

# Colture poliennali: prospettive di sviluppo

## *Perspectives for developing perennial crops*

Tommaso Porta

### Abstract

*Agriculture is one of most important sources of pollution among human activities and could lead to unsustainable scenarios in the long run. The main characteristic of traditional agriculture is to be based on annual crops which, for their own nature, require a large amount of resources. One possible solution for the future could be the development of perennial crops that would help agriculture to turn towards less intensive use of resources and to soften pressure on the environment.*

**Keywords:** *Agriculture, Sustainability, Perennial Crops, Carbon Management, Water Use, Soil Erosion, Fertilizers, Crops Domestication.*

### Introduzione

*“(...) in confronto a ciò che fu, ora non rimangono che le ossa di un corpo malato; come accade per le piccole isole, tutto il suolo più ricco e soffice è stato portato via, e non rimane che uno scheletro di nude rocce. Ma in origine le sue montagne erano come alte colline fertili, e le pianure, che ora noi chiamiamo di Felleo, erano ricoperte di terra ricca, e vi erano boschi in abbondanza sulle montagne. Di questi ultimi non rimangono che poche tracce, in luoghi che ormai offrono sostentamento soltanto alle api (...). Vi crescevano numerosi alti alberi, ma vi erano anche pascoli inesauribili per il bestiame. Inoltre ogni anno la terra godeva dell'acqua che veniva da Zeus, e non la perdeva, come avviene ai nostri giorni, in cui cola via dalla terra spoglia direttamente nel mare; poiché ne aveva in abbondanza la accoglieva nel suo seno, la teneva in serbo nella terra argillosa e impermeabile, lasciandola poi cadere dalle alture alle pianure, offrendo dappertutto un abbondante flusso di sorgenti e fiumi, ed i santuari che ancora oggi rimangono presso le sorgenti che esistevano un tempo sono una testimonianza del fatto che i racconti odierni su di essa corrispondono a verità. (...)”*

Platone, Crizia

L'agricoltura moderna necessita di grandi distese di terreno, di un consumo costante di acqua, energia e sostanze chimiche. Ha di conseguenza un enorme impatto ambientale, tanto che il rapporto delle Nazioni Unite "Millenium Ecosystem Assessment 2005" dichiarava che l'agricoltura potrebbe rappresentare "la più grande minaccia per la biodiversità e l'ecosistema di qualunque altra attività umana".

In uno scenario in cui la popolazione della Terra è in crescita ed è previsto che raggiungerà i 9 miliardi di individui nel 2050 (World Population Prospects: the 2006 Revision), uno dei problemi di maggiore portata che l'umanità dovrà affrontare sarà quello del proprio autosostentamento alimentare. Sarà infatti possibile nutrire adeguatamente un numero così grande di persone, e soprattutto sarà possibile farlo in modi che siano sostenibili per il pianeta sul lungo periodo?

Ad aumentare la criticità dell'argomento vi è il fatto che oltre ad una semplice crescita numerica della popolazione vi sarà un incremento della ricchezza media pro-capite e con esso delle possibilità di accesso al cibo di una parte consistente della popolazione. Aumenterà di conseguenza la quantità di cibo consumata da ciascun individuo e si sposteranno le preferenze medie dai cibi più "poveri", ovvero quelli direttamente fruibili dall'agricoltura e di più efficiente produzione, a quelli più "ricchi", in particolar modo alla carne, che necessita

di una grande produzione agricola e pascoliva per essere allevata, e che quindi attua una maggiore pressione sulle risorse agricole.

Inoltre un problema per il sostentamento alimentare del pianeta potrebbe nascere, qualora i prezzi del petrolio si mantenessero elevati come al momento attuale, dalla redditività dei biocombustibili, la cui produzione (assai dispendiosa ed inefficiente in termini materia organica da processare per caloria di combustibile ottenuta) potrebbe togliere spazio fisico alla coltivazione con scopi alimentari.

Il recente aumento dei prezzi degli alimenti a livello globale – il frumento è passato da 375 a 900 \$ la tonnellata dall'inizio del 2006 a marzo 2008, mentre il mais è passato da 250 a 560 \$ la tonnellata sullo stesso periodo - che sta già creando seri problemi in molti paesi poveri può essere considerato una conseguenza di questi due fattori destabilizzanti l'equilibrio tra domanda ed offerta.

## UNO SGUARDO SUL SISTEMA DI PRODUZIONE AGRICOLA

Allo stato attuale la produzione agricola per il sostentamento di uomini ed animali è basata fondamentalmente sulla coltivazione di un ristretto numero di piante, principalmente cereali (frumento, riso, granturco, miglio, sorgo, orzo), legumi (soia), piante oleose (girasole, colza, arachidi) e alcune altre importanti colture come canna e barbabietola da zucchero, patate e pomodori. Tali piante sono particolarmente apprezzate da produttori e consumatori poiché offrono prodotti relativamente facili da trasportare ed immagazzinare, sono relativamente non deperibili e hanno un contenuto abbastanza alto di calorie e proprietà nutrizionali.

Ciò che le caratterizza, in particolar modo i cereali e le piante oleose, che costituiscono la parte più consistente dell'alimentazione umana, è la loro caratteristica di essere piante a ciclo di vita annuale. Esse infatti vengono piantate ogni anno e muoiono appena i semi sono maturi ed in grado di garantire la continuazione della specie.

Tali piante non sono altro che l'evoluzione delle prime specie selezionate dall'uomo del neolitico quando 10000 anni fa si dedicò per la prima volta all'agricoltura. La loro annualità ha sempre rappresentato un vantaggio per diversi motivi: in primo luogo le piante annuali sono caratterizzate dall'avere un seme di maggiori dimensioni rispetto alle loro simili con ciclo di vita di diversi anni in quanto, morendo ogni anno la pianta madre, anche un seme poco volatile trova comunque il suo spazio vitale. In secondo luogo sono facilmente gestibili poiché è possibile assicurarsi un raccolto più o meno costante anno dopo anno ripiantando parte dei semi.

Inoltre l'annualità e il conseguente rapido susseguirsi delle generazioni permette di selezionare facilmente i caratteri più desiderabili del raccolto trattenendo per la coltivazione dell'anno successivo i semi delle piante considerate migliori, ad esempio più sane, più alte, più produttive. Un altro importante vantaggio delle piante annuali è il fatto che portano a maturazione i semi una sola volta nel corso dell'anno ed in maniera, se selezionate, pressochè sincrona, facilitando enormemente la raccolta e permettendo scale di sfruttamento assai efficienti. La facilità di selezione dei caratteri migliori ha portato nel tempo ad ottenere varietà di tali piante estremamente focalizzate sulla produzione di semi utili ed enormemente produttive, ovvero molto efficienti nell'assorbimento e nell'assimilazione rapida di carbonio.

Unita ai numerosi vantaggi però vi è una caratteristica tipica delle piante annuali e insita nella loro annualità che può essere considerata "negativa", ovvero lo scarso sviluppo che può raggiungere il loro apparato radicale. Infatti in pochi mesi di crescita, quantunque assai rapida sia di corpo vegetativo che di frutti, tali piante non possono creare un apparato radicale che superi i 30 – 40 centimetri di lunghezza, e di conseguenza sono incapaci di assorbire acqua e nutrienti in profondità ed in modo autonomo necessitando quindi di essere rifornite di tali elementi artificialmente. Ciò richiede che nella loro coltivazione vengano impiegate moltissime risorse.

Inoltre essendo state domestiche e modificate pesantemente dall'uomo nel corso dei millenni e coltivate in ambienti "artificiali" e tutelati, esse hanno perso gran parte delle loro capacità idonee alla sopravvivenza in natura a favore della maggiore produttività, che quindi è possibile grazie ad una serie di operazioni talvolta di grande impatto ambientale, come la creazione di sistemi di irrigazione o l'utilizzo di pesticidi.

Un sistema di agricoltura basato su piante annuali che quindi può dirsi tradizionale in quanto, benché enormemente mutato a livello tecnologico, è concettualmente affine a quello neolitico, comporta la preparazione del terreno mediante aratura, la sua concimazione, la semina di un'unica specie per

Coltura	% di terreno
Frumento	17.8
Riso	12.5
Mais	12.2
Soia	7.6
Orzo	4.7
Sorgo	3.5
Cotone	2.9
Fagioli	2.9
Miglio	2.8
Colza / Senape	2.2

Tabella 1. Principali colture e percentuale di terreno da esse occupato sul totale dei terreni coltivati.

appezzamento, l'irrigazione del campo, la tutela del seminato attraverso l'eliminazione di piante ed insetti nocivi, la sua protezione da virus e malattie, la raccolta ed un periodo più o meno lungo di riposo a terreno incolto. Le risorse utilizzate in un tale sistema, spesso in modo assai intensivo, sono in primo luogo il terreno, poi energia, acqua, fertilizzanti, insetticidi e pesticidi.

### **CRESCITA DELLA PRODUZIONE**

La produzione globale di cereali è raddoppiata dal 1945 al 1980 e ad oggi si produce più cibo per persona che in ogni altro periodo della storia dell'uomo. Si è passati da una disponibilità di 2280 calorie giornaliere pro capite del 1960 alle 2800 attuali.

Tuttavia vi sono numerosi segnali allarmanti per quanto riguarda la sostenibilità e l'efficacia dell'attuale sistema agricolo. Infatti anche senza tenere conto dell'impatto ambientale dell'attività agricola, negli ultimi anni si è assistito ad una diminuzione del tasso di crescita della produzione agricola totale e del tasso di crescita della produttività delle colture.

Fondamentalmente vi sono tre modi per aumentare la produzione agricola: aumentare la superficie coltivata, aumentare l'intensità con cui tale superficie viene coltivata e accrescere i tassi di produttività delle specie coltivate, tre leve che sono spesso difficilmente utilizzabili sul breve periodo poiché dipendenti da numerosi fattori complessi.

