

● DALLA CURIOSITÀ BOTANICA ALLA TECNOLOGIA AGRICOLA DEL FUTURO

Produrre semi per via clonale è possibile e vantaggioso

di **Emidio Albertini,**
Alessandra Gentile

Nel cuore dell'Ottocento, nei celebri Kew Gardens di Londra, tre piante australiane sconosciute destarono scalpore. Erano femmine e non c'erano piante maschili nei dintorni. Eppure, anno dopo anno, producevano semi vitali da cui nascevano piantine identiche alla pianta madre.

Quelle piante, ribattezzate *Caelebogyne ilicifolia*, erano in grado di generare semi senza impollinazione. Solo molti decenni dopo si è compreso che si trattava di un fenomeno noto come apomissia.

Oggi questa scoperta è molto più di una curiosità botanica: potrebbe rappresentare la chiave per una nuova rivoluzione agricola, capace di ridurre i costi di produzione e aumentare la sicurezza alimentare su scala globale.

Cos'è l'apomissia?

L'apomissia è una straordinaria modalità di riproduzione asessuata attraverso la quale alcune piante sono in grado di formare semi vitali senza la necessità della meiosi (il processo di divisione cellulare che dimezza il numero di cromosomi) e senza fecondazione. Il risultato è la produzione di semi clonali, contenenti embrioni geneticamente identici alla pianta madre.

Con le tecniche TEA l'Università di Davis (USA) ha introdotto nel riso l'apomissia cioè la possibilità di riproduzione asessuata. I semi di queste piante TEA sono quindi identici, genotipicamente e fenotipicamente, alla pianta madre, praticamente dei cloni, stabilizzando i vantaggi dell'eterosi

In altre parole, le piante apomittiche «saltano» i meccanismi tipici della riproduzione sessuale, generando progenie uniforme e stabile nel tempo.

L'apomissia si manifesta in diverse forme, distinte in base alla modalità con cui si sviluppa l'embrione.

In tutti i casi, l'embrione è geneticamente identico alla pianta madre, il che permette di fissare stabilmente le combinazioni genetiche vantaggiose. A oggi l'apomissia è stata documentata in oltre 300 specie appartenenti a circa 40 famiglie di angiosperme, con prevalenza nelle *Asteraceae*, *Poaceae*, *Rosaceae* e *Rutaceae*, tutte famiglie importanti in agricoltura.

Un tesoro genetico per l'agricoltura

Nel contesto dell'agricoltura moderna, l'utilizzo di varietà ibride F1 rappresenta una delle strategie più efficaci per ottenere colture ad alta resa. Questi

ibridi derivano dall'incrocio di due linee parentali selezionate e sono caratterizzati da eterosi, o vigore ibrido: un fenomeno biologico che consente alle piante figlie di esprimere performance superiori rispetto a entrambe le linee parentali, manifestandosi con rese elevate, omogeneità genetica e fenotipica, e spesso una maggiore tolleranza agli stress ambientali e biotici. Tuttavia, questa straordinaria produttività ha un prezzo: la produzione del seme F1 su larga scala può essere svolta solo da aziende sementiere specializzate, e la progenie F2 (ovvero quella che si forma dalla coltivazione delle piante F1) risulta estremamente eterogenea a causa della segregazione genetica, impedendone di fatto il riuso l'anno successivo.

Per questa ragione la coltivazione di varietà ibride richiede la produzione continua di nuovo seme F1 a partire dalle linee originali, con un notevole sforzo economico da parte delle aziende sementiere, sforzo che



Taraxacum e *Rubus* sono solo alcune delle specie apomittiche presenti in natura

si ripercuote anche sul prezzo del seme stesso.

In questo scenario, l'introduzione dell'apomissia nella generazione F1 potrebbe rappresentare una vera e propria rivoluzione verde. Le piante apomittiche F1 sarebbero in grado di produrre seme e progenie geneticamente identiche alla pianta madre fissando in modo permanente i caratteri desiderati di una buona varietà.

L'adozione dell'apomissia comporterebbe vantaggi agronomici ed economici straordinari:

- drastico abbattimento dei costi di produzione del seme ibrido, poiché verrebbe meno la necessità di incrociare linee parentali ogni stagione;
- autonomia e resilienza per gli agricoltori dei Paesi in via di sviluppo, che potrebbero riseminare i semi salvati dal raccolto senza compromessi sulla qualità.

