

Organismi geneticamente modificati (OMG)

Un Organismo Geneticamente Modificato (OGM) è un essere vivente, come una pianta, un animale o un microrganismo, il cui DNA è stato modificato in laboratorio tramite tecniche di DNA ricombinante.

Queste modifiche possono riguardare l'aggiunta di un gene estraneo (ad esempio da un'altra specie), oppure la modifica o la rimozione di sequenze già presenti. Quando un gene inserito nell'organismo ospite non fa parte del suo patrimonio genetico ma deriva appunto da un altro organismo, si parla di trans genesi. Al contrario, nella "cisgenesisi" il gene proviene da una specie interfertile o molto vicina. Negli ultimi anni si sono sviluppate tecniche più precise, che ricadono nella grande categoria delle tecniche denominate "genome editing", che agiscono come forbici molecolari per tagliare e modificare il DNA in punti molto precisi e scelti a priori, che possono modificare anche una sola lettera (una singola base azotata) che compone il DNA di un organismo.

Complessivamente, grazie a queste tecniche, le modificazioni genetiche possono essere più rapide e precise rispetto ai metodi tradizionali di selezione delle piante, utilizzati più o meno consapevolmente da 10000 anni ad oggi, a partire dalla nascita dell'agricoltura.

Per capire realmente cosa sia un OGM dobbiamo andare con ordine e partire dalle basi...

Cos'è il DNA?

Il DNA è la molecola che contiene l'informazione genetica necessaria al funzionamento e allo sviluppo di ogni organismo vivente. È formato da due filamenti avvolti in doppia elica e da quattro basi azotate (A, T, G, C) organizzate in modo estremamente preciso. Le basi sono lette dall'apparato cellulare come un codice, analogo a un linguaggio informatico: piccoli cambiamenti nella sequenza possono avere effetti significativi sul fenotipo. La sua struttura semplice ma altamente organizzata permette al DNA di conservare e trasmettere l'informazione genetica durante la replicazione e le generazioni. Sebbene sia composto solo da quattro basi, il DNA è in grado di codificare un'enorme varietà di informazioni grazie alla sua lunghezza e alla disposizione delle sequenze. Come un software, basato sul codice binario (0 e 1), può svolgere numerose funzioni complesse, così la combinazione delle basi (codice genetico) permette di formare proteine e reti regolatorie estremamente complesse che determinano forma e funzione, metabolismo e adattamento degli organismi viventi. Entrare all'interno di questo codice e scoprire quali informazioni porti ogni

pezzetto di codice è un'operazione complessa che tuttavia, migliaia di scienziati e ricercatori hanno portato e stanno portando avanti, nei laboratori di tutto il mondo.

Così come un codice informatico può essere alterato o modificato, così le sequenze del DNA possono subire cambiamenti. Questi cambiamenti, chiamati “mutazioni” possono interessare una sola base (mutazioni puntiformi) o intere regioni di un cromosoma. Il paragone con un libro è efficace: modificare una lettera può alterare il significato di una parola, mentre cambiare frasi o paragrafi può avere conseguenze maggiori. Gli effetti di una mutazione dipendono dal contesto: possono essere dannose, neutre o vantaggiose, e l'ambiente determina se la variazione verrà mantenuta dalla selezione naturale. Già da questo si può capire che non necessariamente una mutazione è dannosa di per sé ma dipende dal tipo di mutazione e dal contesto ambientale in cui l'organismo che l'ha introdotta, si trova.

I cambiamenti nel DNA avvengono continuamente. Le mutazioni spontanee derivano da errori nella replicazione del DNA, mentre quelle indotte provengono da agenti esterni come sostanze chimiche, radiazioni UV o ionizzanti. Stabilire se queste mutazioni siano “pericolose” dipende dalla loro posizione, dall'effetto sulla proteina e dal contesto biologico. Molte mutazioni non hanno alcuna conseguenza; altre possono fornire vantaggi evolutivi.