Per quanto riguarda la disponibilità di terreno, a livello teorico, di tecnicamente coltivabile ve ne sarebbero ulteriori 2.8 miliardi di ettari, pari a circa il doppio della superficie attualmente coltivata. Tuttavia si prevede che nei prossimi 30 anni vengano messi a coltura "soltanto" 120 milioni di ettari di nuove terre pari ad un incremento del 12.5% del totale ad un tasso di crescita pari alla metà di quello osservato dagli anni '60 ad oggi. Ciò perché la maggior parte dei terreni potenzialmente coltivabili sarebbe molto delicata e relativamente poco fertile e poi perché gran parte di tali terreni è coperta di foreste e finalmente si comincia a prendere coscienza dell'importanza di tali aree per l'ecosistema globale.

Per quanto riguarda invece l'intensificazione delle colture essa si basa essenzialmente su un maggiore o migliore utilizzo di acqua e sull'introduzione di fertilizzanti ed insetticidi sintetici. Delle tre leve questa è sicuramente la più facilmente utilizzabile, soprattutto in paesi in via di sviluppo in cui mancano tuttora investimenti basilari in campo agricolo come possono essere i sistemi di canalizzazione delle acque. Attualmente soltanto un quinto delle terre coltivate fa uso di irrigazione artificiale producendo due quinti del totale e tre quinti dei cereali mondiali. Tuttavia anche l'irrigazione di nuovi terreni presenta notevoli difficoltà, a livello di investimenti necessari e poiché l'acqua si appresta a diventare un bene sempre più raro e prezioso, il cui utilizzo deve essere il più possibile tenuto sotto controllo. Inoltre l'irrigazione dei suoli agricoli è la causa principale del loro impoverimento in quanto è responsabile di dilavamento e perdita di nutrienti. Per quanto riguarda l'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi chimici si hanno numerosi effetti collaterali: notevole impegno economico, inquinamento dei suoli e delle acque, diminuzione della biodiversità delle aree coltivate, aumento della quantità di energia utilizzata per unità di prodotto.

La terza leva, l'accrescimento dei tassi di produttività delle specie coltivate, è stata storicamente quella responsabile dei maggiori aumenti di produttività totale, contribuendovi al 70% negli ultimi 40 anni. Tuttavia a partire dagli anni '90 si è assistito ad un calo nella crescita di tali tassi, ad esempio il grano è passato da un tasso di crescita della produttività annua del 3.8% tra il 1961 e il 1989 al 2% tra 1989 e 1999, e il riso dal 2.3% all'1.1% nei medesimi periodi. Ciò potrebbe rappresentare un problema per il futuro considerando anche il fatto che il calo nella crescita della produttività si è avuto nonostante l'introduzione delle colture transgeniche che quindi sotto molti aspetti hanno tradito le aspettative precedenti la loro introduzione.

### **PROBLEMATICHE PRINCIPALI RELATIVE ALL'AGRICOLTURA TRADIZIONALE**

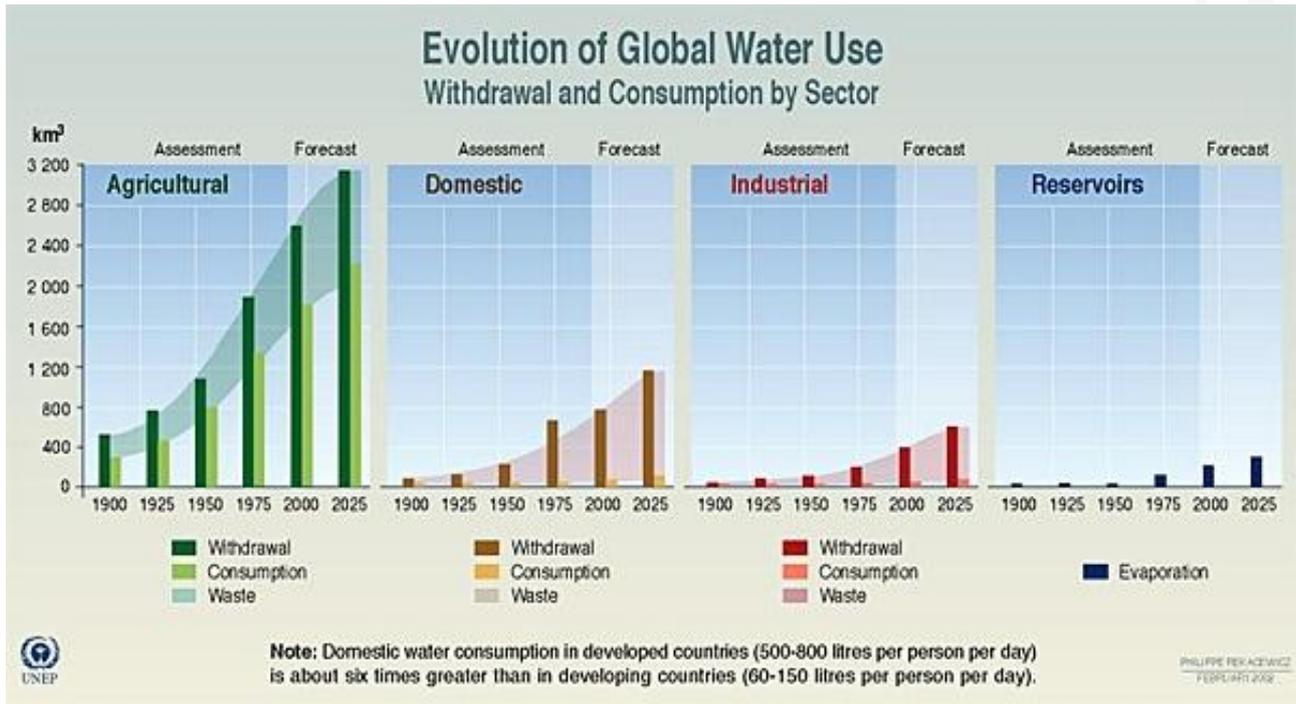
**Suolo.** I principali pericoli a cui vanno incontro i suoli fertili mondiali sono essenzialmente erosione e salinizzazione. Negli ultimi 40 anni circa un terzo del suolo arabile a livello globale è andato perso come conseguenza dell'erosione operata principalmente da acqua e vento, e circa 10 milioni di ettari di suolo fertile vengono perduti ogni anno. Negli Stati Uniti, ad esempio, circa il 90% della superficie coltivata perde suolo in quantità superiore al tasso di rimpiazzo, e l'erosione dei terreni arabili avanza ad un ritmo in media 17 volte più rapido della velocità di formazione dei terreni stessi. Continuando a questo ritmo nei prossimi 20 anni il rendimento dei terreni statunitensi senza fertilizzanti ed irrigazione calerà del 20%. Calcolando tutti i costi che l'erosione dei suoli agricoli comporta in termini di danno diretto al terreno e danni indiretti a canali, infrastrutture e salute, si stima un danno a livello globale pari a 400 miliardi di dollari. Sono cifre indubbiamente enormi che danno l'idea della vastità del fenomeno e dell'importanza che dovrebbe rivestire la sua tutela.

La diffusione di colture annuali contribuisce spesso pesantemente all'erosione dei suoli, essa infatti ha come caratteristica il fatto di lasciare incolti e totalmente privi di vegetazione i campi per una parte dell'anno, cosa che li rende assai vulnerabili all'azione erosiva degli agenti atmosferici.

Oltre all'erosione un problema rilevante dei suoli è dato dalla loro salinizzazione, ovvero dall'aumento delle concentrazioni di sale che naturalmente sono presenti nel terreno in determinate aree di ristagno delle acque agricole. Tale problema si riscontra tendenzialmente in aree in cui vengono utilizzati assai intensamente irrigazione e fertilizzanti chimici.

**Acqua.** L'acqua è una risorsa fondamentale per l'agricoltura, dalla quale dipende pesantemente la quantità e la qualità dei raccolti. Negli ultimi secoli con l'aumentare della popolazione e dell'attività umana sul pianeta, è aumentato di enormemente l'utilizzo di acqua dolce. Si calcola che sul pianeta vi siano circa 35 milioni di Km<sup>3</sup> di acqua dolce (2.5% del totale), dei quali dai 9000 ai 14000 Km<sup>3</sup> sono, a livello teorico, economicamente sfruttabili dall'uomo ogni anno. Attualmente l'utilizzo di acqua dolce è calcolato essere attorno ai 3600 Km<sup>3</sup> annui distribuiti in maniera non uniforme tra le varie aree del pianeta, dei quali circa il 69% è utilizzato in agricoltura, il 10% è costituito da consumi domestici ed il 21% è utilizzato dall'industria. Si ha quindi che il settore agricolo è di gran lunga il maggiore consumatore di acqua a livello globale. Ad esempio, in un sistema agricolo moderno sono necessari tra 1000 e 3000 m<sup>3</sup> di acqua per produrre una tonnellata di cereali, una quantità ingente che potrebbe rendere la produzione facilmente soggetta a variazioni del prezzo dell'acqua, variazioni plausibili in scenari futuri nei quali tale bene verrà ad assumere un valore strategico sempre maggiore.

