., 2014).

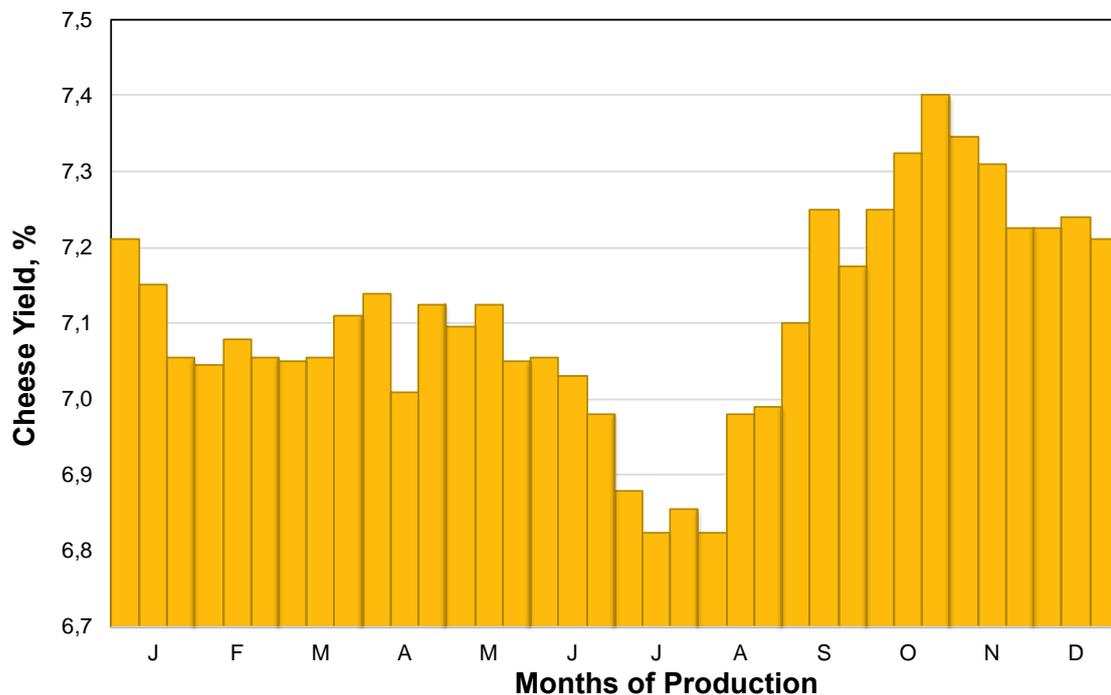


Figura 5. Resa in Grana Padano (%) (adattato da Mariani et al, 1995).

Conclusioni

Lo stress da caldo estivo influisce negativamente sulla resa e sulla qualità del latte. La gravità dei problemi dovuti allo stress da caldo diventerà sempre più un problema in futuro con il progredire del riscaldamento globale e la selezione genetica per la produzione di latte.

Lo stress termico sia direttamente (mediato dall'ipertermia) che indirettamente (mediato da un ridotto apporto di nutrienti e da cambiamenti comportamentali) influisce sull'acclimatazione metabolica e fisiologica che può ridurre la sintesi di prodotti utili (latte in particolare). Una migliore conoscenza della relazione funzionale tra gli animali e il loro ambiente e dei meccanismi fisiologici di acclimatazione agli stress ambientali può contribuire all'adozione di procedure che migliorano il benessere e l'efficienza della produzione. Comprendere i meccanismi biologici con cui lo stress termico riduce la sintesi del latte è fondamentale per lo sviluppo di nuovi approcci (genetici, gestionali e nutrizionali) per mantenere la produzione o minimizzarne la riduzione durante i mesi estivi stressanti.

Bibliografia

- Abeni F., Calamari L., Maianti M.G., Cappa V., Stefanini L., 1993. Effetti dello stress termico sulle bovine in lattazione ed accorgimenti alimentari miranti ad attenuarne l'impatto su quantità e qualità del latte prodotto. *Annali Facoltà di Agraria U.C.S.C.* 33: 151-170.
- Armstrong D.V., 1994. Heat stress interaction with shade and cooling. *Journal of Dairy Science*, 77: 2044-2050.
- Baldi M., Dalu G., Maracchi G., Pasqui M., Cesarone F., 2006. Heat waves in the Mediterranean: a local feature or a larger-scale effect? *Int. J. Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26: 1477-1487.
- Bernabucci U., Calamari L., 1998. Effects of heat stress on bovine milk yield and composition. *Zootecnica e Nutrizione Animale*, 24: 247-257.
- Bernabucci U., Lacetera N., Ronchi B., Nardone A., 2002. Effects of the hot season on milk protein fractions in Holstein cows. *Animal Research*, 51: 25-33.

- Bernabucci U., Biffani S., Buggiotti L., Vitali A., Lacetera N., Nardone A., 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 97: 471-486.
- Bernabucci U., Basiricò L., Morera P., Dipasquale D., Vitali A., Piccioli Cappelli F., Calamari L., 2015. Effects of summer season on milk protein fractions in Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 98: 1815-1827.
- Bertocchi L., Vitali A., Lacetera N., Varisco G., Nardone A., Bernabucci U., 2014. Seasonal variation in the composition of Holstein cow's milk and temperature-humidity index relationships. *Animal*, 8: 667-674
- Bohmanova J., Misztal I., Cole J.B., 2007. Temperature humidity indices as indicators of milk production losses due to heat stress. *Journal of Dairy Science*, 90: 1947-1956.
- Bouraoui R., Lahmar M., Majdoub A., Djemali M. Belyea R., 2002. The relationship of temperature-humidity index with milk production of dairy cows in a Mediterranean climate. *Animal Research*, 51: 479- 491.
- Calamari L., Mariani P., 1998. Effects of hot environment conditions on the main milk cheesemaking characteristics. *Zootecnica e Nutrizione Animale* 24: 259-271.
- Cowley F.C., Barber D.G., Houlihan A.V., Pioppi D.P., 2015. Immediate and residual effects of heat stress and restricted intake on milk protein and casein composition and energy metabolism. *Journal of Dairy Science*, 98: 2356-2368.
- IPCC, 2007. The Intergovernmental Panel on Climate Change 4th Assessment Report, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm#2.
- IPCC, 2014. Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A : Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., White L.L., editors. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Johnson H.D., Ragsdale A.C., Berry I.L., Shanklin M.D., 1962. Effects of various temperature-humidity combinations on milk production of Holstein cattle. Research Bulletin no. 791. University of Missouri, College of Agriculture, Agricultural Experimental Station, USA.
- Mariani P., Zanzucchi G., Pozzatti A., Summer A., Fossa E., Pecorari M., 1994. [Variazioni mensili dell'acidità e delle caratteristiche di coagulazione del latte nel corso di un triennio]. *Ann. Fac. Med. Vet. Univ. Parma* 14: 133-148.
- Mariani P., Summer A., Maffezzoli F., Zanzucchi G., 1995. Variazioni stagionali della resa del latte in formaggio Grana Padano. *Annali Facoltà di Medicina Veterinaria Università di Parma* 15: 159-166.
- Nardone A., Ronchi B., Lacetera N., Ranieri M.S., Bernabucci U., 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science*, 130: 57-69.
- Pasqui M., Di Giuseppe E., 2019. Climate change, future warming and adaptation in Europe. *Animal Frontiers* 9: 6-11.
- Ravagnolo O., Misztal I., 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. *Journal of Dairy Science*, 83: 2126-2130.
- Roush W., 1994. Population – the view from Cairo. *Science*, 265: 1164-1167.
- Segnalini M., Nardone A., Bernabucci U., Vitali A., Ronchi B., Lacetera N., 2011. Dynamics of the temperature-humidity index in the Mediterranean basin. *International Journal of Biometeorology*, 55: 253-263
- Segnalini M., Bernabucci U., Vitali A., Nardone A., Lacetera N., 2013. Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin. *International Journal of Biometeorology*, 57: 451-458.
- Summer A., Formaggioni P., Tosi F., Fossa E., Mariani P., 1999. Effects of the hot-humid climate on rennet-coagulation properties of milk produced during summer months of 1998 and relationships with the housing systems in the rearing of Italian Friesian cows. *Annali Facoltà di Medicina Veterinaria, Università di Parma* 19: 167-179.
- Zampieri M., Russo S., di Sabatino S., Michetti M., Scoccimarro E., Gualdi S., 2016. Global assessment of heat wave magnitudes from 1901 to 2010 and implications for the river discharge of the Alps. *Science of Total Environment*, 571: 1330-1339.

Strategie agronomiche di adattamento ai cambiamenti climatici per la cerealicoltura

Casa R., Rossini F., Ruggeri R.

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali (DAFNE), Università degli Studi della Tuscia, Via San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo.

Riassunto

Numerosi studi effettuati negli ultimi anni a diverse scale, da regionale a globale, utilizzando sia dati sperimentali che modellistica, evidenziano preoccupazioni riguardo al mantenimento degli attuali livelli produttivi per il frumento e, soprattutto, della stabilità temporale a seguito dei cambiamenti climatici. Ad esempio, c'è preoccupazione a riguardo della resilienza climatica dell'attuale *pool* varietale del frumento duro disponibile in Italia, identificato in base alla diversità di risposte a situazioni meteorologiche estreme durante il ciclo colturale. Si prevede anche che la qualità, ad esempio in termini di contenuto proteico della granella, sia inferiore e più variabile e particolarmente problematica da conciliare con elevate rese, soprattutto in aree con frequente stress idrico. L'analisi di variabili della resa e della qualità, registrate nelle prove varietali di frumento duro effettuate a Viterbo nel corso degli ultimi anni, offre interessanti informazioni rispetto alla sensibilità delle attuali varietà a situazioni climatiche avverse, la cui frequenza è evidenziata dall'analisi della serie storica dei dati agrometeorologici.

Le strategie agronomiche di adattamento a questa situazione spingono verso un approccio più dinamico nelle pratiche colturali, quali ad esempio la fertilizzazione, reso possibile dall'enorme progresso nelle tecniche di monitoraggio, da remoto o da terra, di variabili del suolo e della coltura. La ricerca ha ancora molto da fare per sviluppare approcci gestionali che integrino tutta la mole di dati disponibili, e che per loro natura non sono facilmente generalizzabili, essendo fortemente condizionati dalle specificità spaziali e temporali.

Abstract

Numerous studies carried out in recent years on different scales, from regional to global, using both experimental and modelling data, highlight concerns about the maintenance of current production levels for wheat and, above all, of temporal stability as a result of climate change. For example, there is concern about the climate resilience of the current varietal durum wheat pool available in Italy, identified based on the diversity of responses to extreme weather situations during the crop cycle. It is also expected that the quality, for example in terms of grain protein content, is lower and more variable and particularly problematic to reconcile with high yields, especially in areas with frequent water stress. The analysis of yield and quality variables, recorded in the varietal durum wheat tests carried out in Viterbo over the last few years, offers interesting information regarding the sensitivity of current varieties to extreme climatic situations, the frequency of which is highlighted by the analysis of the historical series of agrometeorological data.

Agronomic strategies to adapt to this situation push towards a more dynamic approach in crop practices, such as fertilization, made possible by the enormous progress in remote or ground monitoring techniques of soil and crop variables. The research still has a lot to do to develop management approaches that integrate all the amount of data available, and that by their nature are not easily generalisable, being strongly conditioned by spatial and temporal specificities.

Parole chiave: *frumento duro; confronto varietale; resilienza; qualità; agricoltura di precisione*

Introduzione

Secondo le analisi dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), gli ultimi sei anni (2015-2020), sono stati probabilmente i più caldi mai registrati. Anche le ultime medie quinquennali (2016-2020) e a 10 anni (2011-2020) delle temperature globali sono le più alte da quando sono iniziate le misurazioni meteorologiche (WMO 2020). Agli attuali livelli di emissioni globali di gas a effetto serra, il mondo è in rotta per superare le soglie di temperatura concordate nell'Accordo di Parigi di 1,5 °C o 2 °C a fine secolo, rispetto ai livelli preindustriali (media 1850-1900).

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulle produzioni cerealicole sono già visibili e sono la causa più probabile della stagnazione delle rese di frumento (e di altri cereali, eccetto il mais, una coltura C4), registrate in Europa a partire dagli anni '90 (Brisson et al. 2010; Schaubberger et al. 2018). Analisi estensive di dati di prove sperimentali di pieno campo, in ambienti diversi, con diverse date di semina, ed in alcuni casi con un innalzamento artificiale della temperatura (con lampade ad infrarossi), hanno dimostrato che all'aumentare della temperatura media durante la stagione colturale si accorciano le fasi fenologiche e si ha una riduzione della resa (Asseng et al. 2015). Considerando diverse metodologie, sia con modelli meccanicistici che statistici basati su dati sperimentali, si stima che ogni aumento di 1°C della temperatura globale possa portare ad una riduzione nella produzione globale di frumento pari al 6% (Zhao et al. 2017).

E' stato suggerito che due caratteristiche sono utili per l'adattamento del frumento alle temperature più elevate, ma solo se presenti contemporaneamente: 1) allungamento del periodo di accrescimento per ritardare l'antesi e 2) un maggior tasso di riempimento delle cariossidi (Asseng et al. 2019). Nei sistemi ben fertilizzati e senza stress idrico iniziale, una coltura con fioritura tardiva accumulerà più biomassa ed avrà una resa potenzialmente più elevata. Ma se poi viene esposta a maggior stress termico a fine stagione, il riempimento delle cariossidi e la resa finale saranno ridotti (Asseng et al. 2015). Tuttavia, negli ambienti Mediterranei, in presenza di limitazioni di acqua e di azoto, si è riscontrato che aumenti stagionali della temperatura fino a 2 °C possono portare ad un aumento delle rese, accorciando il ciclo ed evitando così lo stress idrico e termico a fine stagione (Asseng et al. 2015). Comunque, studi volti a determinare la resilienza dei sistemi produttivi cerealicoli, in particolare del frumento duro, nell'area del Mediterraneo, hanno evidenziato, sulla base dell'analisi di serie temporali, che la sicurezza dei sistemi produttivi è già minacciata da un aumento di 1,5°C della temperatura globale (Zampieri et al. 2020).

La resilienza dei sistemi produttivi cerealicoli rispetto ai cambiamenti climatici è alla base della capacità di mettere al riparo la filiera produttiva dalle incertezze e dalla variabilità generata da situazioni od eventi meteorologici avversi, che si verificano durante la stagione colturale. La capacità di una cultivar di produrre bene in condizioni di variabilità climatica è limitata; pertanto, è necessaria una serie di cultivar con risposte diverse alle condizioni meteorologiche critiche per la produzione, poiché la diversità delle risposte ai disturbi è considerata un fattore determinante della resilienza (Kahiluoto et al. 2019). Recentemente, è stato evidenziato che il panorama varietale del frumento duro presente in Italia mostra una bassa diversità di risposta ai fattori meteorologici avversi e che, in generale, la resilienza climatica del frumento è in declino a livello europeo (Kahiluoto et al. 2019).

Oltre all'impatto dei cambiamenti climatici sulla produzione, vi è anche preoccupazione per quello su aspetti qualitativi, quali il contenuto proteico della granella, importante per la trasformazione e per il valore nutrizionale. Si prevede che i cambiamenti climatici possano

portare ad un contenuto proteico minore e ad una maggiore variabilità, soprattutto in aree con bassa piovosità (Asseng et al. 2019).

Risulta dunque interessante esaminare il comportamento delle principali varietà di frumento duro coltivate in Italia, rispetto alla variabilità delle condizioni climatiche, per trarre indicazioni in merito a possibili pratiche agronomiche di adattamento. A questo proposito, informazioni preziose possono essere fornite dall'analisi delle prove varietali effettuate annualmente dalla rete nazionale di confronto su frumento duro.