I media hanno da sempre influenzato la percezione del pubblico nei confronti della scienza: ciò che è nuovo viene spesso rappresentato come potenzialmente pericoloso. Nel caso dei supereroi, la narrativa semplifica processi biologici complessi. Captain America ottiene i suoi poteri tramite un “siero” chimico: negli anni '40 la chimica rappresentava la frontiera scientifica, e il pubblico proiettava su di essa speranze e paure. Negli anni '50 la radioattività era la novità tecnologica più inquietante e affascinante. Hulk rappresenta l'idea narrativa secondo cui l'esposizione ai raggi gamma possa creare mutazioni in grado di alterare le capacità di un organismo conferendo poteri soprannaturali. Rimanendo sempre nel campo dei supereroi, Spider-man è un altro esempio di come la narrazione e la percezione dell'ignoto riesca ad influenzare la nostra capacità di giudizio. Siamo all'incirca negli stessi anni della nascita dell'Incredibile Hulk ed effettivamente nel fumetto, il morso attraverso il quale Peter Parker acquisisce i suoi poteri di ragno, proveniva da un ragno radioattivo, ma nel film, che è dei primi anni 2000, il morso proviene da un ragno geneticamente modificato. Nei primi anni 2000 la tecnologia del DNA ricombinante costituiva, l'elemento di novità e di paura.

Ma come si arriva a parlare di OGM e a sviluppare la tecnologia che ne è alla base?

L'evoluzione dell'uomo moderno negli ultimi 10.000 anni è stata possibile soprattutto grazie alla nascita dell'agricoltura. Da nomadi siamo diventati stanziali, e la produzione di cibo stabile ha permesso la nascita di società complesse, mestieri specializzati e rapide innovazioni. Il progresso tecnologico, dalla macchina a vapore ai viaggi spaziali, ha radici profonde nella capacità di produrre cibo a sufficienza. Le prime coltivazioni di grano sorsero nella Mezzaluna Fertile circa 10.000 anni fa. Grazie alla domesticazione, il grano si trasformò da una pianta selvatica con semi facilmente disperdibili a una coltura redditizia capace di sostenere comunità in crescita. La selezione umana ha favorito tratti che facilitavano la raccolta, anche se spesso sfavorevoli alla sopravvivenza naturale. Il grano moderno è il risultato di incroci casuali e mutazioni avvenute in natura, ma anche della selezione umana. Gli incroci tra specie non interfertili hanno portato alla formazione di grano duro e tenero attraverso processi di poliploidia generando dei veri e propri "mostri genetici".

Tutti questi cambiamenti hanno portato spessissimo a generare organismi che non sarebbero in grado di sopravvivere in natura se non ci fosse l'intervento dell'uomo. In natura infatti, le piante hanno sviluppato numerose strategie per disperdere i semi nel modo più efficace possibile: dispersione tramite vento (anemocoria), acqua (idrocoria), animali (zoocoria), o meccanismi di autoespulsione. Una buona dispersione aumenta la fitness della pianta, cioè la sua capacità di sopravvivere e riprodursi. L'uomo, però, intervenendo nella selezione artificiale, ha privilegiato tratti che facilitano raccolta e produzione, anche se sfavoriscono la fitness naturale. Un esempio emblematico è il grano: nella forma selvatica, i semi cadono a maturazione; nelle varietà addomesticate, restano attaccati alla spiga, caratteristica vantaggiosa per l'agricoltore ma svantaggiosa per la pianta in natura. A partire dagli anni '50, la Rivoluzione Verde ha trasformato l'agricoltura mondiale grazie a nuove varietà migliorate, fertilizzanti, pesticidi, irrigazione efficiente e meccanizzazione. Scienziati come Norman Borlaug hanno sviluppato varietà di grano ad alta resa e taglia ridotta, capaci di evitare l'allettamento (il piegarsi delle piante). Questa rivoluzione ha permesso di aumentare drasticamente la produzione alimentare globale, riducendo la fame in molti paesi compresi quelli in via di sviluppo. Le varietà di grano selezionate durante la Rivoluzione Verde presentavano internodi più corti grazie a mutazioni in geni che regolano la risposta alle gibberelline (ormoni della crescita). La taglia ridotta riduceva il rischio di allettamento, permettendo alla pianta di destinare più energia alla produzione di semi. Queste varietà "dwarf" o "semi-dwarf" hanno rivoluzionato la produttività dei campi, consentendo rese più elevate e stabili anche in presenza di fertilizzazione intensiva. L'introduzione delle varietà migliorate ha enormemente aumentato la resa per ettaro del grano nel corso del XX secolo. Le nuove piante convertivano più energia in granella e meno in biomassa strutturale, e si adattavano meglio a pratiche agricole moderne. La resa non dipende solo dalla genetica, ma anche dalle tecniche agricole: fertilizzazione

azotata, controllo delle infestanti, irrigazione mirata e uso del trattore hanno reso possibile un cambiamento drastico nella disponibilità di cibo.