Benchè l'irrigazione artificiale dei campi abbia avuto un ruolo fondamentale nell'aumentare enormemente la quantità di cibo prodotta negli ultimi decenni, attualmente la produzione derivante da campi irrigati artificialmente è pari al 40% del totale a fronte di una superficie occupata di circa 280 milioni di ettari (18% del totale), mentre i restanti 1250 milioni di ettari coltivati esclusivamente a pioggia producono circa il 60% del totale. È possibile da questi dati notare come un utilizzo più intensivo di acqua basato sulle esigenze biologiche delle piante possa incrementare la produttività delle colture. D'altro canto però una irrigazione intensiva può portare ad un impoverimento e ad una perdita della parte superficiale fertile del loro suolo, dilavato delle sue sostanze nutritive. Quindi spesso ad una intensa irrigazione deve accompagnarsi un'altrettanto intensa opera di ripristino dei nutrienti nel terreno, mediante l'uso di fertilizzanti organici o inorganici. Caratteristica peculiare delle colture annuali è quindi quella di dipendere pesantemente dalla quantità d'acqua loro somministrata, e di richiedere opere di gestione e canalizzazione delle acque, complesse, costose e a causa della loro complessità spesso poco efficienti. Infatti perdite e sprechi costituiscono una percentuale non irrilevante dell'acqua somministrata alle coltivazioni, tanto che le Nazioni Unite considerano un obiettivo importante per il futuro a livello globale il miglioramento dell'efficienza dell'irrigazione, attualmente inferiore al 40%. La forte dipendenza dall'acqua delle colture annuali le rende ulteriormente vulnerabili in caso di cambiamenti climatici che vadano ad influenzare il ciclo delle acque dolci. Inoltre accade che molti paesi stiano utilizzando più acqua dolce di quella che possiedono come risorsa rinnovabile grazie allo sfruttamento delle loro risorse idriche sotterranee ad un ritmo superiore a quello del loro naturale rinnovamento creando così un deficit di acqua e destabilizzando il proprio sistema delle acque e conseguentemente tutto l'ecosistema. Attualmente si calcola che il deficit di acqua ammonti a circa 160 Km<sup>3</sup>, una quantità che permette di produrre circa 180 milioni di tonnellate di grano, ovvero il 10% dei raccolti annuali terrestri nasce da campi irrigati con acqua non rinnovabile.



Source: Igor A. Shiklomanov, State Hydrological Institute (SHI, St. Petersburg) and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO, Paris), 1999.  
 Figura 1. Evoluzione a livello globale dell'utilizzo di acqua per settore (agricolo, industriale, domestico).

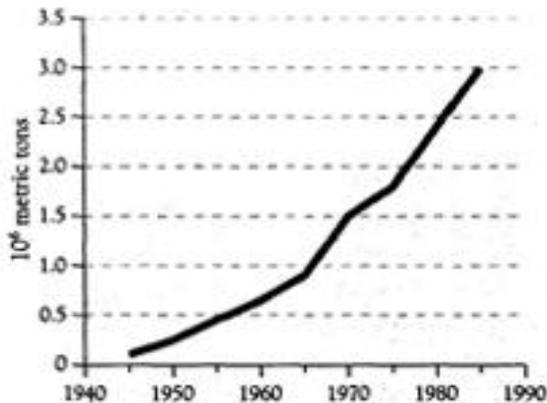
**Fertilizzanti.** Negli ultimi ottant'anni, con l'introduzione di meccanizzazione e fertilizzanti chimici, l'agricoltura è stata definitivamente trasformata in un'agricoltura industriale.

L'uso di fertilizzanti sintetici è cresciuto otto volte negli ultimi 40 anni fino a superare le 120 milioni di tonnellate annue. La maggior parte di tali prodotti è costituita da composti di azoto e fosforo, tanto che oggi la maggiore fonte di inquinamento delle acque di fiumi e laghi è costituito da residui azotati o fosforosi. Circa la metà dei fertilizzanti applicati ai campi non viene utilizzato dalle colture, rimane nel terreno ed viene portato via dalle acque superficiali per accumularsi infine in fiumi e laghi e diffondersi quindi in ecosistemi diversi da quelli di partenza, modificandoli talvolta pesantemente. L'esempio forse più rappresentativo è dato dalla eutrofizzazione di laghi e fiumi: alghe e piante acquatiche crescono incontrollatamente a causa dall'eccesso di nutrienti dovuto all'alta concentrazione di fertilizzanti e quando muoiono vengono decomposte da batteri che tolgono praticamente tutto l'ossigeno disciolto nell'acqua impedendo ad altre forme di vita di sopravvivere e di fatto desertificando lo specchio d'acqua. Un esempio di eutrofizzazione si ha alla foce del Mississippi nel Golfo del Messico: il fiume dopo aver raccolto le scorie agricole di tutti gli Stati Uniti centrali le deposita nel golfo creando una "zona morta" vasta come il New Jersey. E questa è solo una delle 40 aree simili che si possono contare sul pianeta.

Per quanto riguarda i fertilizzanti, anche quelli di origine animale possono costituire una seria fonte di inquinamento da nitrati se, come spesso avviene nei paesi industrializzati (dove il 70% della produzione agricola viene utilizzata come mangime per l'allevamento) tali scorie vengono concentrati eccessivamente in zone troppo ristrette.

Figure 1

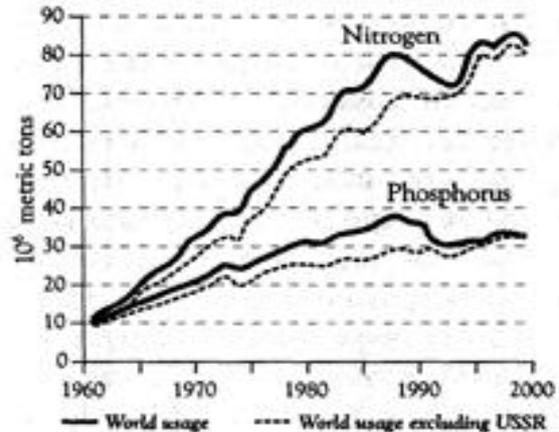
### Global Pesticide Production 1945–1985



Source: Modified from Tilman, David, et al. 2001. "Forecasting Agriculturally Driven Global Environmental Change." *Science* 292–284.

Figure 2

### Global Fertilizer Use 1960–2000



Source: Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://apps.fao.org> (Accessed July 17, 2002).

Note that the apparent leveling of world fertilizer use since 1990 is a result of the collapse of the Soviet Union and subsequent decreases in Soviet fertilizer use. Fertilizer use for the rest of the world has continued to increase at unsustainable rates.

Figura 2. Crescita della produzione di pesticidi tra il 1945 e il 1985, e variazione nell'utilizzo di fertilizzanti sintetici (a base di azoto e fosforo) tra il 1960 e il 2000 a livello globale.

**Pesticidi.** La U.S. Environment Protection Agency ha stimato che negli Stati Uniti ogni anno vengono utilizzate 2 milioni di tonnellate di pesticidi, e che 10 milioni di tonnellate siano utilizzate nel mondo. L'uso di pesticidi è fondamentale per consentire uno sviluppo ed una difesa adeguata a colture estremamente sensibili e suscettibili alle malattie come le colture annuali comunemente diffuse. Tale utilizzo però oltre ad essere indubbiamente inquinante, spesso presenta degli aspetti controversi. Ad esempio un utilizzo intensivo di pesticidi in una coltura ne aumenta la dipendenza dagli stessi; infatti tendenzialmente pesticidi e fungicidi non distruggono soltanto il loro target ma anche tutti i suoi nemici naturali, rendendo quindi in un secondo momento il loro utilizzo indispensabile. Inoltre le specie dannose spesso sviluppano resistenza a tali prodotti abbastanza in fretta, e certamente più rapidamente dei loro nemici naturali, quindi sono in grado di riprendersi sempre rapidamente. Inoltre può accadere che, scomparse le specie più dannose e i loro nemici in seguito all'utilizzo di pesticidi, si rivelino dannose altre specie che sarebbero state neutralizzate da specie rivali scomparse. Si viene quindi a creare una lotta in cui è facile essere sconfitti oppure sconvolgere totalmente la naturalità dell'ecosistema. Inoltre dal momento che occorre anche perseguire economie di scala nella somministrazione di pesticidi e quindi utilizzare strumenti che spruzzano in maniera diffusa i prodotti, soltanto l'1% della quantità utilizzata va realmente ad agire sul suo obiettivo.

Tuttavia bisogna dire che negli anni la maggiore conoscenza degli agenti patogeni delle colture ed una maggiore attenzione all'ambiente, nonché un continuo sviluppo tecnologico hanno permesso di produrre pesticidi sempre meno generici e più focalizzati sulla specie target da combattere, diminuendo quindi il loro impatto sulla biodiversità dei campi.

Comunque non bisogna sottovalutare che tali prodotti così come si rivelano dannosi per le forme di vita presenti nei campi possono risultare nocivi anche per l'uomo, e quindi una riduzione nel loro utilizzo non può che essere considerata un passo in avanti nei metodi di produzione.

**Biodiversità.** L'agricoltura così come viene condotta oggi può essere considerata una delle attività umane che maggiormente creano problemi per la biodiversità del pianeta.

Ciò accade per diverse ragioni, prima delle quali per l'estensione dei terreni sui quali viene svolta tale attività, che quindi vengono almeno in parte antropizzati e privati delle loro specie naturali. Infatti una monocoltura intensiva si sostituisce ad un ecosistema precedente che può essere foresta, prateria, o altro,

comunque più ricco di biodiversità vegetale e di conseguenza animale e batterica. Poi la sempre più diffusa meccanizzazione richiede una notevole uniformità di prodotto per poter ottenere economie di scala rilevanti e ciò si coniuga in una costante riduzione ed uniformazione delle colture a livello globale. Ormai delle varietà tradizionali di cereali, ad esempio, non ne sopravvive che una ridottissima parte a vantaggio di quelle poche varietà che si sono distinte per produttività o resistenza. Se questo da una parte ha significato e significa una utile crescita della produzione, dall'altro lato comporta una perdita di biodiversità e un indebolimento genetico delle specie che quindi risultano più fragili e soggette a malattie. Ciò a sua volta implica un utilizzo intensivo di pesticidi o il ricorso a programmi di arricchimento genetico.

Ad oggi tre sole colture, frumento, riso e mais provvedono per il 60% della dieta di origine non animale umana, e secondo la FAO il 75% della diversità genetica delle colture è andata perduta nel corso dello scorso secolo. Ad esempio moderne varietà hanno sostituito quelle tradizionali per il 70% del mais mondiale, per il 75% del riso asiatico e per il 50% del frumento africano, sudamericano e asiatico. In India nel 1950 si contavano circa 30000 varietà di riso ma nel 2015 ci si attende che soltanto 50 rimangano utilizzate.