Ogni anno la "Rete nazionale di confronto tra varietà di frumento duro", coordinata dal CREA, prevede la realizzazione di prove in varie località dislocate su gran parte del territorio nazionale, in areali tradizionalmente vocati o con potenzialità di espansione per questa coltura. Il dipartimento DAFNE dell'Università degli Studi della Tuscia è un'unità operativa di questa rete collocata nell'areale Centro-versante tirrenico. Nel presente lavoro si è dunque valutata la risposta in termini di quantità e qualità della produzione alla variabilità climatica, delle cultivar di frumento duro in prova a Viterbo nel periodo 2011-2018.

Materiali e metodi

La sperimentazione si è svolta durante gli anni 2011-2018, presso l'azienda agraria didattico-sperimentale "Nello Lupori" dell'Università degli Studi della Tuscia (lat.42°43'N, long. 12°07'E, alt. 310 m). Per la prova si è utilizzato uno schema sperimentale a blocchi randomizzati con 3 ripetizioni. Ogni anno sono testati differenti genotipi di frumento duro, solo alcuni dei quali presenti in tutti gli anni, che sono stati utilizzati per la presente analisi. Le prove si sono svolte su parcelle con larghezza e lunghezza standard, rispettivamente di 1,50 m e 7,00 m. L'appezzamento sperimentale ha una giacitura pianeggiante, ed una tessitura di medio impasto. La Rete nazionale di confronto tra varietà di frumento duro prevede l'adozione di un protocollo comune, utilizzato in agricoltura convenzionale.

Il tasso di riempimento delle cariossidi è stato calcolato dal rapporto tra la produzione di granella e l'intervallo in giorni tra la spigatura e la raccolta (Asseng et al. 2019). Nell'azienda agraria è presente dal 1984 una stazione agrometeorologica automatica, posta a poche centinaia di metri dall'appezzamento in cui si sono svolte le prove varietali. I dati agrometeorologici di temperatura, pioggia ed evapotraspirazione di riferimento (ET_o), calcolata con la formula di Penman-Monteith, sono stati utilizzati per evidenziare relazioni con le variabili produttive del frumento duro nelle diverse fasi del ciclo colturale. In particolare, sono state esaminate le relazioni tra variabili produttive e pioggia, temperatura minima e massima, radiazione solare, evapotraspirazione di riferimento e deficit idrico, calcolato come differenza tra pioggia ed ET_o, nei seguenti periodi: dalla semina a 30 giorni successivi, attorno alla spigatura (da 7 giorni prima a 14 giorni dopo), nel periodo tra la semina e la spigatura e tra la spigatura e la raccolta.

Risultati

Gli andamenti della produzione di granella delle diverse varietà in prova a Viterbo negli anni 2011-2018 (Fig. 1A) hanno mostrato una tendenza simile, che pare rispondere soprattutto all'andamento della pioggia nel mese successivo alla semina (Fig. 1B), mentre l'andamento del contenuto proteico della granella (Fig. 1C) è risultato apparentemente riflettere soprattutto l'andamento della temperatura massima dalla spigatura alla raccolta (Fig. 1D), durante la fase di riempimento delle cariossidi. Il peso ettolitrico (Fig. 1E) è, invece, risultato correlato negativamente soprattutto con la pioggia nel periodo spigatura-raccolta (Fig. 1F), con i valori

più bassi registrati nel 2014, l'anno con la maggior piovosità nel periodo di riempimento della cariosside.

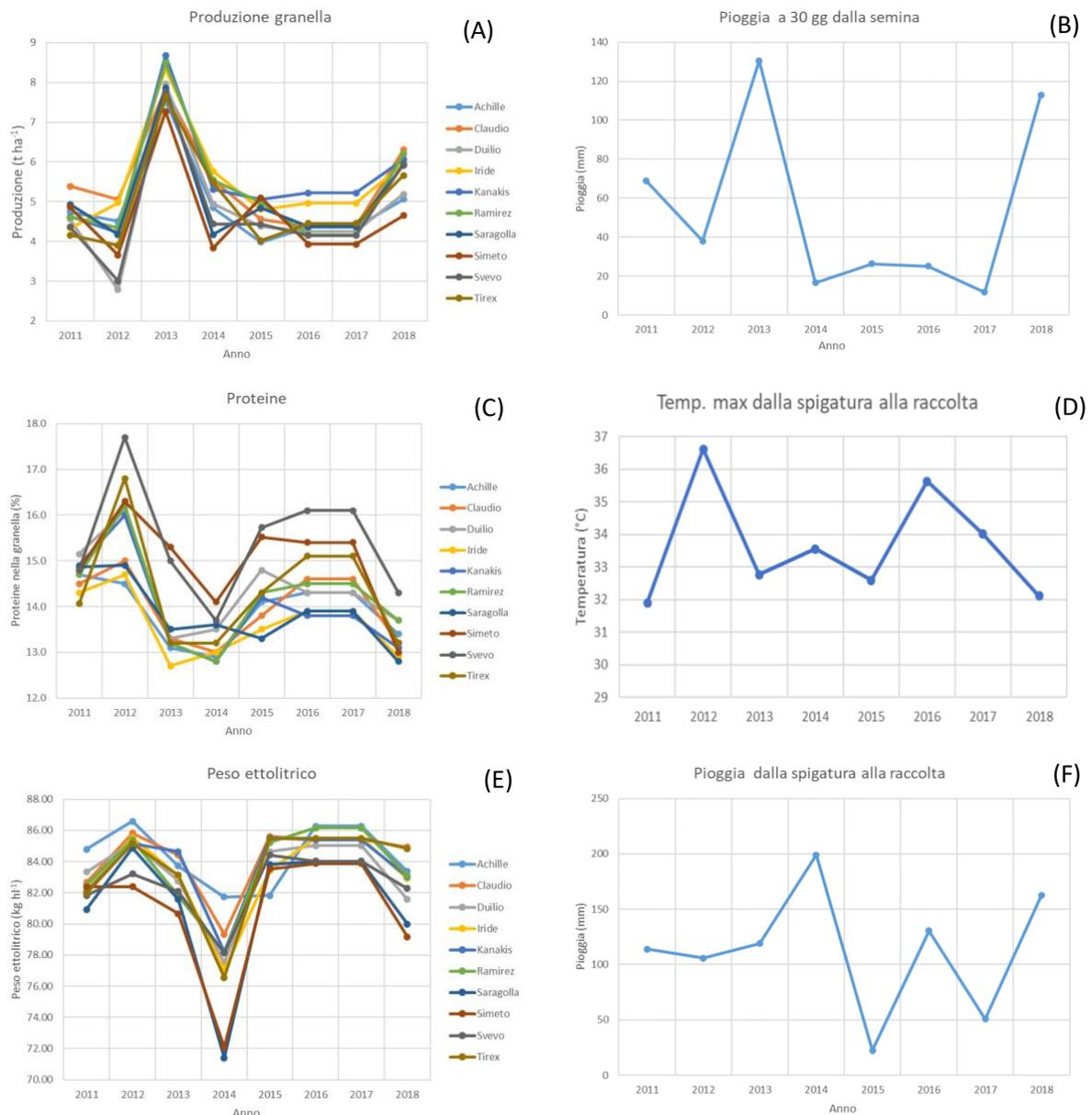


Figura 1. Andamento di variabili produttive del frumento duro nelle prove varietali svolte a Viterbo dal 2011 al 2018 e di variabili agrometeorologiche relative al periodo di 30 gg successivo alla semina, o nel periodo compreso tra la spigatura e la raccolta.

Quello che la Fig.1 evidenzia è un comportamento sostanzialmente simile delle diverse cultivar al variare dei fattori climatici durante il ciclo colturale. La maggior parte delle varietà mostra una forte correlazione positiva tra produzione di granella e la pioggia o il deficit idrico nel mese successivo alla semina, o comunque nel periodo tra semina e spigatura (Tab. 1). Ciò indica quanto siano importanti le fasi iniziali di sviluppo della coltura e quindi anche le pratiche agronomiche connesse, dalla preparazione del terreno alla scelta della data di semina. Il contenuto proteico mostra una correlazione negativa con la pioggia nel periodo tra la semina e

la spigatura, ed una correlazione positiva con la temperatura massima nel periodo di riempimento della granella, che però non si riscontra in alcune varietà (ad esempio in Achille). È da notare, che i dati registrati dalla stazione agrometeorologica nell'ultimo trentennio fanno intravedere una tendenza all'aumento della temperatura massima nel periodo tra spigatura e raccolta (Fig. 2) e quindi delle condizioni che favoriscono il contenuto proteico ma con minori rese.

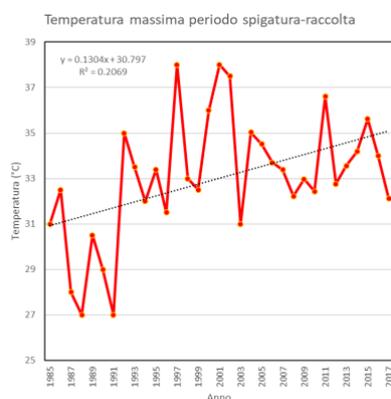


Figura 2. Andamento delle temperature massime nel periodo tra date medie di spigatura e raccolta del frumento duro, registrate dalla stazione agrometeorologica dell'azienda agraria dell'Università della Tuscia.

Il peso ettolitrico è correlato negativamente con la pioggia nel periodo spigatura raccolta, ma anche in questo caso non per la cultivar Achille (Tab. 1).

Tabella 1. Correlazioni di Pearson tra variabili produttive del frumento e variabili agrometeorologiche relative ai diversi periodi del ciclo colturale del frumento duro nelle prove varietali svolte a Viterbo dal 2011 al 2018. ETo è l'evapotraspirazione di riferimento, Rad è la radiazione solare. I colori tendenti al verde evidenziano correlazioni positive, mentre quelli tendenti al rosso correlazioni negative. I valori evidenziati in grassetto sono risultati altamente significativi ($P < 0.01$).

	Tutte le varietà			Svevo			Simeto			Achille			
	Prod	Proteine	Peso hl	Prod	Proteine	Peso hl	Prod	Proteine	Peso hl	Prod	Proteine	Peso hl	
Semina-spigatura	pioggia_s	0.70	-0.68	-0.55	0.80	-0.80	-0.60	0.51	-0.75	-0.68	0.64	-0.88	-0.63
	ETo_s	0.10	0.00	0.62	0.09	0.46	0.78	0.10	-0.22	0.59	-0.23	-0.06	0.10
	pioggia-ETo_s	0.67	-0.63	-0.57	0.73	-0.81	-0.65	0.42	-0.67	-0.73	0.66	-0.87	-0.55
	Rad_s	0.36	-0.04	0.51	0.37	0.55	0.68	0.40	0.15	0.50	0.29	-0.50	0.08
	tmin_s	0.39	-0.50	-0.58	0.40	-0.63	-0.55	0.41	-0.19	-0.58	0.32	-0.67	-0.80
	tmax_s	0.54	-0.31	0.12	0.75	-0.33	0.09	0.60	-0.32	0.12	0.26	-0.13	-0.44
temp_media_s	-0.22	-0.24	-0.07	-0.26	-0.20	0.03	-0.31	-0.15	-0.06	-0.36	-0.17	-0.29	
Spigatura-raccolta	pioggia_r	0.21	-0.36	-0.64	0.17	-0.55	-0.82	-0.09	-0.63	-0.77	0.36	-0.50	-0.14
	ETo_r	-0.23	0.01	-0.33	-0.15	-0.15	-0.42	-0.49	-0.41	-0.47	-0.15	0.06	0.23
	pioggia-ETo_r	0.33	-0.39	-0.53	0.24	-0.53	-0.71	0.11	-0.49	-0.61	0.39	-0.49	-0.21
	Rad_r	-0.18	0.07	-0.46	-0.19	-0.10	-0.59	-0.44	-0.14	-0.61	0.08	0.04	0.34
	tmin_r	0.32	-0.33	0.00	0.46	-0.20	0.19	0.41	-0.54	-0.30	0.02	-0.49	-0.73
	tmax_r	-0.42	0.50	0.31	-0.59	0.76	0.25	-0.55	0.62	0.21	-0.29	0.33	0.65
temp_media_r	-0.22	-0.04	0.35	0.02	-0.02	0.51	-0.09	-0.27	0.35	-0.60	0.25	-0.13	
Spigatura	pioggia_sp	0.32	-0.35	-0.32	0.25	-0.26	-0.49	-0.18	-0.62	-0.64	0.35	-0.47	0.00
	ETo_sp	0.04	-0.10	0.34	0.18	-0.15	0.52	0.43	-0.07	0.54	-0.26	0.24	-0.46
	pioggia-ETo_sp	0.26	-0.27	-0.35	0.16	-0.18	-0.54	-0.24	-0.52	-0.67	0.35	-0.45	0.08
	Rad_sp	-0.32	0.15	0.33	-0.29	0.04	0.40	-0.04	0.37	0.66	-0.41	0.38	-0.21
	tmin_sp	0.49	-0.31	-0.07	0.64	-0.44	-0.05	0.61	-0.31	-0.01	0.37	-0.52	-0.78
	tmax_sp	0.35	-0.03	0.23	0.41	0.06	0.25	0.62	0.05	0.19	0.25	0.00	-0.43
temp_media_sp	0.51	-0.33	0.14	0.66	-0.31	0.21	0.75	-0.28	0.14	0.26	-0.20	-0.57	
Semina + 30 gg	pioggia_sem	0.76	-0.32	-0.05	0.84	-0.34	-0.10	0.76	-0.39	-0.06	0.79	-0.39	-0.16
	ETo_sem	-0.37	-0.06	0.12	-0.25	-0.08	0.24	-0.39	-0.56	0.07	-0.55	0.13	-0.21
	pioggia-ETo_sem	0.79	-0.32	-0.02	0.90	-0.35	-0.09	0.78	-0.37	-0.04	0.80	-0.37	-0.11
	Rad_sem	-0.13	-0.15	-0.30	-0.20	-0.13	-0.38	-0.44	-0.07	-0.43	-0.06	-0.31	0.13
	tmin_sem	-0.35	0.32	0.16	-0.49	0.58	0.12	-0.51	0.52	0.03	-0.25	0.11	0.45
	tmax_sem	-0.10	0.31	0.47	-0.09	0.44	0.42	-0.16	0.07	0.46	-0.02	0.41	0.70
	temp_media_sem	-0.42	0.50	0.33	-0.56	0.73	0.26	-0.53	0.52	0.23	-0.29	0.37	0.64

Inoltre, tutte le cultivar evidenziano la ben nota relazione negativa tra la produzione ed il contenuto proteico della granella (Triboi et al. 2006), con sporadiche eccezioni quali quelle di Svevo e Simeto nel 2013 (Fig. 3A) che, tra tutti gli anni della prova, è quello che ha visto la maggior piovosità nel periodo tra spigatura e raccolta ed in cui sono state raggiunte le produzioni di granella più elevate. Considerando la media di tutti gli anni di prova, quest'ultime due cultivar sono quelle che hanno conseguito i maggiori contenuti proteici della granella, a fronte, però, di rese mediamente inferiori a quelle di altre varietà (Fig. 3B). Si tratta di cultivar che rientrano tra quelle con minor durata del periodo tra semina e spigatura, insieme a Duilio, Saragolla, Tirex e Iride (Fig. 3C).