Il mais ha beneficiato di strategie simili: miglioramento genetico, selezione degli ibridi e uso di fertilizzanti hanno permesso di raddoppiare o triplicare le rese in molti paesi. L'ibridazione (crossing tra linee pure) produce vigore ibrido, o "eterosi", che aumenta produttività, resistenza a stress e uniformità. Queste innovazioni hanno reso il mais una delle colture più importanti al mondo, fondamentale per alimentazione umana, zootecnia e industria. Il riso, alimento base per oltre metà della popolazione mondiale, ha visto un incremento di resa grazie a varietà semi-nane come IR8, sviluppate dall'IRRI (International Rice Research Institute). Anche qui, la riduzione dell'altezza, una maggiore efficienza fotosintetica e la resistenza alle malattie hanno permesso forti aumenti delle rese. Il riso è un caso emblematico di come il miglioramento genetico possa avere impatti sociali profondi, riducendo carestie e aumentando la sicurezza alimentare.

Nonostante la popolazione mondiale sia triplicata dagli anni '60, il suolo agricolo utilizzato è rimasto quasi costante. Questo è stato possibile grazie all'aumento della produttività per ettaro. Se non fossero state introdotte tecniche genetiche e agronomiche avanzate, sarebbe stato necessario convertire enormi superfici naturali in terreni coltivati, con conseguenze ambientali drammatiche. L'intensificazione sostenibile è dunque risultata più vantaggiosa dell'espansione agricola.

Per migliorare una coltura, esistono diverse tecniche. La selezione artificiale è lenta e dipende dalla variabilità genetica naturale. L'incrocio permette di combinare caratteristiche di piante diverse, ma può introdurre anche tratti indesiderati e richiede tempi molto lunghi e non garantisce spesso i risultati sperati. La mutagenesi indotta (chimica o fisica) accelera il processo ma genera mutazioni casuali. La tecnologia del DNA ricombinante permette invece di introdurre geni specifici in modo mirato. Ogni tecnica ha limiti e vantaggi in termini di precisione, tempo e prevedibilità.

La mutagenesi induce mutazioni nel genoma usando radiazioni ionizzanti (come raggi gamma o raggi X), raggi UV o agenti chimici mutageni. Queste mutazioni sono casuali e generano alterazioni non prevedibili per numero ed entità e devono essere selezionate tra migliaia fino a trovare varietà utili. Dal momento che è estremamente complesso individuare ogni singolo cambiamento avvenuto all'interno del DNA di un organismo, in seguito all'utilizzo di questo tipo di tecnica, la scelta su quale pianta tenere e quale scartare, veniva e viene fatta unicamente sulla base dei risultati fenotipi e degli aspetti agronomici a cui si è interessati. Nonostante la sua imprevedibilità, la mutagenesi indotta è stata ed è tuttora molto usata perché permette di ottenere nuove varietà ad un ritmo molto veloce. Migliaia di varietà oggi coltivate derivano dall'utilizzo di questo metodo.

A partire dagli anni '50, presso il centro ricerche ENEA della Casaccia, vennero realizzati campi sperimentali dove al centro era posta una sorgente radioattiva. Le piante venivano disposte

concentricamente e ricevevano dosi diverse di radiazioni: più erano vicine alla sorgente, più mutazioni accumulavano. Le piante figlie venivano poi analizzate per identificare tratti vantaggiosi come maggiore resistenza o resa. Questi esperimenti hanno contribuito allo sviluppo di varietà importanti, tra cui il grano “Creso” che viene ancora oggi utilizzato, nelle sue varianti più moderne e re-ibridizzate, per la produzione di pane e pasta. Dagli anni '50 la mutagenesi indotta ha portato alla creazione di oltre 3000 varietà di piante oggi registrate a livello mondiale. Queste varietà includono cereali, frutta, legumi e persino piante ornamentali. La mutagenesi ha permesso innovazioni rapide e ha contribuito enormemente al miglioramento genetico delle colture, spesso senza che i consumatori ne fossero consapevoli. A tale riguardo, proprio la vicenda del grano “Creso” merita di essere esaminata. Nonostante la mutagenesi sia una tecnica diffusa e sicura, la percezione pubblica è stata influenzata da rappresentazioni mediatiche sensazionalistiche. Un servizio mandato in onda nel Maggio del 2001 (quindi circa 50 anni dopo l'inizio di tali sperimentazioni) da Striscia la Notizia, ha avuto eco su diversi giornali nazionali che tuttavia, non hanno trattato il tema, come sarebbe stato giusto fare con rigore e metodologia ma con allarmi su “spaghetti radioattivi” e descrivendo “scenari apocalittici”.