La perdita di diversità genetica delle colture è importante anche per quanto riguarda la creazione di nuove varietà e delle sementi. Infatti gran parte della crescita dei rendimenti delle moderne colture è dipesa dall'originale diversità tra le varietà tradizionali. Tale diversità ha consentito di avere i geni necessari per aumentare la resistenza a malattie, terreni aridi, temperature fredde ecc. Quindi perdere tale diversità mina la nostra possibilità di adattare le colture alle condizioni future, includendo i cambiamenti climatici.

**Meccanizzazione ed energia.** L'agricoltura convenzionale è altamente inefficiente in termini di materiali ed energia utilizzata. Tale tendenza si è acuita con l'introduzione della meccanizzazione e dell'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi sintetici. Negli Stati Uniti il settore agricolo richiede richiede 10 calorie derivate da combustibili fossili per produrre una singola caloria di cibo. E sebbene quella statunitense sia certamente una delle agricolture più dispendiose in termini energetici nel mondo si sta assistendo ad una crescita a livello globale dell'utilizzo di combustibili fossili in agricoltura, rendendo sempre più dipendente il settore dal prezzo del petrolio.

### **AGRICOLTURA TRANSGENICA**

Un'ipotesi di innovazione agricola sulla quale si è investito molto a partire dagli anni '90 e sulla quale si sta investendo tuttora nel mondo è quella dello sviluppo di colture transgeniche. Per coltura transgenica si intende lo sviluppo di varietà create artificialmente in laboratorio inserendo frammenti di DNA di specie diverse, che codificano per determinati geni portatori di caratteristiche utili, nella sequenza di DNA tipica della coltura. Ciò permette di ottenere una nuova varietà che, diversamente da quella di partenza, possiede geni di specie totalmente diverse, che non potrebbe ottenere con i tradizionali metodi di ibridazione di varietà affini. Tale sistema permette quindi di sviluppare varietà che possono, almeno teoricamente, avere caratteristiche eccezionali in termini di produttività, resistenza alle malattie oppure ai climi più estremi. Nella pratica però si è visto che la creazione di tali varietà incontra spesso ostacoli insormontabili e necessita di investimenti in sviluppo che superano di gran lunga quelli necessari per i metodi di ibridazione tradizionali. Inoltre si può dire che, benché in tali processi vengano adottate le tecnologie più all'avanguardia e le ultime conoscenze disponibili in campo biotecnologico, un siffatto metodo di creazione di nuove varietà comporta un concetto di agricoltura che non si discosta da quello tradizionale. Infatti si è visto con la grande diffusione di varietà transgeniche che si è avuta negli ultimi anni che comunque tali varietà necessitano per ottenere buoni rendimenti di una quantità di risorse paragonabile a quelle tradizionali, se non superiore per costi in virtù della maggiore specificità richiesta.

Quindi si può affermare che lo sviluppo anche intensivo di colture transgeniche non è in grado di rivoluzionare la produzione agricola avvicinandola a modelli di maggiore sostenibilità poiché non è in grado di ridurre o addirittura abolire la dipendenza da combustibili fossili, fertilizzanti, acqua, pesticidi, e, non mutando la natura di annualità delle piante coltivate, non può agire in tutela dell'erosione dei suoli. Tutto ciò a fronte di costi per la creazione di sementi transgeniche che arrivano ad essere 20 volte superiori a quelli che si hanno con i tradizionali percorsi di ibridazione e selezione e tempi di creazione che arrivano a 9 anni.

Da quanto visto precedentemente si potrebbe affermare che il modello di agricoltura tradizionale si stia sempre più avvicinando a quello che potrebbe essere considerato il suo limite fisico ovvero ad un livello in cui non è più possibile incrementare la produzione neanche sfruttando al massimo i terreni ed in cui l'equilibrio tra naturalità di colture ed ecosistema ed esigenze umane viene ad essere sempre più difficile da raggiungere. A questo punto potrebbe essere opportuno pensare ad un modello di agricoltura che sia radicalmente nuovo, che tenti di dare soluzioni accettabili partendo da presupposti diversi e con metodi che

tutelino maggiormente la sostenibilità del sistema. Una risposta a tali esigenze potrebbe nascere dallo sviluppo di colture poliennali a scopo agroalimentare.

### **COLTURE POLIENNALI, UNA PROSPETTIVA DI SVILUPPO**

Una possibile soluzione realmente innovativa in campo agricolo che potrebbe risolvere contemporaneamente i problemi legati alla produzione agricola e al suo impatto ambientale è lo sviluppo a fini produttivi di quelle piante che, benché rappresentino la stragrande maggioranza in natura, per la loro complessità non erano state considerate dai primi agricoltori neolitici: le piante poliennali o perenni. Piante che hanno un ciclo vitale che si estende per diversi anni.

Piante perenni che crescono in competizione tra loro su uno stesso terreno costituiscono la maggior parte della biomassa terrestre, tuttavia monoculture di piante annuali occupano più di due terzi dei suoli agricoli mondiali e, tra cereali e piante oleose, nessuna di esse è perenne. Ad esclusione delle piante da frutto le più importanti colture perenni sono la canna da zucchero e l'erba medica, ma nessuna produce una quantità di semi paragonabile a quella delle colture cerealicole annuali.

Le piante perenni sono altamente efficienti nei loro processi vitali e riescono a controllare in maniera responsabile a livello micro suolo, nutrienti ed acqua. Al contrario delle piante annuali che richiedono una preparazione del terreno per la semina, precise tempistiche di gestione, tempo favorevole in ristretti periodi fondamentalmente per la crescita, ed hanno un breve periodo vegetativo e ridotti sistemi radicali che provvedono scarsamente alla protezione dall'erosione del suolo, sfruttano con minore efficienza acqua e nutrienti, trattengono meno carbonio all'interno del terreno, e sono meno resistenti a malattie e difficoltà ambientali, le piante poliennali posseggono profondi complessi radicali, un corpo vegetativo robusto, una maggiore resistenza ad agenti patogeni e a variazioni climatiche.

### **CARATTERISTICHE DELLE PIANTE PERENNI**

**Radici.** Una caratteristica fondamentale delle piante perenni è quella di poter sviluppare, avendo un ciclo di vita che in alcuni casi può raggiungere il secolo e che comunque si sviluppa su diversi anni, un apparato radicale di notevole estensione e profondità. Ciò consente alla pianta di avere una serie di vantaggi importanti in termini di lunghezza della stagione vegetativa, efficienza nell'assorbimento di acqua e nutrienti, resistenza alle avversità climatiche. Ed inoltre non lasciando mai il terreno totalmente privo di vegetazione (come avviene nei periodi di riposo dei campi di colture annuali) e trattenendo molto più terreno all'interno dell'apparato radicale stesso consente un'assai migliore tutela dall'erosione del suolo. Uno studio condotto in alcuni campi del Missouri su un periodo superiore a cento anni ha rivelato che un campo occupato da piante poliennali, nel caso dall'erba delle praterie centrali statunitensi, è in grado di trattenere il terreno di superficie 50 volte più efficacemente di una coltura cerealicola tradizionale.

L'apparato radicale maggiore renderebbe assai più efficiente l'uso di fertilizzanti, infatti attualmente i dati dicono che soltanto una percentuale compresa tra il 18% e il 49% dei nitrati applicati a coltivazioni di mais, riso o frumento vengono utilizzati dalle piante, mentre tutto il resto finisce per andare perso, e quindi crea inquinamento. Le piante annuali sono da 30 a 50 volte meno efficienti nell'assorbire i fertilizzanti somministrati.

Un'altra caratteristica che dipende dall'apparato radicale esteso è la capacità di fissare carbonio nel terreno. Le piante poliennali ne fissano una quantità che varia dai 320 ai 440 kg per ettaro all'anno, mentre le piante annuali ne fissano da 0 a 300 kg. Una differenza notevole che permette, unita alla possibilità di utilizzare una quantità minore di fertilizzanti chimici, alle piante poliennali di avere valori negativi per quanto riguarda la contribuzione al riscaldamento globale. Infatti si è stimato che piante poliennali riescano ad assorbire 200 – 1050 kg di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) per ettaro all'anno, contro una produzione di 410 – 1140 kg di CO<sub>2</sub> per ettaro all'anno delle colture annuali.



Figura 3. Sistema radicale di una pianta di grano annuale (sulla sinistra di ogni riquadro) e dell'erba della pampa (*Thinopyrum intermedium*), una pianta perenne, in quattro differenti periodi dell'anno. Benché circa il 25 – 40% del sistema radicale dell'erba della pampa muoia e debba ricrescere ogni anno, la sua stagione di crescita più lunga e di conseguenza un migliore accesso alle risorse, le permettono una maggiore produttività vegetativa sia sopra che sottoterra rispetto alla controparte annuale.

**Resistenza.** Il fatto di poter vivere più stagioni permette alle piante perenni di sviluppare una maggiore resistenza sia alle malattie che ai cambiamenti climatici.

Infatti un apparato radicale esteso e la capacità di superare periodi invernali permette a tali piante di resistere molto bene a cambiamenti stagionali improvvisi di temperatura e le dota di un corpo vegetativo in grado di tollerare episodi estremi come possono essere precipitazioni particolarmente violente senza subire eccessivi danni nella produzione di semi. Per quanto riguarda la resistenza alle malattie essa è facilitata dalla possibilità che hanno tali piante di condividere con altre specie lo stesso appezzamento di terreno e quindi di mantenere una più accentuata biodiversità ed un maggiore equilibrio tra le specie. Inoltre una minore concentrazione di piante della stessa specie su una determinata superficie offre meno possibilità di espansione a malattie ed agenti patogeni riducendone la virulenza.