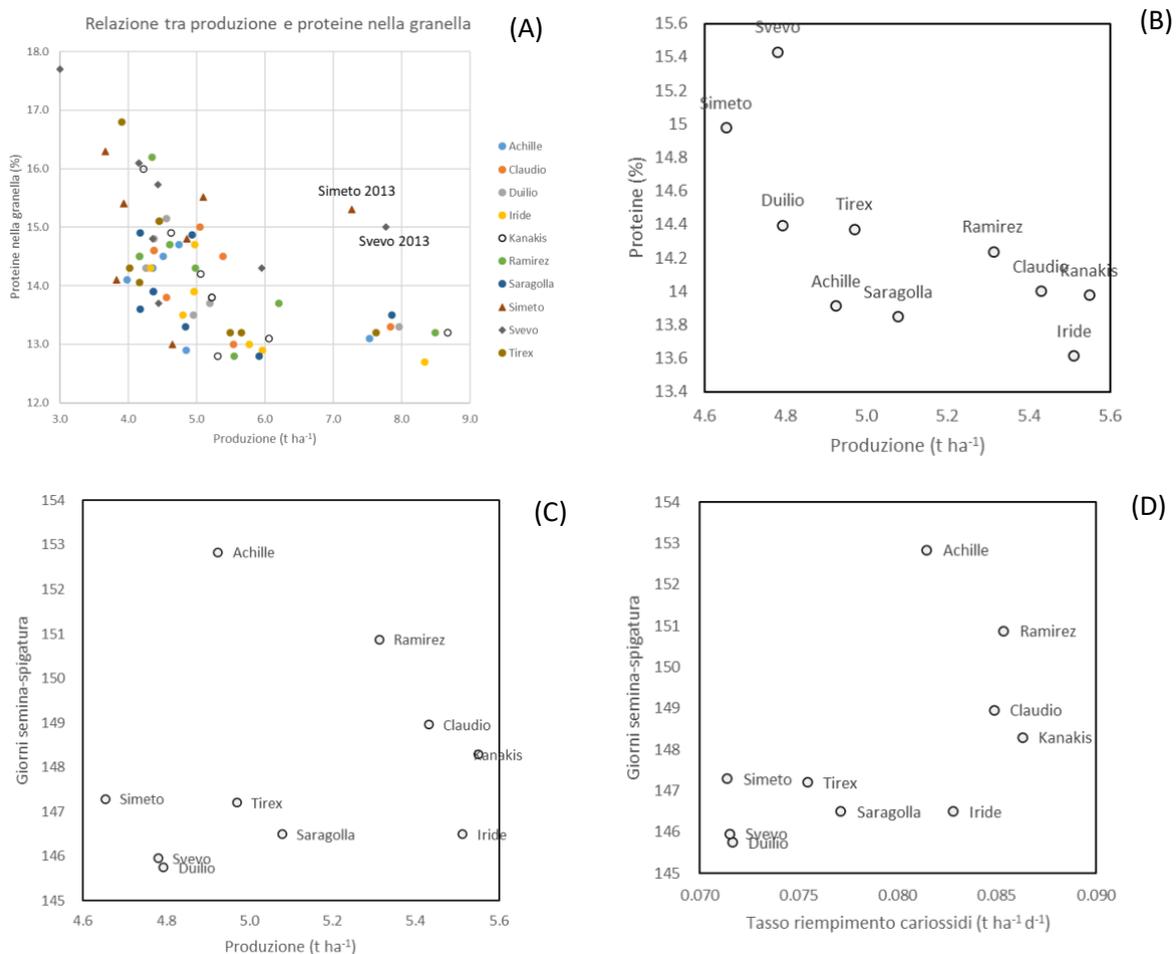


Figura 3. Relazione tra granella e contenuto proteico resa della granella per le diverse varietà di frumento duro nelle prove varietali svolte a Viterbo dal 2011 al 2018 per ciascun anno di prova (A) e per la media di tutti gli anni (B); relazione tra produzione di granella e giorni tra la semina e l'antesi per le media di tutti gli anni di prova (C); relazione tra tasso di riempimento della granella e giorni tra la semina e la spigatura per le media di tutti gli anni di prova (D).

È da notare che in un ambiente Mediterraneo come quello dell'Italia Centrale la tardività della spigatura non sembra correlata con la produttività ($r=0.2$) (Fig. 3C). Tuttavia, una cultivar come Achille che ha una maggior tardività nella spigatura e contemporaneamente un elevato tasso di riempimento della granella (Fig. 3D), è quella che fa registrare una maggior stabilità nel tempo

nella produzione di granella e nel contenuto proteico (e anche nel peso ettolitrico), con i valori più bassi delle rispettive deviazioni standard tra tutte le cultivar.

Appare comunque evidente che, oltre la scelta varietale, le pratiche agronomiche debbano adattarsi ai cambiamenti climatici ed in particolare all'aumento della variabilità e degli eventi estremi quali le ondate di calore. A questo proposito, deve essere concepita una gestione più dinamica e precisa della fertilizzazione azotata per adattarla alla variabilità temporale ed anche a quella spaziale dovuta alla disomogeneità delle proprietà del suolo. In questo contesto, nonostante i rapidi progressi nel monitoraggio dello stato di nutrizione azotata delle colture, ad esempio mediante piattaforme satellitari (Crema et al. 2020), gli algoritmi sviluppati per tradurre queste informazioni in consigli ed integrarle nei piani di concimazione, sono attualmente abbastanza semplicistici e richiedono un'ulteriore sperimentazione (Casa and Morari 2016).

Conclusioni

L'analisi delle relazioni tra le variabili agrometeorologiche nelle diverse fasi del ciclo colturale del frumento duro, con le caratteristiche quantitative e qualitative delle produzioni di granella, evidenziano una sostanziale omogeneità delle risposte delle diverse cultivar. Ciò potrebbe indicare una scarsa resilienza agli eventi climatici avversi (Kahiluoto et al. 2019). Appare dunque evidente che le strategie di adattamento ai cambiamenti climatici in cerealicoltura debbano considerare anche approcci agronomici più dinamici, come quello reso possibile dalla concimazione azotata di precisione (Casa and Morari 2016), in attesa dello sviluppo di genotipi che possano garantire un'elevata quantità e qualità delle produzioni, in condizioni di maggior temperatura soprattutto nel periodo tra la spigatura e la raccolta.

Bibliografia

- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R. P., Lobell, D. B., Cammarano, D., et al. (2015). Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, 5(2), 143–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate2470>
- Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R. P., O'Leary, G. J., Fitzgerald, G. J., et al. (2019). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global Change Biology*, 25(1), 155–173. <https://doi.org/10.1111/gcb.14481>
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F. X., & Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, 119(1), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>
- Casa, R., & Morari, F. (2016). La fertilizzazione di precisione. In *Agricoltura di Precisione* (pp. 249–273). Bologna: Edagricole.
- Crema, A., Boschetti, M., Nutini, F., Cillis, D., & Casa, R. (2020). Influence of soil properties on maize and wheat nitrogen status assessment from Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/rs12142175>
- Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J. E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., et al. (2019). Decline in climate resilience of european wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(1), 123–128. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804387115>
- Schauberger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D., Kato, T., Kato, H., & Ciaï, P. (2018). Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Scientific Reports*, 8(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>
- Triboi, E., Martre, P., Girousse, C., Ravel, C., & Triboi-Blondel, A. M. (2006). Unravelling environmental and genetic relationships between grain yield and nitrogen concentration for wheat. *European Journal of Agronomy*, 25(2), 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.04.004>
- World Meteorological Organisation. (2020). *State of the global climate 2020: provisional report*. <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202008>
- Zampieri, M., Toreti, A., Ceglar, A., Naumann, G., Turco, M., & Tebaldi, C. (2020). Climate resilience of the top ten wheat producers in the Mediterranean and the Middle East. *Regional Environmental Change*, 20(2). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01622-9>
- Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., et al. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>

Misure per mitigare l'impronta del carbonio di alimenti e bevande caratteristici della filiera cerealicola

Cimini A.¹, Messia M.C.², Moresi M.¹

¹Dipartimento per la Innovazione nei sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali (DIBAF), Università della Tuscia, Via San Camillo De Lellis snc, 01100 Viterbo.

²Dipartimento di Agricoltura, Ambiente e Alimenti, Università del Molise, Via Francesco De Sanctis, 86100 Campobasso.

Riassunto

L'impatto ambientale della produzione di alimenti e bevande può, oggi, essere valutato con diversi metodi standard. Alcuni fanno uso di un'unica categoria di impatto, quale il cambiamento climatico, mentre altri considerano numerose categorie di impatto che possono essere anche aggregate in categorie di danno. Tra questi il metodo *Product Environmental Footprint* (PEF), in valutazione presso la Comunità Europea, è ritenuto complesso e costoso, soprattutto per le piccole e medie imprese (PMI) del settore alimentare. Dal momento che il cambiamento climatico risulta essere la categoria di impatto con il più basso livello di incertezza, in questo lavoro si è descritto come attraverso la stima dell'impronta del carbonio dalla "culla alla tomba" di un alimento (pasta secca) e di una bevanda (birra lager) caratteristici della filiera cerealicola possano essere individuate le fasi del ciclo di vita a maggior impatto e selezionate le opzioni di mitigazione più efficaci. Un'analisi costi/benefici potrebbe aiutare le PMI a scegliere le misure di mitigazione più efficaci per i propri prodotti, oppure a decidere se investire sulla valutazione di altre categorie di impatto per completarne il profilo ambientale.

Abstract

The environmental impact of the food and beverage industry may currently be assessed using various standard methods. A few ones make use of a single impact category, such as climate change, while others take into account numerous impact categories at mid- and/or endpoint. Among these, the Product Environmental Footprint (PEF) method, under evaluation by the European Community, is considered complex and expensive, especially for small and medium-sized enterprises (SME) in the food sector. Since climate change appears to be the impact category with the lowest level of uncertainty, this paper describes how the estimation of the cradle-to-grave carbon footprint of a food (dry pasta) and a drink (lager beer), both typical of the cereal supply chain can be used to identify the most impactful life cycle phases and to select the most effective options to minimize their impact. A cost/benefit analysis could finally help SMEs to choose the most effective mitigation measures for their products, or to decide whether to invest in the assessment of other impact categories to characterize their environmental profile.

Parole chiave: Birra; impronta del carbonio; pasta secca; impatto ambientale; emissioni gas serra.

Introduzione

La produzione ed il consumo di alimenti e bevande sono ritenuti responsabili del 19-29% delle emissioni globali di gas ad effetto serra (GS) (Vermeulen et al., 2012) e, relativamente a 25 Paesi dell'Unione Europea (UE), del 20-30% dell'impatto attribuibile ad altre categorie di impatto ambientale (quali la riduzione dell'ozono stratosferico, la formazione fotochimica di

ozono, l'acidificazione, l'esaurimento delle risorse, la tossicità umana ed ambientale), nonché del 59% dell'impatto dovuto all'eutrofizzazione (Tukker et al., 2006).

La dieta alimentare media negli USA e nell'UE, essendo particolarmente ricca di carne, grassi e zuccheri, costituisce un rischio non solo per la salute individuale, ma anche per l'ambiente. Dal momento che la popolazione mondiale dovrebbe aumentare da circa 7 a 9,6 miliardi di persone nel 2050, il che incrementerà nettamente i consumi globali di carne e latte, soprattutto in Cina e India, si ritiene che la promozione di diete più salutari possa ridurre l'impronta ambientale dei consumi alimentari (EC, 2011; FAO, 2018; Moresi e Valentini, 2010; WRI, 2013) e che le industrie di trasformazione alimentare, come pure la grande distribuzione organizzata, debbano contribuire alla diffusione di nuovi modelli di produzione e consumo eco-sostenibili (WRI, 2013).

L'industria alimentare e delle bevande è quella che contribuisce in maggior misura all'economia dell'UE (FoodDrinkEurope, 2020), seguita dalle industrie automobilistica, delle macchine e delle attrezzature e chimica. Nel 2018, le 291.000 aziende del settore alimentare hanno realizzato un fatturato di 1205 miliardi di € e dato occupazione a 4,82 milioni di addetti. Il 99,2% di dette aziende sono tuttavia piccole e medie imprese (PMI), alle quali competono il 42,7% (ovvero 515 miliardi di €) del fatturato complessivo, il 42,8% (ovvero 105 miliardi di €) del valore aggiunto ed il 58,1% (ovvero 2,8 milioni di dipendenti) degli occupati totali. Detta industria si sta impegnando a migliorare le proprie prestazioni ambientali e ad individuare quali azioni siano realmente adatte per produzioni più sostenibili (Moresi, 2014). L'analisi del ciclo di vita (LCA), come standardizzata da ISO (2006a, b), ha fornito un modo per classificare gli impatti ambientali di ciascuna fase della catena di approvvigionamento alimentare (Minkov et al., 2016) ed è la procedura di base per diversi metodi standard internazionali, come riassunto da Moresi et al. (2020). Numerosi metodi standard valutano l'impatto ambientale di un prodotto, processo o servizio attraverso la stima di numerose categorie di impatto (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*, TRACI; *Dichiarazione ambientale di prodotto*, EPD[®]) che possono essere normalizzate ed aggregate utilizzando pesi opportunamente prescelti (*Impronta ambientale di prodotto*, PEF) oppure combinate in 3 (*Eco-Indicator 99*; *ReCiPe 2008 e 2016*) o 4 (*Impact 2002⁺*) categorie di danno. Ad es., il metodo PEF, ancora in validazione nell'UE, richiede la stima di ben 16 categorie di impatto e, per questo, è stato severamente criticato da numerosi *stakeholder* per essere inutilmente complesso e molto costoso (BMUB/UBA/TUB, 2014; Carpentier, 2015), soprattutto per il 99% delle imprese alimentari dell'UE (Cimini e Moresi, 2018a). Per contro, altri metodi considerano una sola categoria di impatto, quale il consumo di energia rinnovabile e non (*Cumulative Energy Demand*, CED) e il riscaldamento globale dovuto alle emissioni di GS (*Publicly Available Specification*, PAS, 2050; *Bilan Carbone[®]*; *Greenhouse Gas Protocol*).

In questo lavoro, si illustra come la stima dell'impronta del carbonio dalla "culla alla tomba" (CF) possa essere intrinsecamente sufficiente a promuovere un primo miglioramento nella sostenibilità delle imprese alimentari e delle bevande, con specifico riferimento a due prodotti a base di cereali, quali la pasta secca e la birra lager di malto d'orzo.

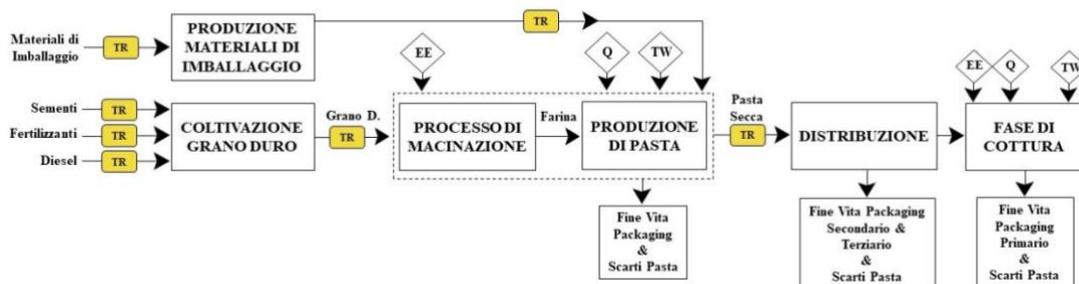
Emissioni di gas serra del sistema Italia

I GS emessi in Italia (compresi quelli adsorbiti per l'uso ed il cambiamento d'uso del suolo e dalla silvicoltura, LULUCF) sono ammontate a circa 391 Tg CO_{2e} nel 2018 (ISPRA, 2020). Ne deriva un'impronta del carbonio di circa 6,45 Mg CO_{2e} pro-capite/anno. Nel complesso, questi gas sono principalmente composti da CO₂, CH₄ e N₂O, mentre il contributo

degli idro-fluoro-cloro-carburi e SF₆ è di minore importanza. Il settore energetico rappresenta la principale fonte di GS (337,5 Tg CO_{2e}), seguito dai settori industriale (34,7 Tg CO_{2e}) ed agricolo (30,2 Tg CO_{2e}) e dal sistema di gestione dei rifiuti (18,3 Tg CO_{2e}), mentre la categoria LULUCF costituisce il principale assorbitore di GS (-36,3 Tg CO_{2e}). Più specificamente, il settore agricolo emette principalmente CH₄ in conseguenza della fermentazione enterica dei bovini (14,2 Tg CO_{2e}), della gestione del letame animale (3,48 Tg CO_{2e}) e della coltivazione del riso (1,55 Tg CO_{2e}), nonché N₂O dai suoli agricoli fertilizzati (8,32 Tg CO_{2e}) e dalla gestione del letame (2,19 Tg CO_{2e}). L'impatto della trasformazione industriale deriva principalmente dall'industria chimica, seguita da quella siderurgica, e della cellulosa, carta e stampa. Il settore alimentare, bevande e tabacco ha emesso ~3,75 Tg CO_{2e} nel 2018 (ISPRA (2020)).