Quello che è accaduto per il grano, per il mais o per il riso, è accaduto anche per molte altre piante. Molte di queste sono così diverse dai loro parentali selvatici, che non li riconosceremmo in un confronto all'Americana. Non solo, molte di queste sono così lontane dalle piante di origine, che non sarebbero in grado di sopravvivere in natura senza la cura da parte dell'uomo. Molte di loro hanno bassa o nulla fitness riproduttiva, hanno depotenziati molti dei meccanismi di difesa contro patogeni o cambiamenti climatici o avversità climatiche. Molte di loro sono ibridi di prima generazione che le aziende agricole comprano direttamente dalle aziende produttrici sottoforma di piantine (e non di semi), per i vantaggi produttivi e di vigoria dell'ibrido, che questi ibridi danno rispetto ai parentali di provenienza. La segregazione dei caratteri rende non conveniente l'uso di questi ibridi in seconda o terza generazione.

L'aumento della produzione agricola ha permesso a milioni di persone di spostarsi dalle campagne alle città. Ciò ha favorito la nascita di nuovi settori economici, l'industrializzazione e lo sviluppo di servizi, modificando profondamente l'assetto socio-economico globale. Tuttavia, ha comportato anche nuove sfide: gestione delle risorse, inquinamento urbano, migrazioni interne e necessità di garantire cibo sufficiente per popolazioni sempre più concentrate in aree metropolitane. Il passaggio a un'agricoltura altamente produttiva ha avuto effetti su emissioni, consumo di risorse, biodiversità e qualità del suolo. Tuttavia, allo stesso tempo, ha permesso una maggiore disponibilità di cibo più vario e nutriente rispetto alle epoche precedenti. La produzione intensiva ha contribuito all'aumento

delle emissioni di gas serra, ma ha anche ridotto la pressione sulla conversione di habitat naturali in terreni agricoli. Questo equilibrio tra benefici e costi ambientali è uno dei punti centrali del dibattito agroecologico. Diversi studi hanno analizzato cosa sarebbe successo se, invece del modello intensivo post-Rivoluzione Verde, il mondo avesse mantenuto un'agricoltura estensiva. I risultati mostrano che la quantità di gas serra sarebbe stata molto più elevata a causa dell'enorme quantità di terreno aggiuntivo necessaria a produrre la stessa quantità di cibo. Una resa minore avrebbe richiesto la conversione di foreste, savane e praterie in campi agricoli, con conseguenze drammatiche sulla biodiversità, sugli ecosistemi e sul clima.

Dalle tecniche casuali alle tecniche moderne

Il miglioramento genetico è passato da metodi casuali, come incrocio e mutagenesi, a tecnologie altamente mirate come il DNA ricombinante e il genome editing. Con il DNA ricombinante, è possibile inserire nel genoma uno o più geni specifici provenienti da organismi anche molto diversi. Questo permette di conferire alle piante caratteristiche mirate e studiate a priori, come resistenza a parassiti, tolleranza alla siccità o aumento del valore nutrizionale.

Il processo di creazione di un OGM si può riassumere in alcuni passaggi principali:

1. **Individuazione del gene di interesse.** Gli scienziati identificano un gene che conferisce una proprietà desiderata, ad esempio resistenza a un parassita o produzione di una vitamina. Questo gene può provenire da un'altra pianta, da un batterio o persino da un altro organismo.
2. **Isolamento e copia del gene.** Il gene selezionato viene isolato dal DNA dell'organismo originale e copiato in laboratorio, così da poterlo utilizzare nelle fasi successive.
3. **Inserimento del gene nel DNA della pianta o animale bersaglio.** Il gene viene introdotto nelle cellule dell'organismo che si vuole modificare. Esistono diverse tecniche, ad esempio:
 - **Agrobacterium tumefaciens**, un batterio che trasferisce naturalmente il gene alle piante;
 - **Biolistica**, in cui piccole particelle rivestite di DNA vengono "sparate" nelle cellule;
 - **CRISPR/Cas9**, una tecnica più recente che permette di modificare il DNA in punti molto precisi.
4. **Selezione delle cellule modificate.** Non tutte le cellule ricevono il nuovo gene. Per questo si coltivano le cellule in condizioni che permettono di selezionare solo quelle che hanno incorporato correttamente il gene desiderato.
5. **Rigenerazione dell'organismo completo.** Le cellule selezionate vengono fatte crescere fino a formare una pianta o un animale completo, che possiede il nuovo gene in tutte le sue cellule.