**Biodiversità.** Le colture poliennali permettono di mantenere una maggiore naturalità dell'ecosistema e quindi una maggiore biodiversità con tutti i vantaggi che ne derivano dal punto di vista di sostenibilità del sistema. Una maggiore biodiversità facilita un più efficace controllo degli insetti nocivi in quanto è più facile che vi siano nemici reciproci naturali in grado di controllarsi a vicenda, e quindi è possibile utilizzare minori quantità di insetticidi e pesticidi. Con una diffusione estensiva di tali colture si potrebbe arrivare ad avere vaste aree antropizzate, ma non rese totalmente artificiali come avviene tuttora con le colture tradizionali. Si eviterebbe così l'isolamento che caratterizza ad oggi le aree ecologicamente tutelate come i parchi, circondati da terreni totalmente inospitali per la maggior parte delle specie selvatiche; si potrebbero quindi ottenere autentici corridoi tra zone tutelate in cui aumenterebbe il numero di specie differenti garantendo una maggiore sostenibilità ecologica a tutto il sistema sul lungo periodo.

**Adattamento.** In virtù delle loro caratteristiche strutturali e della loro maggiore resistenza le piante poliennali possiedono una maggiore capacità di adattamento a diverse situazioni climatiche, di quota, di temperature, di qualità dei terreni. Queste loro capacità potrebbero essere proficuamente impiegate per coltivare aree che

oggi non possono esserlo per l'inadattabilità delle colture in uso ai loro suoli e al loro clima. Si potrebbero quindi estendere le colture in zone marginali e quindi rendere produttive aree che oggi devono importare risorse alimentari o nelle quali non si riesce a praticare più che una agricoltura di sussistenza.

**Competizione.** La capacità di tali piante di condividere uno stesso terreno con differenti specie purchè abbiano una profondità radicale diversa consente di ottenere diversi raccolti durante il corso dell'anno e quindi di avere una elevata produttività pur senza avere una concentrazione elevatissima di una stessa coltura. La possibilità di far convivere specie diverse può inoltre consentire il raggruppamento di specie con caratteristiche complementari, aumentando quindi la produttività e limitando ulteriormente l'impatto ambientale. È poi possibile anche attuare tecniche miste di allevamento e agricoltura utilizzando come pascoli i campi nel periodo successivo la raccolta e precedente una nuova crescita.

**Ricrescita.** Un'altra caratteristica vantaggiosa per lo sfruttamento di piante poliennali è la rapidità della loro ricrescita, infatti continuando a vivere, anche se in inverno con un metabolismo ridotto, sono in grado di riprendersi prontamente appena le temperature salgono leggermente. Ed un importante apparato radicale permette una crescita più rapida. Al contrario le piante annuali dovendo incominciare la loro crescita da zero impiegano più tempo e sono sempre indietro di qualche giorno nel raggiungere il pieno sviluppo. Ad esempio in coltivazioni sperimentali di sorgo perenne e sorgo tradizionale si è visto che in quello perenne i nuovi germogli nascono dai rizomi circa un mese prima di quelli del parente annuale e non soltanto nascono prima ma crescono più rapidamente.

### **CREARE PIANTE POLIENNALI**

Considerati tutti i vantaggi che potrebbero derivare dall'adozione di colture poliennali come colture dominanti per la produzione agricola, occorre ora analizzare le difficoltà, molte, che bisognerà superare per raggiungere tale obiettivo.

Innanzitutto allo stato attuale non esistono piante perenni con una produttività tale da essere economicamente utilizzate al posto delle tradizionali colture annuali. Infatti in natura la caratteristica della poliennalità che comprende una maggiore resistenza ad ambiente e malattie, un maggiore sviluppo radicale e vegetativo, comporta un dispendio energetico maggiore ed una focalizzazione sulla produzione di semi inferiore alle odierne specie annuali, ormai presenti in varietà estremamente selezionate per produrre una enorme quantità di semi sfruttabili.

Poi occorre tenere conto delle tempistiche di sviluppo di piante poliennali che riescano ad avere dei rendimenti commerciabili, non meno di 50 anni se rimangono costanti gli sforzi in ricerca su tali piante che sono intrapresi attualmente.

Le specie annuali hanno subito un processo di selezione che ha implicato lo sforzo umano su un periodo superiore a 10000 anni, con un enorme incremento di risorse dedicate negli ultimi 50 anni a favore di un accrescimento di produttività e resistenza.

La selezione di piante poliennali invece, partendo da zero, ha ricevuto finanziamenti rilevanti (benchè assai inferiori a quelli investiti nello sviluppo di varietà annuali) soltanto negli ultimi 20 anni. Si trova quindi ad affrontare molti problemi di natura cognitiva ed esperienziale, e benchè si stiano compiendo notevoli passi in avanti, il tempo necessario a sviluppare nuove specie e varietà non può essere contratto oltre determinati limiti biologici di crescita sia fisica delle piante che tecnologica.

Attualmente la creazione e la selezione delle nuove specie di piante poliennali avviene fondamentalmente attraverso due metodologie, per domesticazione di specie selvatiche e per ibridazione di specie perenni selvatiche con loro parenti annuali già domesticate.

Entrambi i processi comportano la modifica di parte del patrimonio genetico delle specie e quindi sono caratterizzati da una bassa percentuale di successi e da una grande aleatorietà nei risultati. Si deve quindi procedere su vasti campioni che permettano di isolare i caratteri utili fondamentali per uno sviluppo della specie nella direzione più utile ad un suo utilizzo a scopi produttivi.

**Domesticazione diretta.** Il metodo della domesticazione diretta prevede una prima fase di identificazione delle specie perenni che presentano in natura i più alti rendimenti nella produzione di semi (a confronto di altre specie selvatiche) o altri tratti che potrebbero aumentare la loro utilità come colture. A ciò segue la selezione all'interno di tali specie per aumentare la frequenza di geni che portano tratti utili ad un uso agricolo, come ad esempio la fioritura e la maturazione sincrona, semi che non cadano dalla pianta ma che possano essere raccolti meccanicamente e alti tassi di rendimento in termini di quantità di semi per unità di terreno. La domesticazione di una specie comporta numerose variazioni genetiche che possono modificare totalmente le caratteristiche morfologiche della stessa, modificazioni che per loro natura non sono mai

totalmente prevedibili tanto che spesso importanti cambiamenti si hanno in virtù di eventi casuali. Ciò ovviamente comporta un tasso assai elevato di aleatorietà e di incertezza sui possibili risultati, e maggiore è il numero di esperimenti maggiore è la probabilità di ottenere mutazioni favorevoli, ma maggiori sono anche i costi e i tempi di sviluppo.

Ancora oggi la selezione delle piante spesso si basa sull'analisi delle caratteristiche fenotipiche, tuttavia la moderna tecnologia e un'accurata conoscenza biotecnologica consentono di analizzare più in dettaglio specifiche caratteristiche genetiche e biologiche. La domesticazione diretta di una specie ha il grande vantaggio di lavorare su piante di cui si riesce a mantenere la compatibilità sessuale, per cui è possibile sfruttare l'intero spettro di caratteri genetici di una specie per incorporare singoli geni all'interno della varietà sviluppata.

Con gli avanzamenti in tecnologia disponibile e conoscenza genetica lo sviluppo di nuove varietà attraverso la domesticazione può procedere assai più velocemente che nel passato, tuttavia però ad oggi la differenza tra i tassi di rendimento delle specie poliennali in via di domesticazione e quelli di quelle annuali sono ancora enormi. Ad esempio la produttività dell'erba della pampa (*Thinopyrum intermedium*), una specie in fase di domesticazione parente perenne del frumento, è di 600 kg annui per ettaro a fronte di 2300 kg per ettaro che rappresentano una modesta ma tipica produzione di frumento annuale in Kansas. È ipotizzabile riuscire ad ottenere un incremento del 10% della produttività per ogni generazione selezionata (tasso di crescita straordinario ma plausibile se raffrontato a quelli ottenuti finora nei processi di selezione), ma anche con un tale tasso per raggiungere i 2300 kg per ha annui sarebbero necessarie 16 generazioni, ovvero 48 anni al ritmo più veloce possibile di tre anni per generazione, una quantità di tempo sicuramente notevole.

**Ibridazione.** Il secondo approccio alla creazione di sementi perenni, l'ibridazione di piante selvatiche perenni e piante annuali già domesticate, permette un accorciamento dei tempi di domesticazione diretta grazie all'introduzione nel DNA della specie da selezionare di alcuni tratti genetici già modificati nella direzione voluta di specie annuali ad alto rendimento. Delle 13 specie più diffuse di graminacee e piante a semi oleosi, 10 possono essere ibridate con loro parenti perenni. Le specie annuali possono fornire geni che facilitino la domesticazione o che migliorino la produttività. Così come negli antenati delle odierne colture annuali piante che presentavano mutazioni utili, ad esempio la riduzione dell'involucro duro che ricopre il seme, o semi che non si spargevano appena giunti a maturazione, erano assai rare, così accade anche per le specie perenni che si vogliono domesticare. Pertanto identificare ed aumentare in tali specie la frequenza di geni che codifichino mutazioni utili è un obiettivo primario che con metodi puri di domesticazione necessita grandi quantità di tempo e risorse. Gestire invece il passaggio di geni da piante già coltivate e perfettamente conosciute è certamente più rapido e mantiene, se fatto mediante ibridazione la complessità e la diversità genetica all'interno della specie. Tuttavia l'ibridazione presenta anch'essa notevoli problemi da superare. Infatti quando la maggior parte delle colture come riso, frumento, orzo, miglio, mais, sorgo, girasole, vengono incrociate con i loro parenti perenni differenze nel numero di cromosomi, mancanza di cromosomi omologhi o altri fattori possono causare una minore o nulla fertilità e restringere quindi la ricombinazione genetica nella prole. Chi modifica tali specie deve inoltre fare i conti con la distruzione di parte del genoma di partenza per migliorare l'utilizzabilità della specie, e deve riuscire a valutare e migliorare simultaneamente una serie di diverse caratteristiche per evitare di migliorare un aspetto danneggiandone altri. La storia insegna che in tali situazioni progressi sono ottenuti soltanto con molti tentativi e un grande dispendio di tempo ed energie.