Relativamente ai due prodotti qui considerati, la loro impronta del carbonio dalla “culla alla tomba” è dell'ordine di 1,9 kg CO_{2e} per kg di pasta secca (Barilla, 2017) ed 1.27 kg CO_{2e} per L di birra lager (Cimini e Moresi, 2016). I loro consumi pro-capite annuali sono rispettivamente pari a 23.5 kg di pasta secca (<http://www.pastaitaliani.it/consumi/>) e 34,6 L di birra (ASSOBIRRA, 2019). A fronte di una popolazione italiana di circa 60.55 milioni di abitanti nel 2019 (Worldometers, 2020), le emissioni di GS associate al consumo di ciascuno di questi prodotti ammonterebbero a ca. 2,7 Tg CO_{2e}/a, ossia allo 0,68% delle emissioni di GS del sistema Italia (ISPRA, 2020).

a)



b)

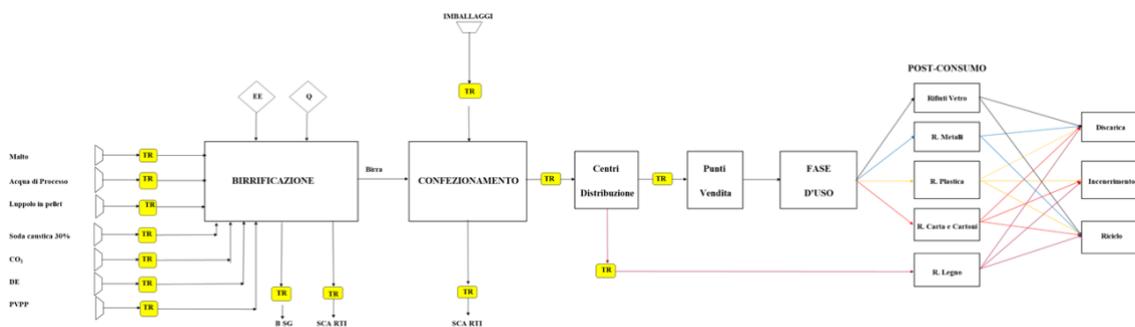


Figura 1. Confini dei sistemi pasta secca (a) e birra (b), come modificati da Cimini et al. (2019b) e da Cimini e Moresi (2018b). Simbologia utilizzata: EE, energia elettrica; Q, energia termica; TR, trasporto; TW, acqua di processo.

Casi di studio: produzione di pasta secca e birra chiara

L'impronta del carbonio dalla "culla alla tomba" di una pasta di semola di grano duro biologica (Cimini et al., 2019b) o di una birra lager a base di malto d'orzo (Cimini e Moresi, 2016, 2018bc) è stata precedentemente stimata applicando il metodo standard PAS 2050 (BSI, 2008). Tutte le fasi canoniche della LCA (ovvero, definizione dell'obiettivo e dell'ambito, analisi dell'inventario, valutazione dell'impatto e interpretazione dei risultati) sono state riferite a un'unità funzionale costituita, rispettivamente, da 1 kg di pasta secca biologica, confezionata in sacchetti di polipropilene (PP) da 0,5 kg, o da 1 hL di birra confezionata in bottiglie di vetro da 66 cL. I confini dei sistemi esaminati sono indicati in Fig. 1. Secondo il metodo PAS 2050 (Sezione 7.2), gli ambiti geografici e temporali di questi studi erano riferiti all'Europa occidentale e agli anni 2006-2016.

Nel caso della pasta secca biologica, tutti i dati primari sono stati raccolti in un pastificio di medie dimensioni con una capacità di ~125 Gg/a (Cimini et al., 2019b). L'impronta CF della pasta secca era pari a circa 1,8 kg CO_{2e} kg⁻¹.

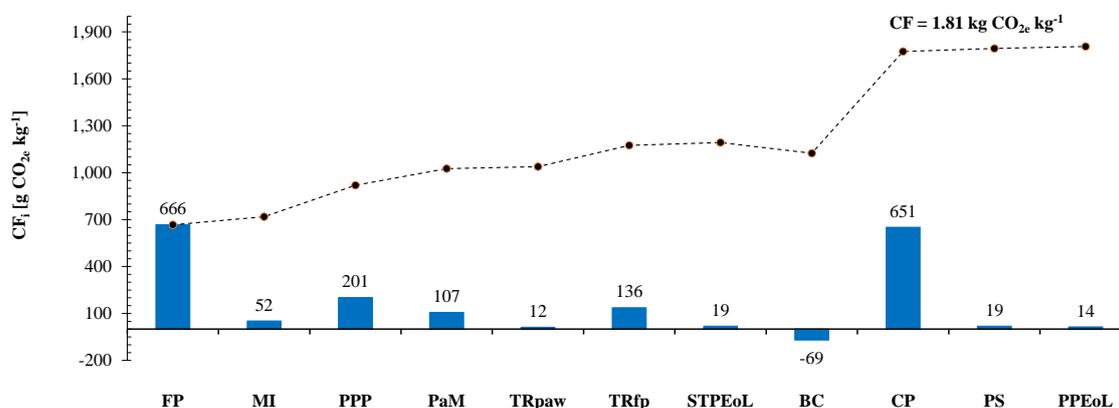


Figure 2. Contributo delle diverse fasi del ciclo di vita al *carbon footprint* dalla "culla alla tomba" (CF) di 1 kg di pasta biologica secca confezionata in sacchetti di PP da 0,5 kg in un pastificio di medie dimensioni, come modificato da Cimini et al. (2019b) e punteggio cumulativo (linea tratteggiata). Simbologia indicata nel testo.

Dalla Fig. 2 si rileva che l'impatto delle diverse fasi del ciclo di vita erano caratterizzate come segue: fase di campo FP (~0,67 kg CO_{2e} kg⁻¹), cottura casalinga CP (0,65 kg CO_{2e} kg⁻¹), produzione e confezionamento della pasta PPP (~0,20 kg CO_{2e} kg⁻¹), trasporto materie prime TR_{paw} e prodotto finito TR_{fp} (~0,15 kg CO_{2e} kg⁻¹), produzione degli imballaggi PaM (~0,11 kg CO_{2e} kg⁻¹), macinazione del grano duro MI (~0,05 kg CO_{2e} kg⁻¹), fine vita degli imballaggi formati in produzione STPEoL e dopo la fase di consumo PPEoL (~0,03 kg CO_{2e} kg⁻¹) e per avanzi di pasta cotta PS (~0,02 kg CO_{2e} kg⁻¹). I crediti di CO_{2e} (~0,07 kg CO_{2e} kg⁻¹) derivano dall'impiego in mangimistica dei sottoprodotti di molitura del grano e dei rifiuti di confezionamento della pasta (Cimini et al., 2019b). Per ridurre il contributo della fase di cottura, non è sufficiente adottare modalità di cottura *eco-friendly* (Cimini e Moresi, 2017) od impiegare fornelli ad alto rendimento, ma occorre limitare la quantità di acqua impiegata per cuocere la pasta. Dopo aver valutato l'effetto del rapporto acqua di cottura/pasta (WPR) nell'intervallo 2-12 L/kg sulla qualità di pasta lunga (Cimini et al., 2018, 2019b) e corta (Cimini et al., 2019a) tramite metodi chimico-fisici e sensoriali e sviluppato un cuocitore ecosostenibile (Cimini et al., 2020), è stato stimato che con WPR=2 L kg⁻¹ (Cimini et al., 2019c) l'impronta del carbonio si riduceva del 29% rispetto al caso di riferimento (CR). L'uso della rotazione nella coltivazione biologica del grano duro consentirebbe di ridurre CF di un ulteriore 13%. Alimentando le

caldaie di generazione del vapore con biogas anziché metano, CF si riduceva ulteriormente del 7%. L'uso di elettricità da celle fotovoltaiche comportava un'ulteriore riduzione del 9%. Effettuando il trasporto ferroviario e non stradale dei materiali e del prodotto finito, si otteneva una riduzione supplementare del 2% di CF. Infine, raccorciando a soli 250 o 50 km la distanza percorsa dal prodotto finale o dal grano, CF si riduceva di un altro 2 od 1%. In totale, detta serie di opzioni di mitigazione riducevano l'impronta del carbonio della pasta secca biologica da 1,81 a 0,68 kg CO_{2e} kg⁻¹ (Tabella 1).

Tabella 1. Effetto di strategie di mitigazione sequenzialmente utilizzate per minimizzare l'impronta del carbonio dalla culla alla tomba (CF) della pasta secca della birra con la variazione percentuale relativa rispetto al caso di riferimento ($\Delta CF/CF_{CR}$), come ricavato da Cimini et al. (2019b) e da Cimini e Moresi (2018b).

Strategia di Mitigazione	Parametro	UdM	CF	$\Delta CF/CF_{CR}$
				[kg CO _{2e} kg ⁻¹]
<i>Pasta secca: caso di riferimento (CR)</i>				
			1.807	0
Cottura eco-sostenibile	P _C 2.3 → 0.4	kWh kg ⁻¹	1.283	-29
Coltivazione biologica	EF _{ODW} 0.534 → 0.36	kg CO _{2e} kg ⁻¹	1.056	-42
Energia termica da biogas	EF _Q 0.231 → 0.029	kg CO _{2e} kWh ⁻¹	0.923	-49
Energia elettrica fotovoltaica	EF _{PEE} 0.513 → 0.055	kg CO _{2e} kWh ⁻¹	0.767	-58
Trasporto ferroviario pasta	EF _{RT} 0.168 → 0.047	kg CO _{2e} (Mg km) ⁻¹	0.720	-60
Distribuzione regionale pasta	d _p 900 → 250	km	0.695	-62
Grano duro locale (DWLS)	d _{LDW} 150 → 50	km	0.675	-63
			[kg CO _{2e} hL ⁻¹]	[%]
<i>Birra Lager: caso di riferimento (CR)</i>				
			127.2	0
Bottiglie di vetro riciclate al 100%	EF _B 1.08 → 0.48	kg CO _{2e} kg ⁻¹	100.3	-21
Trasporto ferroviario Birra e Malto	EF _{RT} 0.168 → 0.039	kg CO _{2e} (Mg km) ⁻¹	88.2	-31
Malto biologico	EF _{OM} 1.143 → 0.546	kg CO _{2e} kg ⁻¹	76.6	-40
Malto locale	d _{LM} 500 → 250	km	76.5	-40
Energia elettrica fotovoltaica	EF _{PEE} 0.324 → 0.055	kg CO _{2e} kWh ⁻¹	60.2	-53

Nel caso della birra lager, tutti i dati primari sono relativi ad un birrificio di grandi dimensioni con una capacità annuale di 3x10⁶ hL di birra (Cimini e Moresi, 2016). Il *carbon footprint* della birra era di circa 127 kg CO_{2e} hL⁻¹. Come indicato in Fig. 3, le fasi del ciclo di vita che contribuivano maggiormente erano, in ordine decrescente, associate alla produzione degli imballaggi PaM (~56 kg CO_{2e} hL⁻¹), alla fase di trasporto delle materie prime TRIR, del prodotto finito ai centri di distribuzione TRBDC ed ai dettaglianti TRBR e dei sottoprodotti e scarti TRPPW (~29 kg CO_{2e} hL⁻¹), alla produzione del malto d'orzo e dei coadiuvanti tecnologici RPM (~23 kg CO_{2e} hL⁻¹), all'uso da parte dei consumatori PC (~19 kg CO_{2e} hL⁻¹), alla produzione ed al confezionamento della birra BPP (~12 kg CO_{2e} hL⁻¹) ed allo smaltimento dei rifiuti e degli effluenti WED (1,2 kg CO_{2e} hL⁻¹). Crediti di CO_{2e} conseguivano dall'impiego in mangimistica delle trebbie e del lievito in eccesso BPC (2,1 kg CO_{2e} hL⁻¹), nonché dal riciclaggio delle bottiglie di vetro e dei rifiuti di carta e cartone PCWD (11 kg CO_{2e} hL⁻¹).

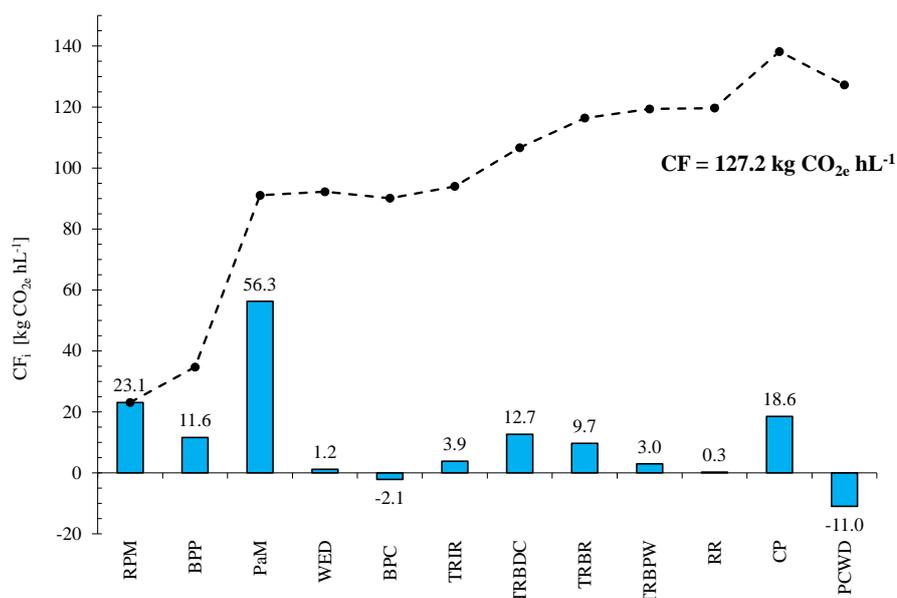


Figura 3. Contributo delle diverse fasi del ciclo di vita al *carbon footprint* dalla “culla alla tomba” (CF) di 1 hL di birra confezionata in bottiglie di vetro da 66 cL in un birrificio di grandi dimensioni, come estratto da Cimini et al. (2018b) e punteggio cumulativo (linea tratteggiata). Simbologia indicata nel testo.

Come indicato in Tabella 1, le opzioni di mitigazione adottate per ridurre le emissioni di GS delle fasi maggiormente impattanti hanno previsto, *in primis*, la sostituzione delle bottiglie di vetro riciclato al 10 % con bottiglie di vetro riciclato al 100%, cui è corrisposto un decremento del 21% dell'impronta del carbonio del caso di riferimento. Ricorrendo al trasporto delle merci su rotaia, è stata ottenuta un'ulteriore riduzione del 10% in CF. L'utilizzo di orzo biologico anziché convenzionale, coltivato in loco, ha avuto l'effetto di diminuire CF di un altro 9%. Infine, con l'impiego di elettricità da celle fotovoltaiche anziché da fonti fossili CF si riduceva di un ulteriore 13%. Nel complesso, le azioni di mitigazione prescelte consentivano di dimezzare in pratica l'impronta del carbonio della birra lager da circa 127 a 60 kg CO_{2e} hL⁻¹.

Conclusioni

Per caratterizzare l'intero profilo ambientale di un singolo prodotto è necessario un elevato impegno di personale e di risorse finanziarie. Dato che la categoria del riscaldamento globale è ad ora quella di gran lunga più affidabile rispetto a tutte le altre utilizzate nei metodi standard attualmente in uso (EPD®, Impact 2002+, ReCiPe 2016 e PEF), la valutazione dell'impronta del carbonio appare lo strumento più economico per identificare le fasi del ciclo di vita più impattanti di un prodotto. Pertanto, è probabilmente il metodo migliore per iniziare a migliorare la sostenibilità del 99% delle PMI del settore alimentare ed in questo lavoro è stato utilizzato per selezionare una sequenza di azioni di mitigazione che hanno teoricamente ridotto il carbon footprint dalla “culla alla tomba” sia di 1 kg di pasta biologica secca da 1,81 a 0,68 kg CO_{2e} kg⁻¹, sia di 1 hL di birra da circa 127 a 60 kg CO_{2e} hL⁻¹. Un'ulteriore analisi costi/benefici potrebbe aiutare le PMI a scegliere le misure di mitigazione più efficaci per i propri prodotti, oppure a decidere se investire sulla valutazione di altre categorie di impatto per completarne i profili ambientali o per indagare l'effetto di dette azioni di mitigazione su altre categorie di impatto ambientale.