6. **Test e verifica.** L'OGM viene studiato per assicurarsi che la modifica sia stabile e che produca effettivamente la caratteristica desiderata senza effetti indesiderati.

Comunicazione sugli OGM e limiti della definizione

L'informazione sugli OGM è spesso stata imprecisa o fuorviante. Dal punto di vista scientifico, limitare il termine OGM solo a organismi prodotti con DNA ricombinante è parziale: qualunque intervento (naturale o tecnico) che modifichi il genoma produce un organismo diverso dal progenitore. Mutazioni naturali, incroci, poliploidie spontanee e mutagenesi indotta modificano il patrimonio genetico così come le tecniche di ingegneria genetica. La categoria "OGM", così come la percepiamo, è dunque un costrutto più normativo che biologico. In questo contesto, le immagini diffuse sul web, così come articoli di giornale, talk-show televisivi, rappresentano spesso gli OGM in modo caricaturale: pomodori con embrioni all'interno, pannocchie "a forma di bomba" o animali fusi con frutti. Queste rappresentazioni non spiegano cosa sia realmente un OGM e alimentano paure infondate. L'uso del termine "Frankenfood" contribuisce alla demonizzazione di queste tecnologie. È invece importante distinguere tra comunicazione emotiva e valutazione scientifica, basata su dati, analisi molecolari e valutazione del rischio. La "fragola pesce" è uno degli esempi più diffusi di disinformazione sugli OGM. L'idea nasce dal fatto che alcuni ricercatori, in passato, studiarono proteine antigelo provenienti da pesci artici per capire se potessero aumentare la resistenza al freddo delle piante. Tuttavia, nessuna fragola contenente geni "di pesce" è mai stata commercializzata, né si tratta di una pratica comune nel miglioramento genetico. Nonostante questo, in molti casi, si è parlato di questo prodotto come realmente esistente, descrivendolo come un abominio della tecnica. Questo mito dimostra come un'informazione parziale, semplificata e distorta possa trasformarsi in una narrativa di forte impatto emotivo, completamente slegata dalla realtà scientifica. Un altro mito largamente diffuso riguarda i cosiddetti "terminator seeds", semi che non sarebbero in grado di germogliare nelle generazioni successive. Sebbene negli anni '90 fosse stata proposta una tecnologia chiamata GURT (Genetic Use Restriction Technology), essa non è mai stata utilizzata nella pratica agricola né autorizzata. In realtà, la totalità dei semi commercializzati come OGM produce piante fertili. La confusione deriva probabilmente dai contratti di privativa firmati dagli agricoltori che vogliono coltivare prodotti brevettati o dal fatto che molti ibridi F1, non necessariamente OGM, non mantengono i caratteri nelle generazioni successive, inducendo gli agricoltori a riacquistare le sementi o le piantine ogni anno dalle aziende produttrici. Il presunto legame tra suicidi degli agricoltori in India e diffusione del cotone GM Bt è stato ampiamente smentito dalla comunità scientifica e dall'analisi puntuale dei dati. Analisi statistiche mostrano che il tasso di suicidi non è aumentato con l'introduzione delle coltivazioni

OGM e che i fattori reali sono socioeconomici: indebitamento cronico, variazioni dei prezzi, accesso limitato all'acqua e ai mercati. Il cotone Bt ha anzi ridotto l'uso di pesticidi e aumentato la produttività in molte aree. Questo mito è un esempio emblematico di come temi sociali complessi vengano erroneamente attribuiti agli OGM.

Ambiti di applicazione degli OGM e loro diffusione

Gli ambiti applicativi degli OGM non si limitano all'agricoltura. Esistono applicazioni in medicina (produzione di insulina ricombinante, vaccini, terapia genica), nell'industria (enzimi per detersivi, materiali biodegradabili), nella ricerca scientifica (modelli animali transgenici) e nella protezione ambientale (organismi per biorisanamento). Le biotecnologie moderne permettono di progettare organismi che svolgono funzioni specifiche, come monitoraggi ambientali o sintesi di composti ad alto valore aggiunto. L'impatto degli OGM va quindi oltre il settore alimentare ed è centrale in molte tecnologie del XXI secolo.

Le colture OGM più diffuse sono soia, mais, cotone e colza. I principali produttori sono Stati Uniti, Brasile, Argentina e Canada, che coltivano milioni di ettari ogni anno. In Europa, invece, la normativa è molto più restrittiva: solo pochi paesi, in particolare Spagna e Portogallo, coltivano l'unica varietà autorizzata per la semina, il mais MON810 resistente alla piralide. Molti altri paesi europei, pur non coltivando OGM, importano grandi quantità di mangimi ottenuti da colture geneticamente modificate. Basti pensare che dall'Italia, ogni anno, vengono importati circa 3,35 milioni di tonnellate di soia, per la maggior parte GM.