Per ridurre il numero di tratti che devono essere migliorati simultaneamente è possibile utilizzare delle piante annuali che hanno "tendenze" poliennali. Ad esempio vi sono colture tropicali di sorgo e riso che in condizioni favorevoli sono in grado di produrre dopo un primo, consueto, un secondo raccolto nello stesso anno. Incroci di specie poliennali con tali parenti possono produrre una maggiore frequenza di piante poliennali capaci di incrociarsi con piante strettamente annuali. Nei taxa studiati finora si è notato che gli ibridi tendono ad essere perenni soltanto quando il 50% o più del loro genoma totale deriva da un parente perenne. Ciò sta a dimostrare la complessità di tratti come la perennialità che richiede un controllo da parte di più geni e l'interazione con l'ambiente per esplicarsi, e che quindi non è suscettibile di miglioramenti attraverso la manipolazione di singoli geni.

Di conseguenza vi è poco spazio nella creazione di specie poliennali ad alto rendimento per le tecnologie transgeniche, che modificando un solo gene per volta o ristretti numeri di geni non possono far fronte alla complessità che governa tratti caratteristici di tali piante. Diversamente sarebbero assai utili tecniche analitiche come la mappatura del genoma delle piante in questione che fornirebbe una mole di conoscenze tale da velocizzare tutto il processo. Tuttavia ad oggi l'unico cereale ad essere stato mappato geneticamente è il riso.

## BREVE STORIA DELLA RICERCA SULLE PIANTE POLIENNALI

Lo sviluppo di colture perenni ad alto rendimento è un'idea che è nata negli anni del secondo dopoguerra principalmente in Unione Sovietica dove si intrapresero i primi tentativi di sviluppo di un grano perenne che si adattasse ai rigidi climi siberiani rendendo coltivabili aree che con piante tradizionali non lo erano. Tuttavia dopo esperimenti durati una decina di anni, negli anni '60, furono sospesi i finanziamenti a tali progetti come conseguenza degli scarsi risultati prodotti. Infatti non si riuscirono mai a risolvere i continui problemi di sterilità, di mancata poliennalità e di scarse qualità agronomiche. Al di fuori dell'Unione Sovietica i tentativi di produrre varietà perenni altamente produttive furono scarsi e non coordinati e non portarono mai a risultati significativi. La ragione di tale disinteresse scientifico va ricercata nel fatto che comunque si stavano ottenendo tali successi nell'ambito delle colture annuali che non sembrava necessario, e probabilmente non lo era, disperdere investimenti su un progetto dai ritorni economici e sociali molto più incerti. Tuttavia recentemente, con l'agricoltura tradizionale che si è avvicinata ai suoi limiti di sostenibilità e con i tassi di crescita dei rendimenti delle colture annuali che hanno incominciato a declinare, le prospettive di ricerca nel campo delle specie poliennali si sono ampliate, tanto che oggi ricerche in tale ambito vengono portate avanti un po' in tutto il mondo. Particolarmente importante è stata ed è tuttora l'attività del Land Institute, un istituto di ricerca agronomica americano fondato negli anni '90 con sede a Salina in Kansas. Tale istituto si sta impegnando nella domesticazione di cereali perenni come l'erba della pampa (*Thinopyrum intermedium*), il girasole di Maximilian (*Helianthus maximiliani*), il Desmanthus illinoensis e una specie perenne di lino e, grazie ai progressi fatti in campo biotecnologico, promette di dare soluzioni importanti nel giro di qualche anno. In Canada a seguito di avanzate ricerche dell'Università del Manitoba sull'uso di acqua, luce e sostanze nutritive negli apparati radicali perenni, diverse istituzioni hanno intrapreso programmi di sviluppo di cereali perenni. In Australia la University of Western Australia ha già un programma per la creazione di frumento perenne nell'ambito del Cooperative Research Center for Future Farm Industries, ed in Cina gli scienziati del Food Crops Research Institute di Kunming stanno sviluppando ibridi perenni del riso.

Si può quindi affermare che la ricerca su piante poliennali per agricoltura sta rapidamente prendendo piede, tuttavia però gli investimenti compiuti e programmati sono ancora assai ridotti rispetto agli investimenti totali nello sviluppo agricolo, e mancano vasti piani coordinati di sviluppo.

## ESEMPI ATTUALI DI RICERCA

**Grano.** Il grano ovviamente, in quanto coltura maggiormente diffusa, è stata tra le prime delle quali è stata progettata una eventuale versione poliennale. Per la creazione di frumenti poliennali si sta procedendo su due linee distinte: domesticazione diretta di parenti stretti del grano annuale ed ibridazione di grano annuale con tali parenti.

Tra i vari membri della famiglia erbacea delle Triticae, che include le piante annuali di grano, orzo e segale, l'erba della pampa (*Thinopyrum intermedium*) è quello che è stato maggiormente studiato sia da coloro che sviluppano varietà di frumento annuali, sia da coloro che provano a sviluppare una nuova coltura perenne di graminacee. L'erba della pampa è considerata la più promettente erba perenne da sviluppare come coltura cerealicola in zone temperate. Essa infatti è quella che maggiormente sintetizza i migliori caratteri che una pianta perenne può avere per consentirne una coltivazione anche meccanizzata: una buona resistenza dello stelo, spighe erette, resistenza allo scuotimento, maturazione sincrona dei semi e rapido essiccamento una volta maturi, semi relativamente grandi, con un buon sapore ed ottime proprietà nutrizionali (paragonabili a quelle del grano). La ricerca su tale cereale viene al momento portata avanti soprattutto dall'istituto di ricerca del Land Institute in Kansas, dove si sta procedendo con la sua selezione sia per domesticazione diretta che per ibridazione. In particolare la ampia varietà genetica di tale specie offre la possibilità di molteplici combinazioni di successo senza restringere eccessivamente il patrimonio genetico della specie ed incorrere in sterilità o debolezza alle malattie. Attualmente con metodi di domesticazione diretta si riescono ad ottenere incrementi del tasso di produttività pari al 20% per ogni generazione, una crescita assai notevole, ma che comunque non porterebbe alla creazione di una varietà commercialmente competitiva prima di una cinquantina di anni. Il maggiore problema riguardante l'uso dei semi di erba della Pampa è che la farina da essi ottenuta non è in grado di lievitare e dovrebbe quindi essere utilizzata assieme ad altre farine.

L'erba della pampa, così come altri appartenenti perenni alla famiglia delle Triticae, può essere anche ibridata con successo con il grano annuale per aumentarne la resistenza come pianta annuale (cosa che fino ad oggi è avvenuta nella maggior parte dei casi), oppure per cercare di produrre grano perenne.

Fino ad oggi i maggiori problemi derivanti dall'ibridazione di erba della pampa e grano annuale sono stati causati da problemi di sterilità e di incompatibilità cromosomica, nonché dalla difficoltà di riuscire a mantenere nelle generazioni il carattere della poliennalità abbinato ad un produttività accettabile.

**Sorgo.** Il sorgo (*Sorghum bicolor*) è la coltura più importante in molte zone dell’Africa e dell’Asia e negli Stati Uniti è fondamentale per produrre mangimi per animali. Oltre al sorgo annuale vi sono diverse specie perenni, tra cui il *Sorghum halepense* e il *Sorghum proproinquum* che sono attualmente in fase di studio. Dei due soprattutto il primo è stato utilizzato in esperimenti di ibridazione con il sorgo annuale per creare una coltura poliennale, e da essi sono state ottenute piante con una produttività media di 1720 Kg di semi per ettaro all’anno, molto alta se paragonata a quella dei progenitori delle odierne varietà annuali e alle altre specie perenni finora domesticate. Sembra quindi che la via dell’ibridazione possa portare per il sorgo a buoni risultati in tempi relativamente brevi. Tuttavia vi sono ancora notevoli problemi dovuti al fatto che le due specie hanno un numero diverso di cromosomi e che nessuna pianta in tali esperimenti ha presentato le caratteristiche vincenti del sorgo annuale, uno stelo corto, maturità sincrona, semi grandi e spighe compatte.

**Segale.** La creazione di una coltura di segale (*Secale cereale*) perenne sembra essere possibile come lo è quella del grano. L’utilità di una coltura perenne di segale sarebbe notevole in quanto, grazie alla sua estrema resistenza a climi freddi, potrebbe essere utilizzata in molte aree oggi non coltivabili. Non per niente i primi esperimenti in tal senso furono intrapresi dall’Unione Sovietica che negli anni ’60 arrivò a produrre dei genotipi debolmente perenni. Oggi in Ungheria si è arrivati già alla commercializzazione di una varietà poliennale di segale, “Perenne”, utilizzata come foraggio, ma anche per la produzione di semi.

**Avena.** La creazione di avena perenne sembra presentare notevoli difficoltà e su di essa non sono state fatte molte sperimentazioni. Essa sembrerebbe possibile da creare mediante ibridazione di avena annuale (*Avena sativa*) e la perenne selvatica *Avena macrostachya*, possibile tuttavia soltanto agendo sui loro embrioni e non per via sessuata.

**Riso.** Per la sua importanza il riso (*Oryza sativa*) è oggetto di grande interesse da parte dei ricercatori, tanto che dal 1995 al 2001 l’International Rice Research Institute ha portato avanti un programma di sviluppo di varietà perenni di riso che riducessero l’erosione sui terrazzamenti dove spesso esso viene coltivato. I risultati ottenuti con tale programma sono stati poi distribuiti a vari enti collaboranti in Cina e all’Università di Kunming dove continuano gli sforzi per arrivare alla commercializzazione di riso perenne. Sforzi che principalmente si basano sull’ibridazione, piuttosto semplice, di *Oryza sativa* con il suo progenitore perenne *Oryza rufipogon*.

**Mais.** Per quanto riguarda il mais, i tentativi di crearne varietà poliennali sono stati rari e sporadici. L’ibridazione di mais annuale e suoi parenti poliennali è stata portata avanti con il solo scopo di migliorare la qualità della specie annuale e non con la volontà di cambiarne la natura.