Bibliografia

- ASSOBIRRA, 2019. Annual Report 2019. www.assobirra.it/wp-content/uploads/2020/07/AnnualReport_2019_S.pdf (19.11.2020).
- Barilla, 2017. EPD durum wheat semolina pasta in paperboard box. Registration number: S-EP-00217 (2017). www.environdec.com/Detail/epd217 (20.11.2020).
- BMUB/UBA/TUB, 2014. BMUB/UBA/TUB Position Paper on EU Product and Organisation Environmental Footprint Proposal as Part of the Communication Building the Single Market for Green Products (COM/2013/0196 Final). ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=25855&no=2 (20.11.2020).
- BSI, 2008. Publicly Available Specification (PAS 2050) for the assessment of the life cycle greenhouse gas emission of goods and services. British Standards Institution, London.
- Carpentier A., 2015. Eurometaux Open Letter to the PEF Pilot Project Steering Committee and Technical Advisory Board. May 2015. webgate.ec.europa.eu/fpfis/wikis/download/attachments/63542841/2015_05_11_open_letter_on_PEF_pilot_exercise.pdf?api=v2 (20.11.2020).
- Cimini A., Cibelli M., Messia M.C., Marconi E., Moresi M., 2018. Cooking quality of commercial spaghetti: Effect of the water-to-dried pasta ratio. *European Food Research and Technology*, 245: 1037–1045.
- Cimini A., Cibelli M., Messia M.C., Moresi M., 2019a. Commercial short-cut extruded pasta: Cooking quality and carbon footprint vs. water-to-pasta ratio. *Food Bioprod Process*, 116: 150-159.
- Cimini A., Cibelli M., Moresi M., 2019b. Cradle-to-grave carbon footprint of dried organic pasta: assessment and potential mitigation measures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99: 5303–5318.
- Cimini A., Cibelli M., Moresi M., 2019c. Reducing the cooking water-to-dried pasta ratio and environmental impact of pasta cooking, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99, 1258–1266.
- Cimini A., Cibelli M., Moresi M., 2020. Development and assessment of a home eco-sustainable pasta cooker. *Food and Bioprocess Processing*, 122: 291–302.
- Cimini A., Moresi M., 2016. Carbon Footprint of a pale lager packed in different formats: assessment and sensitivity analysis based on transparent data. *J. Clean. Prod.* 112: 4196-4213.
- Cimini A., Moresi M., 2017. Energy efficiency and carbon footprint of home pasta cooking appliances. *Journal of Food Engineering*, 204: 8-17.
- Cimini A., Moresi M., 2018a. Are the present standard methods effectively useful to mitigate the environmental impact of the 99% EU food and drink enterprises? *Trends in Food Science and Technology*, 77: pp. 42-53.
- Cimini A., Moresi M., 2018b. Mitigation measures to minimize the cradle-to-grave beer carbon footprint as related to the brewery size and primary packaging materials. *Journal of Food Engineering*, 236: 1-8.
- Cimini A., Moresi M., 2018c. Effect of brewery size on the main process parameters and cradle-to-grave carbon footprint of lager beer. *Journal of Industrial Ecology*, 22 (5), 1139- 1155.
- EC (European Commission), 2011. Sustainable food consumption and production in a resource-constrained world - The 3rd SCAR Foresight Exercise Luxembourg: Publications Office of the European Union. ec.europa.eu/food/sites/food/files/safety/docs/fw_lib_feg3-report-web-version_en.pdf (20.11.2020).
- FAO, 2018. Building climate resilience for food security and nutrition. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, I. www.fao.org/3/I9553EN/i9553en.pdf (20.11.2020).
- FoodDrinkEurope, 2020. Data & trends European food and drink industry. 2020 Edition. FoodDrinkEurope, Brussels, B. www.fooddrinkeurope.eu/uploads/publications_documents/FoodDrinkEurope_-_Data_Trends_2020_digital.pdf (18.11.2020).
- ISO, 2006a. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework (ISO 14040: 2006). International Organisation for Standardisation, Geneva, CH.
- ISO, 2006b. Environmental Management: Life Cycle Assessment - Requirements and guidelines (ISO 14044: 2006). International Organisation for Standardisation, Geneva, CH.
- ISPRA, 2020. Italian greenhouse gas inventory 1990-2018: National Inventory Report 2018. Rapporto no. 283/2020. ISPRA, Rome, Italy. www.isprambiente.gov.it/it/publicazioni/rapporti/italian-greenhouse-gas-inventory-1990-2018.-national-inventory-report-2020 (18.11. 2020).
- Minkov N., Finkbeiner M., Sfez S., Dewulf J., Manent A., Rother E., Weyell P., Kralisch D., Schowanel D., Lapkin A., Jones M., Azapagic A., 2016. Background Document. Supplementing the Roadmap for Sustainability Assessment in European Process Industries. Current State of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). Version 1.0. spire2030.eu/sites/default/files/project/measure/uploads/Modules/Mediaroom/measure-roadmap-bd-current-state-in-lcsa.pdf (20.11.2020).
- Moresi M., 2014. Assessment of the life cycle greenhouse gas emissions in the food industry. *Agro Food Ind. Hi Tec.* 25(3): 53-62.
- Moresi M., Cibelli M., Cimini A., 2020. Standard methods effectively useful to mitigate the environmental impact of food industry. In Galanakis C. (Ed.) *Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption*. Chp. 1. Academic Press, New York, pp.1-30. www.elsevier.com/books/environmental-impact-of-agro-food-industry-and-food-consumption/galanakis/978-0-12-821363-6 (20.11.2020).
- Moresi M., Valentini R., 2010. Dieta mediterranea e impatto ambientale. *Industrie Alimentari*. 49 (maggio): 9- 20.
- Tukker A., Huppes G., Guinée J., Heijungs R., de Koning A., van Oers L., Suh S., Geerken T., Van Holderbeke M., Jansen B., Nielsen P., 2006. Environmental impact of products. (EIPRO). Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25. Technical report EUR 22284 EN. European Communities. ec.europa.eu/environment/ipp/pdf/eipro_report.pdf (20.11. 2020).
- Vermeulen S.J., Cambell B.M., Ingram I.S., 2012. Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 37: 195-222.
- Worldometers, 2020. Italy Population (Live). www.worldometers.info/world-population/italy-population/ (20.11.2020).
- WRI (World Resources Institute), 2013. Creating a Sustainable Food Future. A menu of solutions to sustainably feed more than 9 billion people by 2050. *World Resources Report 2013–14: Interim Findings*. World Resources Institute, Washington, DC.

Influenza del surriscaldamento globale sugli insetti della vite

Lessio F., Alma A.

DISAFA-Entomologia, Università degli Studi di Torino, largo Braccini 2, 10095 Grugliasco (TO).

Riassunto

La temperatura condiziona la fenologia, il voltinismo, la sopravvivenza e la distribuzione geografica degli insetti ampelofagi. In chiave di difesa fitosanitaria, ciò comporta la rimodulazione delle strategie di lotta e la necessità di strumenti di supporto quali i modelli previsionali. I casi-studio presentati comprendono *Scaphoideus titanus* (vettore di fitoplasmi agenti di FD), le cocciniglie farinose appartenenti alla famiglia Pseudococcidae (vettori di virus GRLaV, GVA e GVB), e le tignole dell'uva *Lobesia botrana* ed *Eupoecilia ambiguella*.

Abstract

Climate change, and particularly global warming, has an influence on many aspects of grapevine feeding insects, including phenology, voltinism, survival, and geographical distribution. Phenology is affected as diapause, hatching and molts may be sped up or delayed by changes in temperature. Multivoltine species may present one or more additional generations per year. Survival of non-overwintering stages, and also of some plant pathogens vectored by insects, may be enhanced by mild autumn and winter temperatures. Alien species are introduced in new areas with suitable climate, and some pests may spread to Northern areas due to temperature increase. The consequence on pest management is the need of re-scheduling strategies, and developing supporting tools such as forecast models. We present a few cases-study: *Scaphoideus titanus* (a vector of FD phytoplasmas), mealybugs in the family Pseudococcidae (vectors of GRLaV, GVA and GVB), and the grape berry moths *Lobesia botrana* and *Eupoecilia ambiguella*.

Parole chiave: riscaldamento globale, vite, insetti dannosi, voltinismo, fenologia

Introduzione

Fra i fattori abiotici che influiscono sulla fisiologia degli insetti, la temperatura è uno dei più importanti, dal momento che regola la diapausa, lo sviluppo embrionale e post-embrionale e altre importanti funzioni biologiche come il volo e l'alimentazione. Ne deriva che i cambiamenti climatici in atto, e in particolare l'aumento delle temperature (Fig. 1), si ripercuotono sul ciclo biologico, con sfasamenti dei picchi di volo e di comparsa dei diversi stadi vitali (uovo, forme giovanili e adulto). L'influenza dei cambiamenti climatici, ed in particolare del surriscaldamento globale, sugli insetti è un argomento di crescente interesse, come dimostra l'aumento delle pubblicazioni scientifiche al riguardo (Fig. 2)

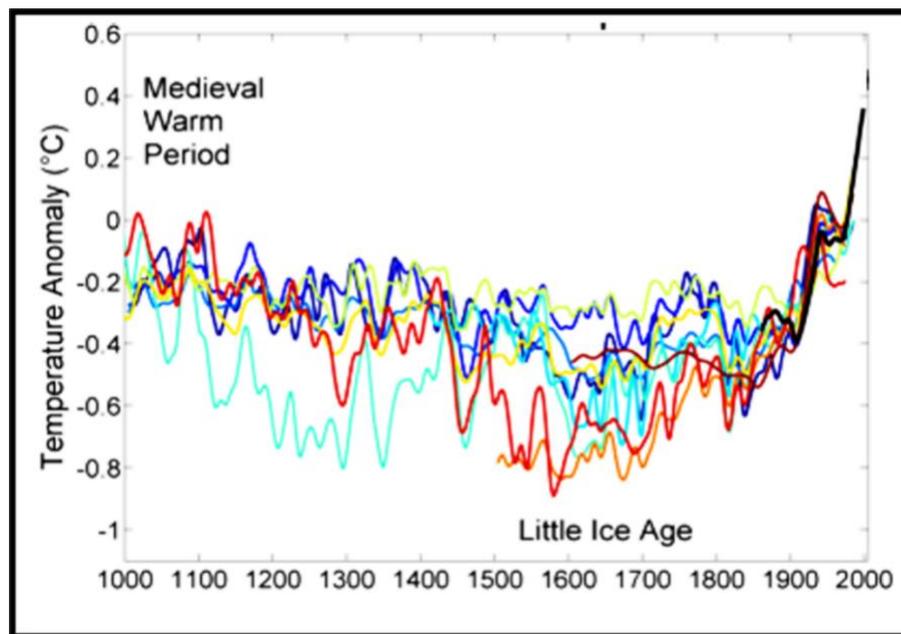


Figura 1. Temperature della Terra ricostruite da fonti diverse (da R. Rohde, Global Warming Act, <https://twitter.com/rarohde/status/1126432673306640384?lang=fa>)

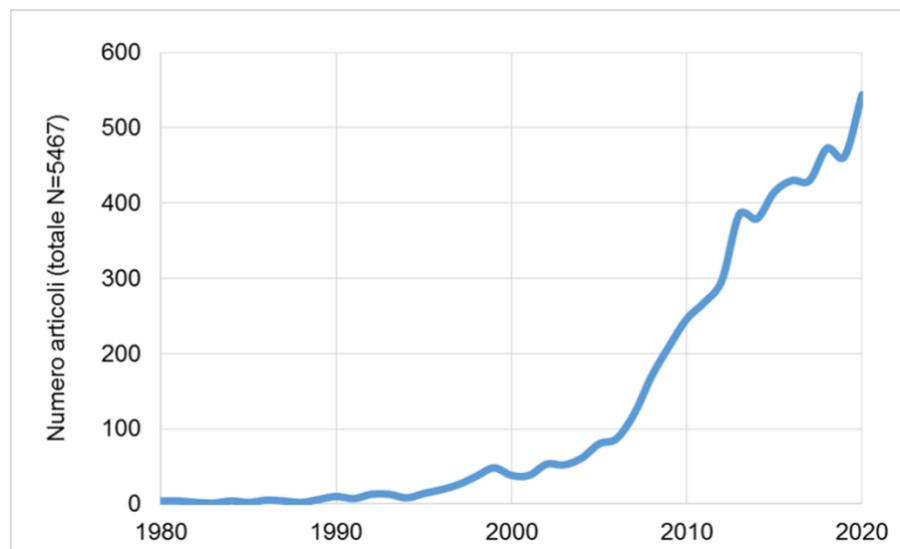


Figura 2. Numero di articoli scientifici (N = 5467) contenenti i termini ‘climate change AND insect’ nel periodo 1980 – 2019 (fonte: Scopus) (Figura DISAFA Entomologia)

Questi aspetti risultano particolarmente importanti quando coinvolgono specie dannose alle colture, compresa la vite, dal momento che gli interventi fitosanitari devono tenere conto di eventuali sfasamenti temporali e che specie tipiche dei climi più caldi possono giungere a colonizzare areali che in passato erano loro preclusi per evidenti limiti termici. I principali fenomeni biologici sui quali la temperatura può influire maggiormente sono la fenologia (ovvero la durata del ciclo biologico suddiviso nei diversi stadi di uovo, larva, pupa e adulto negli olometaboli e di uovo, neanide, ninfa e adulto negli eterometaboli), il voltinismo (il

numero di generazioni svolte in un anno) e la distribuzione geografica (Reineke e Thiery 2016). Peraltro, a volte è difficile distinguere tra effetti sulla fenologia e sul voltinismo, dato che il secondo, nelle specie polivoltine, può essere considerato una conseguenza della prima. Un altro aspetto da tenere in considerazione, seppure non collegato direttamente al voltinismo né alla fenologia, è il fatto che temperature autunnali miti possono contribuire ad allungare la durata della vita degli stadi biologici non interessati da diapausa e svernamento. I cambiamenti nella distribuzione geografica possono invece essere intesi sia come colonizzazione di nuovi areali in seguito a introduzione e acclimatamento, sia come spostamenti in termini di gradienti di latitudine e altitudine. Se il primo aspetto non è necessariamente legato a un incremento delle temperature (le specie alloctone tendono a insediarsi in areali analoghi a quello di origine dal punto di vista climatico), il secondo è quello che esprime maggiormente la conseguenza del surriscaldamento globale.

Non ultimo, il cambiamento climatico ha un effetto non solo sugli insetti ma anche sulle piante ospiti. L'alterazione della sincronia tra un insetto fitofago e la sua pianta ospite (in questo caso, la vite) può presentare vantaggi e svantaggi per l'uno e per l'altra (Reineke e Thiery 2016).

Questo contributo ha lo scopo di mettere a fuoco alcune delle più importanti conseguenze che i cambiamenti climatici (in particolare l'aumento delle temperature) hanno avuto e hanno tuttora sui principali insetti ampelofagi presenti in Italia, e quali possono essere le necessarie contromisure da adottare.