Esempi specifici di prodotti GM

Tutti conoscono il mais il MON810 resistente alla piralide della Monsanto ma ci sono moltissimi altri esempi di prodotti GM che tuttavia sono poco noti al grande pubblico.

Il mais MON810 è una delle varietà OGM più studiate e coltivate al mondo. È stato modificato per esprimere una proteina insetticida derivata da *Bacillus thuringiensis* (Bt), tossica per la piralide del mais ma innocua per l'uomo e gli altri animali. L'obiettivo è ridurre i danni da infestazione e diminuire l'uso di insetticidi chimici. MON810 è anche l'unico OGM autorizzato alla coltivazione nell'Unione Europea, sebbene con forti limitazioni e adottato solo da pochi paesi.

La proteina Bt prodotta dal mais MON810 è una tossina Cry1Ab specifica per alcuni insetti lepidotteri. Quando la larva della piralide si nutre delle foglie o delle spighe, la tossina si attiva nel suo apparato digerente alcalino, perforando le membrane intestinali e causando la morte

dell'insetto. Per l'uomo e i mammiferi, che hanno un ambiente intestinale acido e mancano dei recettori necessari, la proteina risulta innocua. Questo meccanismo mirato consente un controllo biologico integrato molto efficace.

Il MON810 è stato sviluppato negli anni '90 e approvato negli Stati Uniti nel 1996. Numerosi studi hanno mostrato che l'adozione del mais Bt riduce l'uso di insetticidi e aumenta la resa, soprattutto nei contesti dove la piralide è un problema grave. In Europa, la sua valutazione da parte dell'EFSA ne ha confermato la sicurezza ambientale e alimentare, ma la normativa comunitaria lascia agli Stati membri la possibilità di vietarne la coltivazione. Ciò ha portato a una frammentazione delle politiche nazionali.

L'uso del MON810 comporta una minore incidenza di danni alle spighe, che a loro volta sono meno soggette a infezioni fungine come quelle da *Fusarium*. Questo può ridurre la produzione di micotossine pericolose per la salute. Inoltre, la pianta mantiene le stesse caratteristiche agronomiche di un mais convenzionale, eccetto l'espressione della proteina Bt. Tuttavia, come per tutte le tecnologie Bt, il rischio di comparsa di resistenze negli insetti richiede strategie di gestione (es. zone rifugio).

Sebbene sicuro e ampiamente utilizzato fuori dall'Europa, il MON810 è al centro di controversie politiche. Molti governi europei hanno preferito applicare la clausola di salvaguardia che consente di vietarne la coltivazione, nonostante il parere favorevole dell'EFSA. Questo evidenzia la distanza tra valutazione scientifica del rischio e percezione sociale. Il caso MON810 è emblematico del rapporto difficile tra UE e biotecnologie agricole.

Da un punto di vista scientifico, il MON810 rappresenta un esempio molto chiaro di ingegneria genetica finalizzata alla protezione delle colture. È stato studiato in centinaia di pubblicazioni peer-reviewed e sottoposto ai più rigidi protocolli di sicurezza. I benefici agronomici sono ben documentati, così come la stabilità dell'insero genetico e la prevedibilità della sua espressione. L'insero genetico che codifica per la tossina Cry1Ab è stato sequenziato, caratterizzato e valutato per stabilità su più generazioni. Le analisi hanno confermato che l'espressione del gene Bt è costante e non influisce negativamente sui parametri agronomici della pianta. Studi di lungo periodo hanno dimostrato che l'impatto sugli insetti non bersaglio è minimo, poiché la tossina Bt ha specificità molto elevata. Inoltre, sono state valutate possibili interazioni con microrganismi del suolo, pollini e altri elementi dell'ecosistema, senza riscontrare effetti ecologici significativi. Le autorità di regolamentazione hanno richiesto numerosi aggiornamenti, studi aggiuntivi e monitoraggi post-commercializzazione. Questo dimostra che l'approccio europeo al controllo degli OGM è estremamente prudente e strutturato ma la sua storia mostra anche come scienza, politica e percezione pubblica possano interagire in modo complesso e non sempre coerente.

Molto meno nota, la mela resistente alla ticchiolatura, sviluppata in Italia, nei laboratori del Prof. Sansavini.