**Girasole.** Il girasole domestico annuale (*Helianthus annuus*) non sembra possibile da trasformare in una coltura poliennale, tuttavia vi sono molte specie affini poliennali che potrebbero essere candidate importanti ad una domesticazione diretta. Tra queste il girasole di Maximilian (*Helianthus maximiliani*) è una pianta perenne nativa del Nord America che ha un notevole potenziale come pianta per la produzione di oli vegetali. Il Land Institute ha iniziato un programma di domesticazione di tale specie per migliorarne la grandezza del seme e la produttività.

Oltre alle specie principali sopra citate vi sono altre specie che potrebbero in futuro diventare colture poliennali di successo. In particolare si stanno compiendo tentativi di domesticazione diretta su segale selvatica (*Leymus racemosus*), sul *Leymus arenarius* (una specie già coltivata dai Normanni e di cui si sta tentando l’introduzione in Islanda), sul *Tripsacum dactyloides* e sull’*Oryzopsis hymenoides* tra i cereali, e su *Desmanthus illinoensis* e *Cassia marilandica* tra i legumi.

Crescita	Nome del Progenitore	Produttività del progenitore (Kg per ettaro)	Coltura domesticata	Produttività del domesticato (Kg per ettaro)	Reference
Annuale	<i>Triticum turgidum</i> ssp. <i>dicoccoides</i>	2100 a	Durum wheat (Grano duro)	4600	Beharav and Nevo 2004
Annuale	<i>Hordeum spontaneum</i>	1860 a	Barley (Orzo)	2690 a	Vega and Frey 1980
Annuale	<i>Avena sterilis</i>	1480 a	Oat (Avena)	3720 a	Lawrence and Frey 1976
Annuale	<i>Sorghum bicolor</i> ssp. <i>arundinaceum</i>	710	Sorghum (Sorgo)	4310	Cox T. S. and Frey 1984
Annuale	<i>Pennisetum glaucum</i> ssp.	470	Pearl millet (Miglio perlato)	2820	Bramel, Cox et al. 1986

monodii					
Annuale	<i>Helianthus annuus</i>	200	Sunflower (Girasole)	— b	Cummings and Alexander 2002
Perenne	<i>Thinopyrum intermedium</i>	600 a	—	—	Wagoner 1990
Perenne	<i>Desmanthus illinoensis</i>	890	—	—	DeHaan et al. 2003
Perenne	<i>Medicago sativa</i>	820	—	—	Bolanos, Aguilar et al. 2002
Perenne	<i>Helianthus maximiliani</i>	410	—	—	Jackson and Jackson 1999
Nota: ciascuna specie è stata confrontata con il suo progenitore con esperimenti standardizzati, benché svolti in studi differenti. Tutte le valutazioni sono state fatte in ambienti nei quali le specie sono ben adattate sotto condizioni sperimentali poco invadenti. Tutti i valori sono medie tra vari genotipi ed ambienti e non i valori di genotipi insolitamente produttivi.					
a. Comprensivo del peso della pula					
b. Non erano disponibili dati sulla produttività di girasoli selvatici e domestici ottenuti in un esperimento comune.					

Tabella 2. Tasso di produttività di sei progenitori annuali selvatici di graminacee e dei loro corrispondenti domestici e tasso di produttività di un gruppo di specie perenni candidate per la domesticazione come colture perenni.

## PATRIMONIO GENETICO

Uno degli aspetti più importanti che i ricercatori che si occupano di creare colture poliennali devono tenere in considerazione riguarda lo sviluppo di specie con un patrimonio genetico assai differenziato ed ampio. Infatti, è soltanto mantenendo uno spettro ampio di possibili variazioni genetiche che si potranno raggiungere gli aumenti di produttività necessari all'affermazione di tali colture.

Durante il processo di domesticazione, la maggior parte delle specie interessate soffre un restringimento del proprio patrimonio genetico. L'esempio probabilmente più estremo è quello delle attuali varietà di grano tenero che discendono probabilmente tutte da uno o pochi ibridi naturali che si formarono circa 5000 anni fa. Se le colture poliennali devono essere sviluppate in un corto periodo di tempo, le perdite di variazione genetica devono essere ridotte al minimo.

Per assicurare diversità interspecifica nel campo ed agevolare un più rapido miglioramento genetico i selezionatori devono sviluppare per ogni coltura un patrimonio genetico profondo, il che significa che devono incorporare materiale genico proveniente da altri parenti annuali o poliennali, cosa che richiede notevole sforzo ma che può dare ottimi risultati sul lungo periodo.

Come conseguenza dei loro patrimoni genetici più facilmente maneggiabili possiamo aspettarci che le varietà perenni di segale, riso e sorgo saranno le prime a superare la fase sperimentale. Al contrario creare un patrimonio genetico sufficientemente ampio per ibridi interspecifici di grano, avena, mais o girasole potrebbe richiedere un tempo lungo come o più lungo della domesticazione diretta di specie come *Desmanthus illinoensis* o girasole di Maximilian.

Per quanto riguarda l'ingegneria genetica nel suo senso più stretto, ovvero inserzione asexuata di geni singoli, è possibile speculare sul suo potenziale per trasformare piante annuali in poliennali, ma al momento attuale della conoscenza non è possibile andare oltre la semplice speculazione. Nessuna ricerca infatti suggerisce che la perennialità sia governata da un singolo gene o da un ristretto numero di essi, in nessuna pianta studiata. Si è visto infatti che spesso piante il cui genoma era composto per anche più del 50 % da geni derivanti da specie perenni, non presentavano i tratti di perennialità richiesti. Vi è quindi una complessità di base nella regolazione della perennialità che non può essere gestita mediante l'inserzione di geni singoli.

Di conseguenza la tecnologia transgenica potrebbe essere utile soltanto una volta che colture poliennali siano pienamente sviluppate per migliorare eventuali resistenze a malattie, qualità della produzione o tratti più semplici da governare della poliennialità. Tuttavia altri sistemi che non implicino il transgenico saranno comunque efficaci nel raggiungere i medesimi risultati nella maggior parte dei casi.

## **UTILIZZO DEL CARBONIO**

Un aspetto su cui vi sono posizioni contrastanti tra ricercatori è quello riguardante l'assimilazione del carbonio nelle piante poliennali. Infatti posto che la quantità di carbonio che viene assorbita dalla pianta viene divisa tra strutture riproduttive (semi) e vegetative, è incerto se sia possibile far sì che la pianta riesca ad avere grande produttività mantenendo intatte le strutture vegetative che ne consentono la poliennalità. In pratica ci si chiede se esiste un trade-off tra produttività e poliennalità. Attualmente si propende per considerare tale trade-off come esistente, pur mancando esperimenti che ne confermino pienamente la teoria.

La relazione negativa che si assume esista tra perennialità e produttività è basata largamente sull'osservazione delle specie esistenti, frutto della selezione naturale in direzioni differenti. Tuttavia mediante selezione artificiale si potrebbe aggirare tale ostacolo e creare piante efficienti nella produzione e allo stesso tempo capaci di sopravvivere per diverse stagioni riproduttive.

Il tasso di rendimento relativamente basso che si riscontra nelle specie poliennali non deve essere attribuito solamente al trade-off del carbonio. Infatti le piante tuttora in corso di domesticazione sono ancora essenzialmente selvatiche e ciò comporta che esse mantengano una serie di strutture atte alla difesa in ambienti ostili che potrebbero perdere qualora venissero utilizzate in ambienti artificialmente monitorati e tutelati come possono essere i campi, lasciando a disposizione così quantità ulteriori di energia per la produzione di semi. Per quanto riguarda invece le specie poliennali sviluppate per ibridazione, esse presentano diversi problemi genetici (sterilità, instabilità cromosomica, mancanza di differenziazione genetica) ciascuno dei quali va risolto singolarmente ed in relazione agli altri, e che quindi distraggono dall'obiettivo di aumentare la produttività.

Inoltre qualunque trade-off tra tasso di rendimento e perennialità dovrebbe avere luogo soltanto durante il primo anno dopo la semina poiché negli anni seguenti, con le strutture perenni ormai formate, la pianta dovrebbe essere in grado di assorbire più carbonio e riuscire così ad unire alta produttività con crescita del corpo vegetativo.

## **DIFFERENZE NELLA CREAZIONE DI VARIETÀ ANNUALI E POLIENNALI**

All'incirca tutte le colture siano esse annuali o poliennali richiedono una selezione diretta per incrementare le caratteristiche utili delle piante, tuttavia le piante poliennali richiedono tratti adattivi sostanzialmente diversi da quelle annuali.

I ricercatori che sviluppano piante poliennali devono affrontare problemi che sono esacerbati dal fatto che le piante devono sopravvivere e produrre su uno stesso terreno per anni anziché per pochi mesi. Selezionare tratti che implicino una maggiore resistenza a malattie, batteri, insetti e difficili condizioni climatiche sono di conseguenza più importanti per le colture poliennali rispetto alle annuali. Tuttavia la maggior parte delle ricerche sulle piante perenni non sarà rivolto alla monocoltura (più difficile da gestire per le alte concentrazioni di piante della stessa specie), quanto piuttosto a sistemi di agricoltura naturale, ovvero basati su policolture che raggruppano diversità inter e intraspecifica. Una maggiore biodiversità e le condizioni migliori di terreno che naturalmente caratterizzano tale tipologia di colture sono pensati appunto per ridurre la pressione selettiva per la resistenza a malattie e problemi di suolo.

Ovviamente il mantenimento di un tasso di produttività costante per diverse stagioni sarà un altro punto difficile da raggiungere ed occuperà molte attenzioni. Si devono infatti adattare alcune delle tecniche usate oggi per incrementare la produttività di foraggi perenni e colture di piante ad alto fusto.

Anche se coltivate in sistemi più ecologici e naturali di quelle annuali, le piante poliennali devono sviluppare una maggiore resistenza a funghi, nematodi e virus. Infatti anche le colture annuali sono vulnerabili da tali organismi, ma infezioni lente o tardive nella stagione non portano alcun danno rilevante come conseguenza del corto periodo vitale e della rotazione delle colture. Le colture poliennali invece, qualora mancassero di resistenza genetica a tali fattori sarebbero facilmente vittime di grossi danni e i cicli di ripiantumazione e rotazione dovrebbero essere accorciati, perdendo di fatto il vantaggio della poliennalità.