Nel riso l'adozione di varietà a seme clonale apomittico potrebbe generare un risparmio globale fino a 1,8 miliardi di euro/anno. Per colture come la cassava e la patata, i benefici stimati superano i 2,3 miliardi di euro/anno, in virtù della possibilità di abbandonare la propagazione vegetativa – costosa e suscettibile a virosi – in favore della propagazione per seme apomittico. Nonostante il suo enorme potenziale, l'apomissia è quasi del tutto assente nelle colture alimentari attualmente in uso, con rare eccezioni come il mango e qualche agrume, dove l'apomissia è molto sfruttata per la produzione di portinnesti.

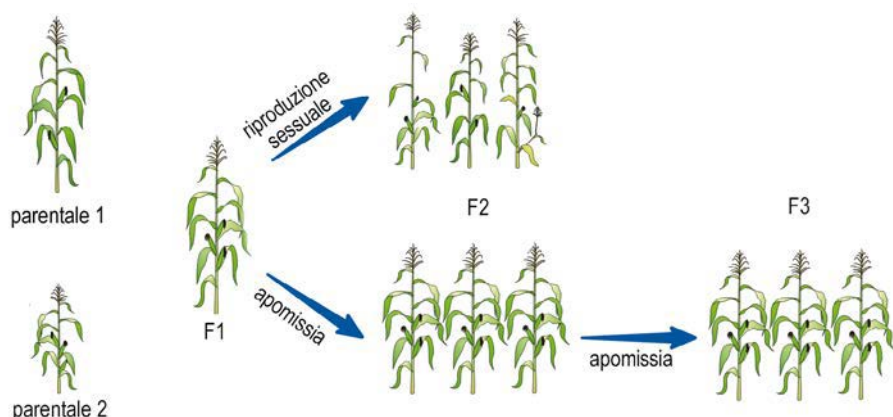
La scarsità dell'apomissia tra le piante coltivate è probabilmente legata a millenni di selezione che hanno inconsapevolmente eliminato il carattere, svantaggioso per l'introduzione di variabilità genetica.

Oggi però, grazie ai progressi nelle biotecnologie vegetali e alla comprensione dei meccanismi genetici ed epigenetici alla base dell'apomissia, si sta lavorando per introdurre artificialmente questa modalità riproduttiva in colture di rilevanza mondiale. Esperimenti condotti su modelli come *Arabidopsis* (una comune brassicacea) e riso indicano che questa strategia è possibile.

Sfide biologiche e genetiche aperte

L'introduzione dell'apomissia nelle colture rappresenta una delle frontiere più promettenti, ma anche più com-

FIGURA 1 - Sequenza di incrocio di parentali selezionati con successive generazioni F1, F2 ed F3 per apomissia e non



L'incrocio tra due linee parentali selezionate produce seme ibrido F1 da cui nascono piante uniformi, molto vigorose e produttive. A seguito della riproduzione sessuale, queste piante producono seme inutilizzabile dall'agricoltore in quanto da esso si svilupperanno popolazioni con minore vigore e fortemente variabili a causa della ricombinazione genetica (F2). Utilizzando linee apomittiche, invece, il genotipo dell'ibrido F1 verrebbe mantenuto per numerose generazioni.

plesse della biotecnologia vegetale, e la sua applicazione pratica su larga scala è ancora ostacolata da numerose difficoltà biologiche e genetiche.

In primo luogo l'apomissia è un processo multicomponente e finemente orchestrato.

I tre elementi chiave – apomeiosi (formazione di gameti non ridotti senza meiosi), partenogenesi (sviluppo embrionale senza fecondazione) e sviluppo dell'endosperma – possono essere controllati da vie genetiche indipendenti. Questo rende estremamente complessa l'introggressione simultanea di tutti e tre i tratti in piante coltivate.

Sebbene in alcune specie, tra cui *Paspalum* e *Cenchrus*, l'apomissia sembri associata a un singolo locus dominante, le analisi molecolari suggeriscono che tali loci siano regioni genomiche complesse e recalcitranti alla ricombinazione. Inoltre, il controllo epigenetico svolge un ruolo determinante: fattori ambientali o ibridazione possono indurre o reprimere elementi apomittici, suggerendo che l'apomissia sia un carattere regolato in modo dinamico più che rigidamente codificato.