***Scaphoideus titanus* e Flavescenza dorata**

La Flavescenza dorata (FD) è una grave ampelopatia causata da un fitoplasma, un procariota privo di parete cellulare, patogeno obbligato e infeudato al floema. I fitoplasmata vengono trasmessi alle piante ospiti principalmente da insetti vettori quali cicaline e psille, che si nutrono di linfa elaborata. Il principale vettore della FD, *Scaphoideus titanus* Ball (Hemiptera: Cicadellidae) (Fig. 3), è un ampelofago obbligato introdotto in Europa negli anni '50 del secolo scorso e proveniente dall'areale nearctico (Chuche e Thiery 2014; Alma *et al.*, 2019). Data la sua distribuzione geografica nota all'epoca del rinvenimento, è stato a lungo ritenuto una specie stenica, diffusa solo a cavallo del 45° parallelo (Vidano, 1964). Tuttavia, in tempi recenti, *S. titanus* è stato ritrovato anche più a sud (Italia meridionale e isola di Madeira) e più a nord (Ungheria) (Chuche e Thiery 2014). Se da un lato il suo insediamento a latitudini più basse potrebbe non essere dovuto al surriscaldamento globale, l'adattamento ad areali più settentrionali potrebbe invece esserne una diretta conseguenza. Tale aspetto è stato dimostrato in zone viticole della Svizzera (Rigamonti *et al.*, 2018).

Trattandosi di specie monovoltina, il numero di generazioni annue in *S. titanus* non può essere influenzato dalla temperatura. Tuttavia, il ciclo biologico può presentare sfasamenti in funzione delle fluttuazioni termiche. La schiusa delle uova svernanti è influenzata dalle temperature invernali: più scalare in caso di inverni miti, e molto più concentrata in caso di inverni rigidi (Chuche e Thiery 2009). Anche lo sviluppo (sia embrionale sia post-embrionale) è influenzato dalla temperatura (Falzoi *et al.* 2014). Dal momento che la difesa insetticida è effettuata in funzione della presenza o meno di determinati stadi preimmaginali del vettore, in particolare le ninfe di III età, è evidente sia il fatto che una schiusa scalare è più problematica da gestire, sia che fluttuazioni termiche nel periodo tardo-primaverile (dovute anche a microclimi locali) richiedono particolari accorgimenti organizzativi. Inoltre, gli adulti sono molto più longevi di quanto ritenuto in passato (Bocca *et al.*, 2020). Negli ultimi anni, si sono infatti verificati frequenti ritardi dei picchi e soprattutto delle code di volo (Fig. 4), con presenza

di adulti anche dalla fine di ottobre all'inizio di novembre presumibilmente a causa delle temperature autunnali sempre più miti. Tale aspetto è problematico dato che l'esecuzione dei trattamenti insetticidi è ostacolata dalla necessità di rispettare i tempi di carenza dei principi attivi in funzione della vendemmia (Alma *et al.*, 2018).



Figura 3. Adulto di *Scaphoideus titanus* (foto DISAFA-Entomologia)

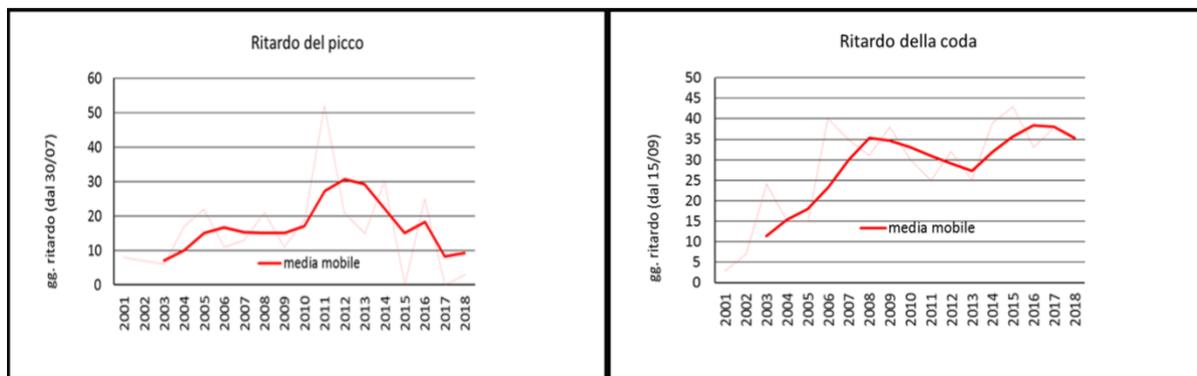


Figura 4. Ritardi dei picchi e delle code di volo in *Scaphoideus titanus* in Piemonte nel periodo 2001-2018 (Figura DISAFA Entomologia)

Pseudococcidi

La famiglia Pseudococcidae comprende specie ampiamente polifaghe: quelle che interessano anche la vite appartengono ai generi *Planococcus*, *Pseudococcus* ed *Heliococcus*, e sono note come cocciniglie farinose (Fig. 5). Le alterazioni causate alla vite sono dovute alla sottrazione di linfa elaborata dal floema e alla produzione di melata che favorisce l'insorgenza di funghi epifiti agenti di fumaggini, con conseguente ostacolo alla fotosintesi. Alcune specie sono anche note come vettori di virus, quali il virus dell'arricciamento fogliare (Leaf Roll

Viruses, GLRaV), e i Grapevine Virus A e B (GVA, GVB), responsabili del complesso del legno riccio (Bertin *et al.*, 2010).

Tali specie, come la maggior parte degli Pseudococcidae, sono polivoltine, potendo completare da tre a sette generazioni in un anno, con svernamento prevalentemente a carico delle femmine fecondate. Quindi, al contrario di quanto avviene in specie monovoltine come *S. titanus*, l'incremento delle temperature può causare un aumento del numero di generazioni all'anno. Si tratta inoltre di specie termofile, amanti dei microclimi caldi e umidi, che possono quindi trarre vantaggio da temperature più elevate anche in termini di espansione a nord dell'areale di distribuzione. Infine, gli pseudococcidi possono essere favoriti indirettamente dalle temperature elevate se queste danneggiano in qualche modo le popolazioni dei loro nemici naturali, sia predatori quali *Cryptolaemus montrouzierii* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae) sia parassitoidi quali *Anagyrus pseudococci* (Girault) e *Leptomasoidea abnormis* (Girault) (Hymenoptera: Encyrtidae) (Reineke e Thiery 2016).



Figura 5. Femmina di *Pseudococcus longispinus* (foto DISAFA-Entomologia)

Tignole dell'uva e altri lepidotteri ampelofagi

Fra i lepidotteri, un ruolo di primaria importanza è ricoperto dalle tignole dell'uva: *Lobesia botrana* Denis & Schiffermuller (tignoletta) ed *Eupoecilia ambiguella* (Hübner) (Lepidoptera: Tortricidae) (tignola) (Fig. 6). Si tratta di specie antofaghe e carpofaghe, dal momento che si sviluppano a spese delle infiorescenze e successivamente degli acini. Le alterazioni prodotte dalle larve sono inoltre prodromiche ad alcuni patogeni fungini, in particolare *Botrytis cinerea*. Le due specie, che dal punto di vista biologico presentano molte analogie (entrambe sono polivoltine e svernano allo stadio di pupa in diapausa, nelle anfrattuosità della corteccia della vite), hanno tuttavia esigenze climatiche differenti. *L. botrana*

è termofila, ed è più diffusa nel bacino del Mediterraneo, mentre *E. ambiguella* predilige un clima più fresco ed è infatti presente soprattutto in Europa centrale. Da questo punto di vista, l'aumento delle temperature potrebbe tradursi in uno spostamento a nord dell'areale di distribuzione (Gutierrez *et al.* 2018). *L. botrana* si è acclimatata con successo in Cile (González, 2008), e in California (Gutierrez *et al.* 2012) da cui però è stata successivamente eradicata (Schartel *et al.*, 2019). Si ritiene che entro il 2055 questa specie potrà espandere il suo areale a nord di circa 11° di latitudine (Reineke e Thiery 2016).



Figura 6. Tignole dell'uva: *Lobesia botrana* (sopra) ed *Eupoecilia ambiguella* (sotto) (foto A. Lucchi)

Le tignole dell'uva sono forse tra le specie più studiate per quanto riguarda lo sviluppo e l'implementazione di modelli previsionali: l'incremento delle temperature si ripercuote infatti

sia sul voltinismo sia sulla fenologia. Per quanto riguarda il voltinismo, temperature estive elevate possono favorire l'aumento del numero di generazioni in *L. botrana* creando problemi soprattutto sui vitigni a vendemmia tardiva. Per quanto riguarda la fenologia, nel trentennio 1983-2013 è stato dimostrato come la prima comparsa stagionale degli adulti, che di solito avviene nel mese di aprile, è avvenuta con 13 e 11 giorni di anticipo rispettivamente per *L. botrana* ed *E. ambiguella* (Fig. 7) (Reineke e Thiery 2016). Tali sfasamenti del ciclo biologico si possono ripercuotere sulle alterazioni a carico dell'uva.

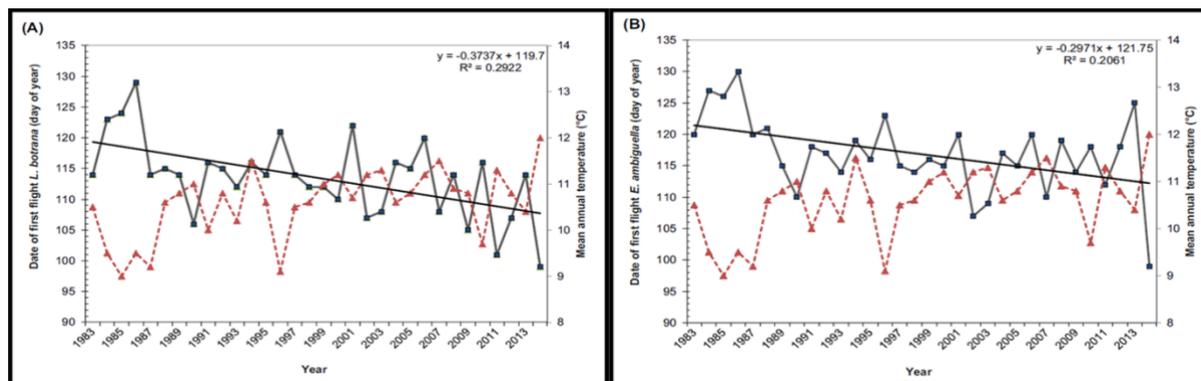


Figura 7. Correlazione tra maschi sfarfallati da pupe svernanti (linea continua blu) e temperature medie annuali (linea tratteggiata rossa) a Rheingau, Germania. A, *Lobesia botrana*; B, *Eupoecilia ambiguella* (modificato da Reineke e Thiéry, 2016)

Conclusioni

L'influenza dei cambiamenti climatici, e in particolare le variazioni in termini di temperatura, stanno avendo e avranno in futuro un notevole impatto sugli insetti ampelofagi (Reineke e Thiéry, 2016; Heeb *et al.*, 2019). I cambiamenti nella fenologia, nel voltinismo e nella sopravvivenza di determinati stadi vitali implicano adattamenti gestionali (soprattutto dal punto di vista fitosanitario), che possono essere calibrati di anno in anno con semplici monitoraggi. L'irruzione di un fitofago in un nuovo areale, sia esso dovuto all'introduzione accidentale in una zona analoga dal punto di vista climatico e distante solo geograficamente, sia alla colonizzazione naturale di zone divenute adatte in seguito a modificazioni di fattori climatici, pone invece la viticoltura di fronte a nuove problematiche, che richiedono una risposta in tempi brevi. In ogni caso, un valido aiuto può giungere dallo sviluppo e dall'applicazione di modelli di simulazione, che consentono infatti di giocare d'anticipo e di non farsi trovare impreparati nel momento in cui si presentasse la necessità di gestire nuove emergenze fitosanitarie.

Bibliografia

Alma A., Lessio F., Gonella E., Picciau L., Mandrioli M., Tota, F., 2018. New insights in phytoplasma-vector interaction: acquisition and inoculation of flavescence dorée phytoplasma by *Scaphoideus titanus* adults in a short window of time. *Annals of Applied Biology*, 173(1), 55-62.

- Alma A., Lessio F., Nickel H., 2019. Insects as phytoplasma vectors: ecological and epidemiological aspects. In *Phytoplasmas: Plant Pathogenic Bacteria-II* (Bertaccini A., Weintraub P.G., Rao G.P., Mori N., eds.) Springer, Singapore, 1-25.
- Bertin S., Cavalieri V., Graziano C., Bosco D., 2010. Survey of mealybug (Hemiptera: Pseudococcidae) vectors of Ampelovirus and Vitivirus in vineyards of northwestern Italy. *Phytoparasitica*, 38(4), 401-409.
- Bocca F.M., Picciau L., Alma A., 2020. New insights on *Scaphoideus titanus* biology and their implication for integrated pest management. *Entomologia generalis*, 40, 337-349.
- Chuche J., Thiéry D., 2009. Cold winter temperatures condition the egg-hatching dynamics of a grape disease vector. *Naturwissenschaften*, 96, 827-834.
- Chuche J., Thiéry D., 2014. Biology and ecology of the Flavescence doree vector *Scaphoideus titanus*: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 381-403.
- Falzo S., Lessio F., Spanna F., Alma A., 2014. Influence of temperature on the embryonic and post-embryonic development of *Scaphoideus titanus* (Hemiptera: Cicadellidae), vector of grapevine Flavescence dorée. *International Journal of Pest Management*, 60, 246-257.
- González R. H., 2008. Biología, desarrollo, caracterización, de danos y manejo fitosanitario de la polilla Europea de la vid, *Lobesia botrana* (D and S)(Lep., Tortricidae)." Universidad de Chile, Dirección de Extensión, Santiago, Chile.
- Gutiérrez A. P., Ponti L., Gilioli G., Baumgartner J., 2018. Climate warming effects on grape and grapevine moth (*Lobesia botrana*) in the Palearctic region. *Agricultural and Forest Entomology*, 20, 255-271.
- Heeb L., Jenner E., Cock M.J.W., 2019. Climate-smart pest management: building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*, 92, 951-969.
- Reineke A., Thiéry D., 2016. Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. *Journal of Pest Science*, 89, 313-328.
- Rigamonti I. E., Mariani L., Cola G., Jermini M., Baumgartner J., 2018. Abrupt and gradual temperature changes influence on the climatic suitability of Northwestern Alpine grapevine-growing regions for the invasive grape leafhopper *Scaphoideus titanus* Ball (Hemiptera, Cicadellidae). *Acta Oecologica-International Journal of Ecology*, 91, 22-29.
- Schartel T. E., Bayles B. R., Cooper M. L., Simmons G. S., Thomas S. M., Varela L. G., Daugherty M. P., 2019. Reconstructing the European grapevine moth (Lepidoptera: Tortricidae), invasion in California: Insights from a successful eradication. *Annals of the Entomological Society of America*, 112, 107-117.
- Vidano C., 1964. Scoperta in Italia dello *Scaphoideus littoralis* Ball, cicalina americana collegata alla Flavescence dorée della vite. *L'Italia Agricola*, 10, 1031-1049.

Intensificazione degli stress multipli estivi: nuove strategie per la gestione flessibile del vigneto

Palliotti A.¹, Giordano L.¹, Bellincontro A.²

¹ Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli Studi di Perugia, Borgo XX Giugno 74, 06121 Perugia.

² Dipartimento per l'Innovazione nei Sistemi Biologici, Agro-Alimentari e Forestali, Università della Tuscia, Via S. Camillo de Lellis, 01100 Viterbo.

Riassunto

Il *trend* di cambio climatico, in generale, e il *global warming*, in particolare, sono ormai certezze consolidate ed il loro impatto sull'attività agricola è sempre più evidente. La viticoltura non sfugge alle nuove esigenze che il clima, soprattutto in funzione dell'aumento della frequenza di eventi estremi, impone. Una strategia di medio-lungo periodo dovrà prevedere un aggiornamento della piattaforma ampelografica, soprattutto per ciò che riguarda vitigni, cloni e portinnesti resistenti agli *stress* abiotici, carenza idrica ed eccessi termici e radiativi *in primis*. Nel breve periodo, la possibilità di calmierare gli effetti indotti dal cambio di clima, da una parte, e dalle nuove esigenze del mercato, dall'altra, sono legate ad aggiustamenti delle pratiche colturali classiche e/o all'uso di inusuali tecniche, quali l'uso di antitranspiranti e del caolino e/o le defogliazioni settoriali tardive, applicate cioè quando la crescita degli acini è terminato potrebbero dare un reale aiuto nel superare periodi critici, preservando l'integrità di foglie e acini e/o nel contenere l'accumulo degli zuccheri nell'uva in modo efficace oltre che semplice ed economico.