La ticchiolatura è una malattia fungina che colpisce pesantemente meli e peri, causando danni economici considerevoli. Per controllarla, normalmente sono necessari numerosi trattamenti fungicidi. Le ricerche del gruppo del Prof. Sansavini hanno portato allo sviluppo di meli geneticamente resistenti (cis-genici) grazie all'introduzione di geni di resistenza (ad esempio il gene Vf da *Malus floribunda*). Questa strategia permette di ridurre l'uso di fungicidi, con benefici ambientali e sanitari.

Le piante resistenti possiedono geni che riconoscono il patogeno e attivano rapidamente risposte immunitarie locali, impedendo lo sviluppo del fungo. La resistenza genetica è molto più efficiente e sostenibile rispetto al controllo chimico. Inoltre, il carattere può essere trasferito in diverse varietà commerciali, mantenendone qualità, gusto e produttività. L'introduzione controllata del gene rende questa varietà un esempio di OGM finalizzato alla riduzione dell'impatto ambientale.

La ricerca su questa pianta iniziò con incroci tradizionali, ma la resistenza derivante da *Malus floribunda* era difficile da trasferire senza introdurre anche tratti indesiderati. La tecnologia del DNA ricombinante ha permesso di inserire solo il gene di resistenza desiderato, abbreviando drasticamente i tempi e aumentando la precisione. Sebbene scientificamente valida, questa varietà ha incontrato ostacoli normativi ed è stata usata principalmente in prove sperimentali. Resta però un esempio eccellente di innovazione non commerciale ma ad alto valore agronomico.

Un esempio di OGM caratterizzato da un elevato impatto sociale, è certamente il Golden Rice (riso dorato), riso geneticamente modificato per produrre β -carotene, precursore della vitamina A, nella parte edibile della cariosside. L'obiettivo originale di questo OGM era quello di combattere la carenza di vitamina A, responsabile di cecità infantile e alti tassi di mortalità nei paesi in via di sviluppo. L'idea alla base del Golden Rice era di utilizzare una coltura già ampiamente consumata e integrarla con un micronutriente fondamentale.

Il Golden Rice rappresenta uno degli esempi più celebri di biofortificazione tramite ingegneria genetica. La via metabolica del β -carotene normalmente non è attiva nell'endosperma del riso; grazie all'introduzione dei geni *psy* (phytoene synthase) e *crtI* (phytoene desaturase), l'endosperma acquisisce la capacità di sintetizzare carotenoidi. Questo intervento non altera le altre caratteristiche agronomiche della pianta, ma aggiunge una funzione nutrizionale specifica. L'approccio è considerato un paradigma per future colture biofortificate.

Le valutazioni scientifiche mostrano che il Golden Rice può fornire quantità significative di vitamina A con il consumo giornaliero normale di riso. Gli studi nutrizionali infatti, hanno mostrato che il β -carotene del Golden Rice è biodisponibile e può contribuire in modo efficace alla prevenzione della carenza di vitamina A nei bambini. L'efficienza di conversione dipende dalla dieta e dalla presenza di lipidi, che favoriscono l'assorbimento. Le analisi di sicurezza hanno confermato l'equivalenza sostanziale della pianta rispetto al riso convenzionale, eccetto la presenza del carotenoide. Nonostante il forte potenziale, la sua diffusione è stata rallentata da questioni normative e politiche più che scientifiche e continua a essere uno dei casi più discussi nel rapporto tra innovazione e accettazione pubblica.

La diffusione del Golden Rice infatti è stata rallentata da regolamentazioni complesse, valutazioni d'impatto, opposizioni politiche e campagne ideologiche. Sebbene gli organismi di sicurezza alimentare abbiano confermato l'assenza di rischi significativi, la sua introduzione commerciale ha incontrato ostacoli soprattutto in Asia. Solo in anni recenti alcuni paesi hanno iniziato ad autorizzarne la coltivazione su scala limitata.

Ultima cosa che è bene ricordare: il Golden Rice è stato progettato come bene pubblico. I brevetti relativi ai geni inseriti sono stati concessi gratuitamente per utilizzo umanitario. A differenza di molte colture OGM sviluppate da grandi aziende, il Golden Rice è frutto di collaborazione tra istituti pubblici e organizzazioni non-profit. La riduzione della carenza di vitamina A potrebbe avere un impatto sanitario enorme, soprattutto in contesti con accesso limitato a integratori e a una dieta diversificata.