Un'altra criticità è legata alla uniformità genetica derivante dalla riproduzione clonale. Sebbene tale omogeneità sia un vantaggio nella produzione agricola, essa comporta un serio rischio: la vulnerabilità a patogeni, cambiamento climatico o stress ambientali. In assenza di ricombinazione genetica, le popolazioni apomittiche posso-

no accumulare mutazioni deleterie o essere meno reattive all'evoluzione di patogeni e parassiti.

Per mitigare questo rischio, alcune specie naturali, come *Poa pratensis* e *Taraxacum officinale*, adottano una strategia di apomissia facoltativa, alternando sessualità e apomissia a seconda delle condizioni ambientali. Questa plasticità riproduttiva, che consente la generazione di variabilità genetica in momenti critici, rappresenta un modello funzionale da emulare nei programmi di miglioramento genetico.

In sintesi, l'apomissia può diventare un'innovazione agronomica dirompente, ma la sua implementazione richiede un profondo sforzo multidisciplinare per comprendere le basi molecolari del fenomeno, disaccoppiare i suoi componenti funzionali e garantire stabilità ed efficacia nei sistemi agricoli.

Le radici dell'apomissia

Contrariamente all'idea tradizionale secondo cui l'apomissia sarebbe un'anomalia evolutiva, una sorta di fallimento o deviazione dalla sessualità «normale», alcuni studi recenti propongono una visione radicalmente diversa: l'apomissia e la riproduzione sessuata potrebbero essere entrambe modalità ancestrali coesistenti, manifestazioni di un polifenismo (plasticità fenotipica) riproduttivo primordiale. In questa prospettiva, i due sistemi non si escluderebbero, ma rappresenterebbero strategie alternative,

evolutive conservate e selezionabili in base alle condizioni ambientali.

Questa ipotesi si fonda sull'osservazione che l'apomissia non è un fenomeno raro e accidentale, ma si manifesta dai protisti ai funghi, dalle alghe alle piante superiori, suggerendo una radice antichissima. In particolare, Carman e collaboratori (2011) e successivamente Albertini e collaboratori (2019) hanno proposto che l'apomissia non si sia evoluta «da» una condizione sessuale, ma che entrambi i meccanismi riproduttivi derivino da un comune antenato unicellulare eucariotico dotato della capacità di passare ciclicamente da una modalità all'altra, come osservato ancora oggi in organismi come afidi, crostacei planctonici e alcune piante erbacee.

In ambienti favorevoli, la strategia apomittica, che garantisce una rapida produzione di cloni ben adattati, sarebbe risultata vantaggiosa per la colonizzazione e l'espansione. Al contrario, in condizioni di stress o di cambiamento ambientale, la riproduzione sessuale, introducendo variabilità genetica, avrebbe offerto un vantaggio evolutivo cruciale.

A sostegno della natura ancestrale dell'apomissia vi è anche il fatto che le sue componenti fondamentali (apomeiosi, partenogenesi e sviluppo del seme) si ritrovano in forme diverse e indipendenti in numerosi gruppi vegetali e animali. La capacità di produrre semi vitali in assenza di meiosi e fecondazione non rappresenta dunque un'eccezione isolata, ma un'opzione regolabile e latente del programma riproduttivo delle piante.

Il ruolo dell'epigenetica

Un elemento centrale in questa visione è il ruolo dell'epigenetica e dei segnali ambientali nel determinare il passaggio tra sessualità e apomissia. Le ricerche condotte su *Hieracium*, ad esempio, mostrano come mutazioni o deregolazioni di pochi loci chiave siano sufficienti ad attivare un programma apomittico in tessuti normalmente destinati alla riproduzione sessuale.

In conclusione, l'apomissia non va più vista come un'anomalia, ma come un'eredità profonda, forse antichissima, della storia evolutiva dei viventi. La sua riscoperta e comprensione, anche in chiave applicativa, potrebbe non solo rivoluzionare la genetica agraria, ma anche riscrivere le nostre idee sull'origine e l'evoluzione della sessualità stessa.

Il riso clonato

Uno degli esempi più avanzati e promettenti nell'applicazione dell'apomissia artificiale riguarda il riso (*Oryza sativa*), una delle colture più importanti al mondo. Un team di ricerca dell'Università della California a Davis, guidato da Venkatesan Sundaresan, ha compiuto un passo epocale realizzando piante di riso capaci di produrre semi clonali attraverso una combinazione di editing genetico di precisione (le TEA) e biotecnologie riproduttive.