Abstract

The trend of climate change, in general, and the global warming, in particular, are now consolidated certainties and their impact on agricultural activity is increasingly evident. Viticulture certainly does not escape the new cultural needs that the climate, especially as a function of the increase in the frequency of extreme events, imposes. A medium-long term strategy will certainly have to provide for an update of the ampelography platform, especially as regards varieties, clones and rootstocks resistant to abiotic stress, i.e. water shortage and thermal and radiative excesses. In the short term, the possibility of containing the negative effects induced by the climate change, on the one hand, and by the new needs of the market, on the other, are linked to adjustments of traditional cultivation practices and / or the use of unusual techniques, such as the use of antitranspirant and kaolin and / or late sectorial leaf removal, applied when the growth of the berries has ended, could give real help in overcoming critical periods, preserving the integrity of leaves and berries and / or in containing the accumulation of sugars in grapes in an effective as well as simple and economical way.

Parole chiave: *Vitis vinifera*, stress estivi, antitranspiranti, caolino, defogliazione

Introduzione

L'ambiente in cui viviamo ha subito in questi ultimi 2 decenni intensi cambiamenti riguardo sia la parte climatica che quella edafica, con digressioni nelle fasi fenologiche e nei processi fisiologici e metabolici. Gli effetti di tali mutamenti sono riscontrabili in tutte le aree vitivinicole del mondo con la comparsa di nuove problematiche, imputabili al binomio

“aumento della temperatura dell'aria - riduzione delle piogge”, da una parte, e dall'intensificazione ed anticipo temporale dei fenomeni meteo estremi in estate, quali le ondate di calore, dall'altra. Di fatto questi fenomeni arrivano più precocemente, con le piante che non sono acclimatate e quindi molto più vulnerabili. Ciò sta minando la vocazionalità viticola in numerose aree, le quali manifestano disponibilità termiche in esubero rispetto ai fabbisogni dei vitigni coltivati, oltre a fenofasi forzatamente anticipate. Inoltre, le fasi finali della maturazione coincidono con i periodi più caldi; una diretta conseguenza è un accumulo troppo rapido ed eccessivo di zuccheri nel mosto, spesso associato a scarsi livelli di acidità e colore, pH elevati e aromi atipici. Di risulta, i vini sono troppo alcolici, poco freschi, cromaticamente insufficienti, dotati di una componente aromatica sbilanciata ed esposti a problemi di stabilità e conservazione (Palliotti et al., 2014). Tutto ciò non consente di produrre vini richiesti dai consumatori odierni, ovvero caratterizzati da un moderato contenuto alcolico, freschi, vivaci e fruttati. Non meno problematici sono la comparsa di aromi sbilanciati verso i sentori tipici della sovra maturazione, cali significativi nelle rese produttive, fenomeni di fotoinibizione a carico delle foglie con clorosi e necrosi, disidratazioni spinte e scottature dell'uva fino ad arrivare nei casi più gravi alla morte delle viti (Palliotti et al., 2014 e 2015).

Numerosi vigneti manifestano oggi evidenti anomalie, soprattutto nei processi di maturazione dell'uva, nonostante l'attuazione di sistemi culturali ottimizzati e tecnicamente validi, quali:

- anticipo delle fasi fenologiche;
- accelerazione del processo di maturazione tecnologica delle uve ed il conseguente incremento della concentrazione zuccherina dei mosti e del tenore alcolico dei vini;
- accelerato depauperamento del quadro acidico dei mosti ed eccessivi aumenti a carico del pH, con valori superiori a 3,5-3,6 e ripercussioni negative sulla stabilità microbiologica delle masse in fase di pre-fermentazione;
- disaccoppiamento tra la maturazione tecnologica dell'uva, sempre più accelerata, e la maturità fenolica, maggiormente ritardata con problematiche per i vitigni a bacca nera;
- aumento dei fenomeni di disidratazione spinta ed irreversibile degli acini sempre più soggetti a gravi danni da scottature solari (*sun-burn*) (Fig. 1).

Durante l'estate, sempre più di frequente gli *stress* si manifestano in modo congiunto, ovvero carenza idrica ed eccessi termici-radiativi. A livello fisiologico, l'aumento della frequenza e dell'intensità di tali *stress* induce "fotoinibizioni croniche" a carico delle foglie cui seguono clorosi e necrosi (foto-danneggiamento) (Fig. 1) (Palliotti et al., 2014b). Questo tipo di stress, preceduto da fenomeni di "*down-regulation* foto-assimilativi", cioè da riduzioni intense e durature di fotosintesi netta, specie durante le ore centrali della giornata, merita attenzione, poiché riduce l'efficienza del vigneto, la produttività delle piante, il reintegro delle riserve nutrizionali e compromette la composizione dell'uva.



Figura 1. Vigneti a rischio di sopravvivenza per carenza idrica prolungata ed eccessi termici e radiativi. Sintomatologia da fotoinibizioni croniche con clorosi e necrosi a livello fogliare, scottature solari (*sun-burn*) in acini di Grechetto ed imbrunimenti per ossidazione dei fenoli in chinoni ad opera delle polifenolossidasi.

Stress multipli estivi e disfunzioni fisiologiche e biochimiche

Inizialmente sono interessate le foglie basali per proseguire poi, quando la situazione diventa grave, con quelle mediane ed apicali. Queste disfunzioni irreversibili si determinano quando l'energia di eccitazione supera la capacità di assimilazione della CO₂ e/o quando i meccanismi di riparazione diventano inefficienti. In queste situazioni, i tessuti fogliari deviano il normale metabolismo e perdono la capacità di dissipare efficacemente l'energia in eccesso, poiché i meccanismi preposti a tale funzione collassano. Si verificano infatti l'azzeramento della traspirazione fogliare in conseguenza della totale chiusura degli stomi, la rottura del ciclo delle xantofille (depossidazione della violaxantina in zeaxantina e anteroxantina) e della fluorescenza della clorofilla, ad aumenti della foto-respirazione con elevate produzioni di composti reattivi all'ossigeno (ROS) (Palliotti et al., 2015). Risultato: fisiologia di base pressoché azzerata, rese produttive limitate, qualità totalmente compromessa e seri rischi di morte delle viti per disseccamento, come è accaduto nelle annate 2003, 2007, 2012, 2015, 2017, 2019 e 2020 (Fig. 1). Le alte temperature in sinergia con alte intensità luminose e carenza idrica alterano la stabilità delle membrane cellulari, favoriscono la denaturazione delle proteine cui seguono modifiche a livello morfo-fisiologico e metabolico dei tessuti dei vari organi epigei, ovvero clorosi e necrosi nelle foglie e danni da scottature solari negli acini (Palliotti et al. 2009 e 2014). Inoltre, a livello compositivo gli *shock* termici compromettono l'accumulo di aromi primari e

degli antociani, e causano rapidi aumenti a carico degli zuccheri e del pH, blocchi nel metabolismo dei fenoli e drastici cali di acidità, soprattutto malica.

L'emergenza che abbiamo vissuto nell'estate 2017, che ha determinato forti decurtazioni produttive, pessima qualità delle uve e seri rischi per la sopravvivenza delle viti, è dipesa in massima parte da *stress* da calore (*heat shock*) accompagnati da forte carenza idrica. Dal punto di vista pratico, in questi casi è utile definire parametri e/o formule, possibilmente semplici, che consentono di intervenire tempestivamente; un aiuto in tal senso ci viene dall'*Australian Grape and Wine Authority* che definisce rischioso lo stress da calore quando le temperature massime dell'aria sono superiori a 35 °C per 2-3 giorni consecutivi oppure con temperature massime maggiori di 40 °C per un solo giorno. Basterebbe pertanto un monitoraggio giornaliero delle temperature massime dell'aria per avere informazioni utili in modo da poter intervenire tempestivamente. Questi limiti vengono ormai ripetutamente superati più volte nel corso dell'estate in molti areali, a titolo di esempio nel bacino del lago Trasimeno in Umbria nell'estate del 2017 oltre ad una forte limitazione nelle piogge da gennaio a settembre (con -125% rispetto al 2016), la temperatura massima dell'aria ha superato i fatidici 35 e 40 °C per ben 44 e 6 giorni rispettivamente, contro soltanto 11 e 0 riscontrate nel 2016. In tali situazioni il problema dominante, difficile da contrastare in campo, è rappresentato dalle alte temperature che foglie ed acini mostrano durante le ore più calde con valori che possono superare 49-50 °C (ben 8-10 °C in più rispetto alla temperatura dell'aria).

Tecniche flessibili di gestione della chioma

Il global warming sta generando aree di produzione nelle quali le deviazioni meteo dannose per gli attuali schemi di coltivazione sono piuttosto ricorrenti e che richiedono interventi *ad hoc*. Oltre ad alcune tecniche scarsamente flessibili, che si applicano cioè all'inizio della stagione senza sapere se poi gli *stress* estivi si verificheranno, quali potatura tardiva in post-germogliamento (Frioni et al., 2016) e rifinitura in post-germogliamento di viti pre-potate meccanicamente (Pallotti et al., 2017a), ve ne sono alcune dotate di elevata flessibilità, poiché utilizzabili anche a stagione avanzata e solo se si verificano condizioni critiche (Tab. 1).

Tabella 1. Effetti su rese di produzione, epoca ottimale di vendemmia e composizione dell'uva di alcune tecniche flessibili di gestione della chioma.

n.	Tecniche	Resa	Zuccheri	Acidità	Antociani	Polifenoli	Aromi primari	Epoca di vendemmia
1	Defogliazione in post-invaiatura della porzione medio-alta della chioma	=	↓	=	=	=	=	=
2	Cimatura severa e/o tardiva dei germogli	↓	↓	=	=	=	nd	↑
3	Antitraspiranti in post-invaiatura	=	↓	=	↓; =	=	=	=
4	Reti schermanti	=	↓	↑	↓	=	-	↑
5	Caolino	↑	=	↑	↑	=	nd	=
6	Irrigazione sovra-chioma refrigerante	↑	↓	↑	nd	nd	↑	↑

= ininfluente; ↑ aumento (o posticipo); ↓ diminuzione (o anticipo); nd non determinato.

La maggior parte di queste tecniche rallentano la produzione ed accumulo di zuccheri nel mosto, poiché si basano sull'induzione di *stress* fotosintetici calibrati (tecniche 1, 2, 3, 4) e nel posticipare talvolta l'epoca ottimale di vendemmia. Altre agiscono sull'induzione di meccanismi di competizione nutrizionale tra i vari organi della pianta (tecnica 2), altre ancora agiscono riducendo o limitando gli *stress* termici e radiativi (tecniche 4, 5 e 6), poiché esercitano un effetto schermante cui segue una riduzione della temperatura sia delle foglie che degli acini.

1) Defogliazione in post-invaiaitura della porzione medio-alta della chioma

Nelle annate particolarmente calde, ove la maturazione tecnologica dell'uva risulta accelerata con accumuli elevati ed anticipati di zuccheri, una defogliazione in post-invaiaitura con l'eliminazione di una quantità sufficiente di foglie funzionali nella porzione medio-alta della chioma (Fig. 2) rallenta la maturazione, grazie ad una riduzione del rapporto "superficie fogliare/produzione", ed evita una vendemmia anticipata e i sicuri peggioramenti qualitativi che ne conseguono. I vini prodotti con uve maturate troppo rapidamente si caratterizzano per una perdita eccessiva di colore e scarsa polimerizzazione dei tannini, smisurato sapore amaro e forti note vegetali, conseguente l'elevata estraibilità delle proantocianidine dai vinaccioli, quadro aromatico particolarmente povero ed inespresso.



Figura 2. Defogliatrice meccanica al lavoro sulla parte medio-alta della chioma e particolare della finestra aperta nella chioma dopo due passaggi della macchina per ciascun filare.

Nello specifico, l'eliminazione del 35% delle foglie (circa 1,5 m²/ceppo) ha ridotto il rapporto "superficie fogliare/uva" del 36% (-0,64 m²/kg), gli zuccheri nel mosto di ben 1,2 °Brix e 0,6% di alcol nei vini, senza penalizzare la resa e gli altri parametri compositivi dell'uva e dei vini (Palliotti et al., 2013a). Oltre alla semplicità di esecuzione e ai costi contenuti, questa tecnica consente di ritardare la vendemmia fino a due settimane e pertanto può essere adatta anche per ampliare il periodo utile di vendemmia in specifici appezzamenti, come può accadere quando si hanno elevate superfici del medesimo vitigno o di vitigni a maturazione contemporanea e si vogliono evitare svinature anticipate con perdite di colore, tannini e profumi. Per essere efficace tale tecnica deve essere applicata quando il contenuto zuccherino è intorno a 13-14 °Brix ed è necessario rimuovere il 30-35% delle foglie presenti nella parte medio-alta della chioma,

ovvero quelle più giovani e fotosinteticamente efficienti. Riguardo la modalità di esecuzione, si può facilmente meccanizzare con defogliatrice meccanica e tempi operativi di 2-3 ore/ha.

2) Cimatura severa e/o tardiva dei germogli

Una strategia di rallentamento della maturazione può essere ottenuta favorendo una ricrescita di femminelle calibrata e giustamente competitiva. La tecnica più affidabile è una cimatura dei germogli drastica o in epoca tardiva. Interventi energici di cimatura eseguiti all'allegagione su Riesling hanno indotto un ritardo di maturazione di 20 giorni ed una riduzione degli zuccheri di 4 °Brix (Stoll et al., 2009). Sui vitigni Grenache e Tempranillo, cimature dei germogli particolarmente anticipate ed aggressive, ovvero taglio eseguito dopo l'allegagione subito al di sopra del grappolo distale, hanno rallentato il processo di maturazione con cali significativi a carico di zuccheri, antociani e polifenoli totali e del pH nel mosto, nonché del peso del grappolo e dell'acino (Balda e Martinez de Toda, 2011). Questi risultati sono per lo più imputabili a due effetti primari: 1) riduzione del rapporto "superficie fogliare/uva"; 2) competizione nutrizionale tra lo sviluppo delle femminelle di neo formazione e la fase di accumulo nell'uva. Il posticipo dell'epoca di cimatura, appropriatamente valutato in funzione di eventuali *stress* estivi che solitamente accelerano la maturazione dell'uva, può oggi consentire di posticipare la vendemmia, limitare l'alcolicità dei vini e mantenere livelli superiori di acidità. Di recente è stato dimostrato come le cimature molto tardive, eseguite cioè in fase di maturazione avanzata, a 15-17 °Brix di zuccheri nel mosto, consentono di ridurre l'alcolicità dei vini e/o di posticipare l'epoca di vendemmia senza interferire negativamente con l'accumulo di antociani e tannini (Filippetti et al., 2015).

3) Antitraspiranti in post-invaiatura

Un'altra tecnica in grado di indurre un calibrato calo di fotosintesi è l'applicazione, alla chioma intera o nella parte medio-alta, di antitraspiranti abili nel causare una parziale chiusura degli stomi delle foglie utile a contenere gli scambi gassosi. L'efficacia di applicazioni sul vigneto di un antitraspirante di origine naturale ottenuto per distillazione dalle resine delle conifere, ovvero il VaporGard a base di pinolene (principio attivo di-1-*p*-menthene, C₂₀H₃₄) in post-invaiatura è stato testato su differenti vitigni (Palliotti et al. 2013b). Il prodotto, una volta irrorato, evapora nel giro di poche ore lasciando sulle foglie un sottile film trasparente che limita in maniera parziale gli scambi gassosi (-30÷70% rispetto ai controlli non trattati) per un periodo di circa 40-50 giorni e, una volta degradato, consente alla foglia un recupero di funzionalità pressoché totale. Indagini eseguite fin dal 2008 con applicazioni tardive in post-invaiatura di VaporGard al 2% hanno evidenziato una riduzione costante e significativa dell'accumulo degli zuccheri nel mosto e quindi dell'alcolicità dei vini ed un rallentamento della maturazione dell'uva indipendentemente dall'annata (dal 2008 al 2011), dal vitigno (Sangiovese, Tocai rosso, Trebbiano toscano e Grechetto) e dalla carica produttiva (da 7 a 32 t/ha di uva) (Fig. 3).