La necessità di un rapido attecchimento sotto condizioni climatiche anche difficili è invece una necessità più tipica delle colture annuali. Nelle colture poliennali l'attenzione alla semina è di gran lunga superata dalla necessità di garantire una lunga sopravvivenza.

I selezionatori di piante devono fronteggiare continuamente interazioni del tipo genotipo della coltura – ambiente, dove per ambiente si intende tutto ciò che circonda il campo della coltura in questione. Le tecniche di selezione tradizionali tendenzialmente puntano a controllare tutti fattori ambientali per evitare passaggi di materiale genetico tra ambiente e coltura, tuttavia per selezionare piante poliennali che si troveranno su un appezzamento di terreno per diverse stagioni e saranno calate in ambienti più diversi geneticamente le interazioni tra specie non potranno essere eliminate o controllate oltre certi limiti e bisognerà affidarsi alle capacità del sistema di autocontrollarsi.

La biodiversità, che può essere manifestata a diversi livelli nei sistemi agricoli, è benvoluta dal selezionatore quando propone soluzioni a problemi che altrimenti dovrebbero essere gestiti geneticamente. I selezionatori di colture annuali per monocolture hanno dovuto trovare più e più volte rimedi genetici a problemi che non esistono in realtà in ecosistemi naturali, ma soltanto negli artificialissimi campi.

I metodi di agricoltura naturale puntano a mimare tali ecosistemi naturali eliminando molti problemi dalla lista dei selezionatori come la compattezza del suolo, la mancanza di fosforo, un basso pH e altre caratteristiche potenzialmente pericolose per le monocolture annuali.

I programmi di selezione nel mondo probabilmente spendono più per incorporare geni per la resistenza alle malattie e agli insetti che per ogni altra attività. Però nel selezionare piante poliennali da crescere come policolture dovrebbero essere accettabili minori livelli di resistenza genetica. Specie diverse così come la minore concentrazione di piante della stessa specie possono fornirsi a vicenda protezione contro agenti patogeni ed insetti.

Al contrario invece le policolture perenni saranno maggiormente vulnerabili delle colture annuali agli agenti patogeni del terreno.

Ovviamente un'ultima importante differenza sta nelle tempistiche di creazione, creare colture perenni richiede cicli di selezione più lunghi, fino a 5 anni per valutare congiuntamente poliennalità, fertilità e produttività, contro i pochi mesi necessari per le colture annuali.

## CONCLUSIONI

L'introduzione e la diffusione su vaste scale di colture poliennali rappresenterebbe sicuramente, qualora si riuscissero ad ottenere varietà altamente produttive, una straordinaria rivoluzione in campo agricolo nella direzione della sostenibilità del sistema.

Tuttavia è certo che si tratta di un'impresa notevole per quanto riguarda gli investimenti necessari e gli sforzi in ricerca.

È proprio la ricerca che potrebbe costituire l'ostacolo più difficile da superare, infatti, benché a livello globale ci si stia muovendo rapidamente, gli investimenti in tale ambito sono tuttora assai ridotti rispetto alla portata che potrebbe avere l'introduzione massiccia di tali colture, in particolare gli investimenti sono molto ridotti rispetto agli analoghi nello sviluppo di varietà annuali e transgeniche. Gli sforzi, relativamente modesti, sono intrapresi per lo più da organizzazioni non profit nell'ambito della domesticazione diretta, e dovrebbero essere accresciuti di diversi ordini di grandezza da parte di università ed enti di ricerca pubblici e privati se si vogliono accorciare le tempistiche di sviluppo.

Sarebbero necessari programmi esclusivi volti alla creazione di cereali, legumi e semi oleosi perenni, che fossero organizzati organicamente e che vedessero la collaborazione di più attori, centri di ricerca, università, finanziatori privati e pubblici.

Vista la complessità della materia e il numero elevato di anni che occorrono per portare avanti gli sviluppi di un progetto di questo tipo occorrerebbe muoversi in anticipo per non dover poi incorrere in brutte sorprese. Già oggi infatti in molte zone sarebbe preferibile iniziare a coltivare piante che preservino il terreno producendo magari di meno ma con un assai minore utilizzo di energia e agenti chimici.

Un secondo problema, in parte correlato al primo, è la ovvia necessità di riuscire a sviluppare colture adeguatamente produttive, in grado di sostenere la sfida.

Con ogni probabilità la produttività delle colture perenni non sarà mai elevata come quella delle colture annuali poiché le strategie vitali di piante annuali e perenni sono troppo differenti e l'energia assimilata mediante fotosintesi da una pianta poliennale deve essere utilizzata per un numero maggiore di funzioni vitali.

Gli aumenti dei tassi di rendimento registrati, pari al 25 % per ciclo sono senz'altro considerevoli, specialmente considerato il fatto che la selezione non avviene esclusivamente per migliorare il rendimento ma per portare avanti lungo la scala dell'utilità una serie di diverse caratteristiche. Tuttavia poiché le risposte alla selezione presentano linee di tendenza che crescono in maniera lineare o decrescono nel tempo, i futuri miglioramenti per ciclo saranno probabilmente non superiori di una costante percentuale della produttività media della popolazione.

Quindi un maggiore sforzo di ricerca sarebbe necessario per evitare che i tassi di crescita subiscano rallentamenti eccessivi che porterebbero le tempistiche di sviluppo ben oltre i 50 anni previsti attualmente per l'introduzione di varietà poliennali utili, tempistiche già molto dilatate.

Altre problematiche che dovranno essere affrontate al momento della diffusione delle nuove colture riguarderanno le infrastrutture e i macchinari agricoli, che dovranno essere adattati a nuovi sistemi basati sulla poliennalità e sulle policolture, la creazione di nuovi fertilizzanti e di pesticidi, che benché in quantità assai ridotte, saranno ancora utili, la riorganizzazione logistica della raccolta e delle attività a valle.

Si dovranno inoltre modificare in parte anche i gusti della popolazione poiché, anche se si cercherà di creare piante dalle caratteristiche organolettiche quanto più simili alle attuali, vi sarà sempre una, anche minima, differenza.

Per concludere, considerati i lunghi tempi di sviluppo delle colture poliennali, il paradigma tradizionale di agricoltura sopravvivrà come dominante per almeno ancora un secolo e con ogni probabilità non scomparirà mai del tutto dal momento che, benché il suo impatto ambientale sia notevole, vi sono aree che lo tollerano bene.

Ciò non toglie che molte zone del pianeta trarrebbero grande giovamento dall'introduzione di metodi di agricoltura naturale e che l'introduzione di colture poliennali possa avere la capacità di aprire nuove prospettive di sviluppo sostenibile.

## BIBLIOGRAFIA

Bender M. H., "An economic comparison of traditional and conventional agricultural systems at a county level", <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2000/12/15/3df6412ab088c>.

Bender M. H., Brummer E. C., Cox T. Stan, Holland J. B., Jackson Wes, Paterson A. H., Picone C., Van Tassel David L., Zoeller B. E., "Breeding perennial grain crops", <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2002/06/01/3dcbf8a7874a8>.

Cox Cindy M., Cox T. Stan, Glover Jerry D., Van Tassel David L., DeHaan Lee R., "Prospects for Developing Perennial Grain Crops", [http://www.landinstitute.org/pages/Bioscience\\_PerennialGrains.pdf](http://www.landinstitute.org/pages/Bioscience_PerennialGrains.pdf).

Cox Cindy M., Glover Jerry D., Reganold John P., "Il futuro dell'agricoltura", *Le Scienze*, ottobre 2007, n. 470, pp. 102 – 109.

Cox T. Stan: "The Mirage of Genetic Engineering", <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2001/12/07/3c56d6ef9>.

Cox T. Stan, Jackson Wes, "Agriculture and Biodiversity Loss: Genetic Engineering and the Second Agricultural Revolution", *Life on Earth: an Encyclopedia of Biodiversity, Ecology and Evolution*, Niles Eldredge (Ed.), 2002, pp. 96 – 99.

Food and Agriculture Organization, 2002, *Crops and Drops: making the best use of water for agriculture*, <http://www.fao.org/docrep/005/y3918e/y3918e00.HTM>.

Food and Agriculture Organization, 2002, *World Agriculture: Towards 2015 – 2030*, <http://www.fao.org/docrep/004/y3557e/y3557e00.htm#TopOfPage>.

Food and Agriculture Organization, *The state of food and agriculture*, 2007, <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1200e/a1200e00.pdf>.

Glover Jerry D., "Characteristics of Annual vs. Perennial Systems", presentato in occasione della "Sod based cropping system conference", University of Florida's Institute of Food and Agricultural Sciences, Quincy, Florida, febbraio 2003, <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2003/02/20/3e78b3f2d0336>.

Glover Jerry D., Wilhelm William (a cura), "Perennial grain crops: an agricultural revolution", *Special issue of renewable agriculture and food systems*, marzo 2005, vol. 20, n.1.

Jackson Wes, "Natural System Agriculture: a radical alternative", <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/2001/04/17/3aa80bec9>.

Jackson Wes, *New roots for agriculture*, University of Nebraska Press, Lincoln (Ne), 1985.

Jackson Wes, Piper Jon, "The Necessary Marriage Between Ecology and Agriculture", <http://www.landinstitute.org/vnews/display.v/ART/1989/12/01/3d63fa0a0cd34>.

Picone C., Van Tassel David L., "Agriculture and Biodiversity Loss: Industrial Agriculture", *Life on Earth: an Encyclopedia of Biodiversity, Ecology and Evolution*, Niles Eldredge (Ed.), 2002, pp. 99 – 105.

Sachs Jeffrey D., "Il prezzo del cibo e la stabilità", *Le Scienze*, agosto 2008, n. 480, p. 18.