Il cuore di questa innovazione è il sistema MiMe (*Mitosis instead of Meiosis* - mitosi invece di meiosi), un ingegnoso approccio che converte la meiosi in una mitosi modificata. Attraverso l'introduzione di mutazioni simultanee in tre geni chiave coinvolti nella meiosi gli autori hanno bloccato la riduzione cromosomica tipica della gametogenesi sessuale. Le cellule germinali femminili risultanti mantengono così l'intero corredo genetico della pianta madre, dando origine a ovuli geneticamente identici.

Tuttavia, l'apomeiosi da sola non è sufficiente: serve anche attivare la formazione dell'embrione in assenza di fecondazione. Per questo, i ricercatori hanno integrato nel sistema MiMe un secondo elemento chiave: il gene BBM1 (Baby boom 1), un fattore di trascrizione precedentemente isolato da piante apomittiche e noto per la sua capacità di indurre embrioni da cellule somatiche.

Queste modifiche permettono alle piante di formare semi vitali senza passare per la fecondazione né la ricombinazione genetica, generando cloni perfetti della pianta madre. I semi così ottenuti sono indistinguibili da quelli ottenuti per via sessuale e conservano pienamente la capacità germinativa, superando uno degli ostacoli principali delle tecnologie clonali precedenti.

Il risultato è un sistema stabile di riproduzione clonale per seme, il primo mai realizzato con successo in una coltura di rilevanza agronomica, che apre la strada a una rivoluzione potenziale per il miglioramento genetico.

La tecnologia consentirebbe infatti di fissare permanentemente varietà ibride F1 molto produttive evitando il decadimento genetico nella generazione successiva e riducendo drasticamente i costi legati alla produzione di nuovi semi delle varietà ibride.

In prove in serra le linee di riso ottenute hanno mostrato un'efficienza significativa nella produzione di seme

per apomissia, pur con margini di miglioramento. I ricercatori stimano che perfezionando la regolazione temporale e spaziale dell'espressione genica – in particolare dell'induzione di BBM1 – si potrà aumentare ulteriormente la resa in granello e la stabilità del sistema.

Il futuro delle sementi è clonale?

In un'epoca in cui la sicurezza alimentare dipende anche dalla capacità di rendere più sostenibile, efficiente e accessibile la produzione di sementi, l'apomissia potrebbe rappresentare un punto di svolta. I benefici sono molteplici: semplificazione della filiera sementiera, riduzione drastica dei costi legati alla produzione di ibridi F1, valorizzazione di varietà altamente produttive in contesti agricoli marginali e possibilità di adattare varietà performanti a scenari climatici e ambientali estremi.

Nel caso degli agrumi l'identificazione del gene responsabile della poliembria consentirà di selezionare sementi poliembriionici o monoembriionici, rendendo la produzione di individui clonali molto efficiente.

Resta tuttavia aperta la sfida più complessa: rendere l'apomissia un sistema stabile, efficiente e regolabile. Le difficoltà sono sia genetiche (data la natura complessa e poligenica del carattere) sia epigenetiche (per via dei meccanismi di silenziamento e riattivazione genica coinvolti). Inoltre, il rischio di una perdita di diversità genetica nei sistemi produttivi troppo uniformi va bilanciato con strategie che mantengano una quota di sessualità o introducano periodicamente nuova variabilità genetica.

Eppure, i segnali sono chiari: la possibilità di progettare varietà resilienti, performanti e a basso costo, che si autoriproducono fedelmente per seme, non è più confinata alla teoria.

Emidio Albertini

Università degli studi di Perugia

Alessandra Gentile

Università degli studi di Catania



Questo articolo è corredato di bibliografia/contenuti extra. Gli Abbonati potranno scaricare il contenuto completo dalla Banca Dati Articoli in formato PDF su: www.informatoreagrarario.it/bdo

L'INFORMATORE AGRARIO

www.informatoreagrario.it



Edizioni L'Informatore Agrario

Tutti i diritti riservati, a norma della Legge sul Diritto d'Autore e le sue successive modificazioni. Ogni utilizzo di quest'opera per usi diversi da quello personale e privato è tassativamente vietato. Edizioni L'Informatore Agrario S.r.l. non potrà comunque essere ritenuta responsabile per eventuali malfunzionamenti e/o danni di qualsiasi natura connessi all'uso dell'opera.