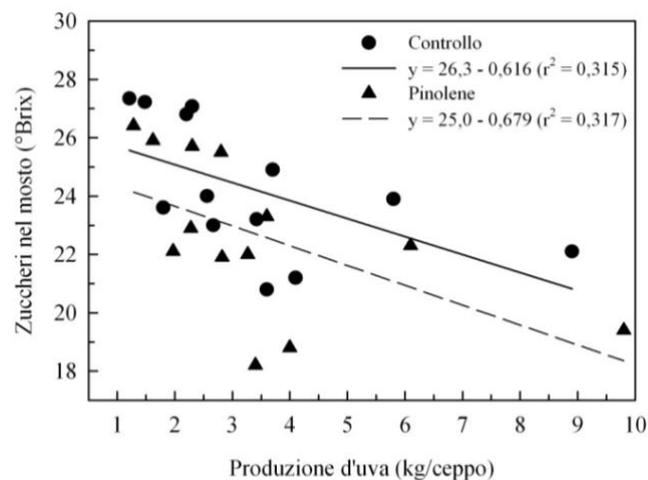


Figura 3. Correlazione tra produzione d'uva a ceppo e accumulo di zuccheri nel mosto in differenti vitigni sottoposti a trattamento tardivo con l'antitranspirante VaporGard (2%) e non trattati. I dati si riferiscono al periodo 2008-2011 e riguardano vigneti di Sangiovese, Tocai rosso, Trebbiano toscano e Grechetto con differenti cariche produttive.

L'applicazione tardiva dell'antitranspirante VaporGard è utile nei casi in cui l'obiettivo è ridurre e/o rallentare l'accumulo degli zuccheri nel mosto con l'intento di diminuire l'alcolicità dei vini; a tal fine è necessario: 1) irrorare soprattutto la pagina inferiore delle foglie per ottenere una buona copertura delle aperture stomatiche indispensabile per ridurre l'attività fotosintetica; 2) intervenire quando il contenuto degli zuccheri è intorno a 13-14 °Brix.

4) Reti schermanti

Limitazioni fotosintetiche si possono ottenere con tecniche di ombreggiamento totale o parziale della chioma per mezzo, ad esempio, di reti schermanti. Oltre a preservare la produzione da eventuali danni da grandine, un ombreggiamento limitato alla fascia dei grappoli aiuta certamente nel contenere il surriscaldamento dei grappoli e quindi nel preservare una frazione più elevata di acido malico, componente essenziale in un'ottica di vinificazione soprattutto per vini bianchi frizzanti e/o base spumante. L'ombreggiamento sia artificiale che naturale molto spesso ritarda la maturazione dell'uva e riduce la capacità di accumulo di zuccheri, antociani e polifenoli, mentre rallenta la degradazione degli acidi organici. Recentemente è stato accertato che questi risultati sono imputabili maggiormente all'ombreggiamento delle foglie piuttosto che a quello dei grappoli e con riferimento ai flavonoidi questi effetti sono principalmente collegati all'espressione dei geni responsabili della loro biosintesi. A questo riguardo studi eseguiti sullo *stress* da carenza luminosa relativo all'intera chioma hanno messo in evidenza come l'ombreggiamento artificiale delle chiome di Sangiovese realizzato ponendo in opera, prima del germogliamento, reti schermanti neutre capaci di attenuare del 40% e del 70% la piena luce solare, hanno ridotto in modo rilevante l'attività fotosintetica delle foglie durante l'intera giornata con ripercussioni negative sulla

produttività unitaria (-11% e -14% rispettivamente nella tesi schermata 40% e 70% rispetto al controllo sviluppato alla piena luce solare), sull'accumulo degli zuccheri nel mosto (rispettivamente -4,3 e -5,1 °Brix) e sulla degradazione degli acidi organici, con uve maggiormente acide nelle chiome ombreggiate (Cartechini e Palliotti, 1995).

5) Caolino con funzione sunscreen

Nei periodi estivi particolarmente caldi e siccitosi trattamenti alla chioma con l'argilla bianca caolino inducono un vero e proprio effetto "sunscreen", con riduzioni apprezzabili della temperatura dei tessuti (fino a oltre 7-8 °C) grazie all'elevata riflessione della radiazione solare (Fig. 4). Ciò contribuisce a contenere le fotoinibizioni preservando l'integrità delle foglie che, contrariamente a quelle non trattate, riprendono la normale attività fotosintetica dopo il passaggio dello stress da calore; le rese vengono in tal modo protette così come la composizione dell'uva, in particolare acidità ed antociani (Tab. 2) (Palliotti et al. 2017b).

Tabella 2. Rese produttive e composizione dell'uva in viti di Pinot nero sottoposte a trattamento con caolino e controllo non trattato.

	Produzione (kg/vite)	Peso grappolo (g)	Zuccheri (°Brix)	Acidità titolabile (g/L)	pH del mosto	Antociani totali (g/L)	Polifenoli totali (g/L)
Controllo	1,12 b	110 b	23,0 a	5,4 b	3,26 a	240 b	916 a
Caolino	1,45 a	148 a	23,2 a	6,0 a	3,28 a	325 a	910 a

Le medie accompagnate da lettere diverse sono significativamente differenti per $P \leq 0,05$.



Figura 4. Trattamento con caolino alla dose di 3 kg/100 litri d'acqua eseguito il 3-08-2017 dopo alcune giornate con temperature dell'aria superiori a 42 °C e particolare di foglie e grappolo 1 settimana dall'irrorazione.

Dopo ogni pioggia l'efficacia del prodotto diminuisce per parziale dilavamento ed è necessario un nuovo trattamento. A tal fine per aumentare l'aderenza e la resistenza è possibile addizionarlo di opportuni adesivanti; ottimo risulta il Nu-Film-P (Biogard) costituito dal polimero terpenico pinolene ottenuto dalla distillazione delle resine di conifere. Al fine di contenere le dosi può essere proficuo utilizzare il caolino non su tutto il vigneto, ma soltanto

sulle pareti dei filari assolati nel pomeriggio, poiché più sensibili agli stress da calore. Infine questa tecnica, oltre ad essere efficace e quindi da tenere in considerazione nei periodi estivi critici, risulta economica, veloce da applicare e non richiede particolari attrezzature e/o professionalità.

6) Irrigazione sovra-chioma refrigerante

L'irrigazione sovra-chioma ad effetto climatizzante, con un fabbisogno idrico piuttosto modesto, può efficacemente "raffreddare" il vigneto nei momenti di maggior criticità preservando elementi chiave della qualità delle uve, in particolare acidità ed aromaticità (Paciello et al., 2016). In questo sistema, che si realizza con il montaggio di particolari nebulizzatori, l'effetto di raffrescamento sfrutta il passaggio dell'acqua dalla fase liquida a quella di vapore che, assorbendo energia sotto forma di calore, precisamente 510 kcal/litro, comporta di fatto un raffreddamento dell'ambiente circostante. Sulla base di ciò, nell'estate del 2013 è stata eseguita una esperienza in un vigneto di Sauvignon blanc allevato a Guyot approntando un sistema di nebulizzazione (Cooling DewTM), sviluppato dal Gruppo OasiclimaticaTM Italia (Osio Sotto, Bergamo), montando su filari alterni coppie di nebulizzatori (distanti 3,5 m) su un filo metallico posto a 20 cm dal suolo ed orientati in direzione opposta con un angolo di 45°, in grado di dirigere l'acqua nebulizzata sui filari adiacenti. La spinta dell'acqua ad una pressione di circa 70 bar attraverso ugelli con foro di 0,15 mm atomizza le goccioline fino ad un diametro di 0,1 µm e produce in tal modo una cortina di nebbia tale da coprire l'intera chioma. L'impianto, comandato da una centralina collegata ad un termostato per la rilevazione della temperatura, era stato programmato per attivarsi ogni qualvolta la stessa superava un valore soglia (es. 30 °C) e disattivarsi una volta che la temperatura veniva ricondotta al di sotto di questa soglia. La temperatura, abbassata sotto i 30 °C in circa 1 minuto di erogazione, si manteneva al di sotto di tale soglia per circa 7-8 minuti prima che il calore dell'irraggiamento solare facesse risalire nuovamente la temperatura oltre i 30 °C, provocando così la ripresa della nebulizzazione. L'installazione di un umidostato garantiva che, indipendentemente dalla temperatura, in caso di umidità relativa superiore ad una certa soglia (es. 70%) l'impianto non entrasse in funzione. Considerando i valori soglia sopra indicati, la quantità di acqua che ciascun atomizzatore utilizza può variare da 0,30 a 0,35 l/minuto. I cicli di nebulizzazione sono in grado di abbassare la temperatura nelle ore più calde della giornata con punte di differenziale termico fino a -7 °C. Normalmente segue un rallentamento nelle cinetiche sia di accumulo degli zuccheri nel mosto sia di degradazione dell'acidità titolabile e malica, con un posticipo di circa 7-8 giorni nell'epoca di vendemmia. Le uve della tesi nebulizzata hanno mantenuto un maggior tenore in acidità totale e malica, valori di pH più consoni alla produzione di vini freschi ed un minor contenuto in zuccheri. In vendemmia non sono state riscontrate modifiche sostanziali a carico delle rese, del numero di grappoli a pianta e del peso medio del grappolo e dell'acino, mentre l'analisi dei vini ha evidenziato che la nebulizzazione refrigerante consente di mantenere un pH minore, ed un'acidità, sia totale che malica, significativamente maggiore, mentre l'alcolicità non ha mostrato variazioni

apprezzabili. I tioli volatili considerati hanno manifestato aumenti significativi nei vini prodotti dal vigneto sottoposto a nebulizzazione pari al 33% per il 3-sulfanylhexanol e al 22% per il 3-sulfanylhexylacetate, mentre il methyl-4-sulfanylpentan-2-one ha subito una riduzione significativa. Questa tecnica richiede modesti volumi d'acqua e limita i danni causati dagli eccessi termici, incluse le fotoinibizioni, assicura inoltre una più regolare maturazione dell'uva necessaria per produrre vini di qualità superiore attraverso la salvaguardia del pH e del tenore acidico, specialmente della frazione malica, ed aumenti a carico di alcuni tioli volatili importanti ai fini dell'aromaticità del vino.

Conclusioni

Il *trend* di cambio climatico è ormai una certezza consolidata ed il suo impatto sull'attività agricola è sempre più evidente, soprattutto riguardo l'aumento della frequenza ed intensità degli eventi meteo estremi. Una strategia di medio-lungo periodo dovrà prevedere un aggiornamento della piattaforma ampelografica, soprattutto per ciò che riguarda la disponibilità di vitigni, cloni e nuovi portinnesti resistenti a stress abiotici, carenza idrica ed eccessi termici e radiativi in particolare. Allo stesso tempo, occorrerà aumentare le conoscenze, soprattutto per i vitigni di territorio, relative ai meccanismi con cui si adattano a condizioni in aumento di radiazione solare, temperatura e deficit di pressione di vapore e in calo riguardo la disponibilità idrica. La sfida che ci attende nel prossimo futuro, dietro la spinta anche delle nuove esigenze del mercato, è quella di ottenere prodotti con un moderato grado alcolico senza però, nei vini rossi, modificare l'intensità di colore, la struttura e le proprietà sensoriali e, nei vini bianchi, il quadro acidico ed aromatico. Un aiuto strutturale in tal senso potrebbe derivare anche da un riesame circa la scelta del sistema di allevamento in fase di progettazione del vigneto che tenga maggiormente conto degli scenari, soprattutto climatici, che ormai si sono delineati. Certamente, nel breve periodo, la possibilità di calmierare gli effetti indotti dal cambio di clima, da una parte, e dalle nuove esigenze del mercato, dall'altra, sono legate ad aggiustamenti della tecnica colturale da applicare senza rivoluzionare protocolli colturali consolidati e spesso premiati da successi di mercato, ma senza opporre barriere a quelle che sono spesso applicazioni calibrate, anche se certamente non convenzionali, delle medesime tecniche. Infine, alcune tecniche di recente impiego quali l'uso di antitraspiranti e del caolino e/o le defogliazioni settoriali tardive, applicate cioè quando il processo di crescita degli acini è completo, potrebbero dare un reale aiuto nel superare periodi particolarmente critici preservando l'integrità di foglie e acini e/o nel contenere l'accumulo degli zuccheri nell'uva in modo efficace oltre che semplice ed economico.

Bibliografia

- Cartechini A., Palliotti A., 1995. Effect of shading on vine morphology and productivity and leaf gas exchange characteristics in grapevines in the field. *Am. J. Enol. Vitic.* 46: 227-234.
- Filippetti I., Movahed N., Allegro G., Valentini G., Pastore C., Colucci E., Intriery C., 2015. Effect of post-veraison source limitation on the accumulation of sugar, anthocyanins and seed tannins in *Vitis vinifera* L. cv. Sangiovese berries. *Austr. J. Grape Wine Res.*, doi: 10.1111/ajgw.12115.

- Frioni T., Tombesi S., Silvestroni O., Lanari V., Bellincontro A., Sabbatini P., Gatti M., Poni S., Palliotti A., 2016. Postbudburst spur-pruning reduces yield and delays fruit sugar accumulation in Sangiovese in Central Italy. *Am. J. Enol. Vitic.* 67 (4): 419-425.
- Martinez De Toda F., Balda P., 2011. Decreasing the alcohol level in quality red wines by the double harvest techniques. Proceedings of "17th Intern. Symp. Giesco", August 29th - 2nd September 2011, Asti - Alba, Italy, pp. 463-466.
- Paciello P., Mencarelli F., Palliotti A., Ceccantoni B., Thibon C., Darriet P., Pasquini M., Bellincontro A., 2016. Nebulized water cooling of the canopy affects leaf temperature, berry composition and wine quality of Sauvignon blanc. *J. Sci. Food Agric.* 97: 1267-1275.
- Palliotti A., Panara F., Silvestroni O., Lanari V., Sabbatini P., Howell G.S., Gatti M., Poni S., 2013a. Influence of mechanical postveraison leaf removal apical to the cluster zone on delay of fruit ripening in Sangiovese (*Vitis vinifera* L.) grapevines. *Austr. J. Grape Wine Res.*, 19: 369-377.
- Palliotti A., Panara F., Famiani F., Sabbatini P., Howell G.S., Silvestroni O., Poni S., 2013b. Postveraison application of antitranspirant Di-1-p-Menthene to control sugar accumulation in Sangiovese grapevines. *Am. J. Enol. Vitic.* 64: 378-385.
- Palliotti A., Tombesi S., Silvestroni O., Lanari V., Gatti M., Poni S., 2014b. Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A Review. *Sci. Hortic.* 178: 43-54.
- Palliotti A., Tombesi S., Frioni T., Silvestroni O., Lanari V., D'Onofrio C., Matarese F., Bellincontro A., Poni S., 2015. Physiological parameters and protective energy dissipation mechanisms expressed in the leaves of two *Vitis vinifera* L. genotypes under multiple summer stresses. *J. Plant Physiol.* 185: 84-92.
- Palliotti A., Frioni T., Tombesi S., Sabbatini P., Cruz-Castillo J.G., Lanari V., Silvestroni O., Gatti M., Poni S., 2017a. Double-pruning grapevine as a management tool to delay berry ripening and control yield. *Am. J. Enol. Vitic.* 68: 412-421.
- Palliotti A., Frioni T., Leoni F., 2017b. Caolino a effetto sunscreen. *Vigne, Vini & Qualità (VVQ)* 8: 46-49.
- Stoll M., Scheidweiler M., Lafontaine M., Schultz H.R., 2009. Possibilities to reduce the velocity of berry maturation through various leaf area to fruit ratio modification in *Vitis vinifera* L. Riesling. *Proc. Of 16th Inter. Giesco Symp.*, July 12-15 Davies (California (USA, pp 93-96.)