Il mais aflatoxin-free nasce per risolvere un problema agricolo e sanitario importante: la contaminazione da aflatossine prodotte da funghi come *Aspergillus flavus*. Le aflatossine sono tra le micotossine più pericolose al mondo, con effetti cancerogeni e mutageni. In alcune regioni, soprattutto nei contesti più caldi e secchi, la contaminazione è molto difficile da controllare. L'idea alla base del mais OGM aflatoxin-free è quella di introdurre geni che rendano la pianta resistente alla colonizzazione fungina o che interferiscano con la sintesi della tossina.

Le strategie biotecnologiche utilizzate per ridurre la produzione di aflatossine includono l'espressione di proteine antifungine, RNA interferenti (RNAi) contro geni chiave del fungo o modificazioni che rendono il tessuto vegetale meno ospitale per la crescita di *Aspergillus*. Il mais così ottenuto mostra livelli drasticamente ridotti o addirittura assenti di contaminazione fungina, con importanti benefici per la sicurezza alimentare e la qualità dei mangimi. Tale approccio permette anche di evitare perdite economiche ingenti per gli agricoltori.

Il mais aflatoxin-free rappresenta una delle applicazioni più promettenti delle biotecnologie moderne, specialmente in un contesto di cambiamento climatico che aumenta la frequenza di condizioni adatte allo sviluppo di muffe tossigene. Nonostante le evidenze scientifiche positive, la sua commercializzazione è molto limitata, principalmente per ostacoli regolatori e socio-politici. La tecnologia, tuttavia, rimane un esempio eccellente di come l'ingegneria genetica possa risolvere problemi non gestibili con le tecniche convenzionali.

Il pomodoro nutraceutico, in grado di produrre antocianine non solo nella buccia ma anche nella polpa del frutto, è un altro esempio di pianta biofortificata, capace di produrre molecole antiossidanti benefiche per la salute. L'obiettivo delle piante nutraceutiche non è solo migliorare le caratteristiche agronomiche, ma arricchire il profilo nutrizionale degli alimenti. In alcuni progetti di ricerca, l'inserimento di geni coinvolti nella via biosintetica dei flavonoidi ha permesso di ottenere pomodori dal colore viola intenso, ricchi di antociani con proprietà antinfiammatorie.

Gli antociani introdotti sono molecole tipiche di bacche come mirtilli e more. La loro presenza nei pomodori è ottenuta esprimendo fattori di trascrizione regolatori che attivano l'intera cascata biosintetica. Gli studi su modelli animali hanno mostrato effetti protettivi contro stress ossidativo e alcune forme tumorali. Dal punto di vista agronomico, questi pomodori mantengono resa e caratteristiche organolettiche simili alle varietà tradizionali, ma introducono un significativo valore aggiunto sanitario.

Lo sviluppo del pomodoro nutraceutico nasce dalla volontà di combinare alimentazione e prevenzione. È stato creato da gruppi di ricerca pubblici, con un forte interesse biomedico. La sua storia mostra come le biotecnologie possano operare non solo per aumentare la resa o la resistenza delle colture, ma anche per migliorarne il valore funzionale. Nonostante il forte potenziale, le normative europee ne hanno limitato l'applicazione commerciale, rendendolo un caso di studio più che un prodotto diffuso.

Durante la frittura o la cottura ad alte temperature, alcuni alimenti ricchi di amido, come le patate, possono produrre acrilammide, una sostanza potenzialmente cancerogena. La patata a basso contenuto di acrilammide è stata modificata per ridurre la formazione di precursori come l'asparagina libera. Tramite tecniche come RNA interference (RNAi), è possibile abbattere l'espressione dei geni responsabili dell'accumulo di asparagina nei tuberi. Il risultato è una patata che, una volta cotta, produce quantità nettamente inferiori di acrilammide.

L'RNA interference (RNAi) viene utilizzata per silenziare parzialmente o totalmente il gene asparagina sintetasi, responsabile dell'accumulo dell'amminoacido asparagina. Poiché

l'acrilammide si forma principalmente dalla reazione tra asparagina e zuccheri riducenti durante la cottura ad alte temperature (reazione di Maillard), diminuire la quantità di asparagina nel tubero riduce drasticamente la formazione di acrilammide. Le valutazioni mostrano che queste patate mantengono qualità gustative e resa agronomica comparabili alle varietà convenzionali.

Lo sviluppo di questa patata ha richiesto studi approfonditi sul metabolismo degli amminoacidi e sulle vie biochimiche che portano alla sintesi dei precursori dell'acrilammide e rappresenta un esempio concreto di come il genome engineering possa migliorare la sicurezza degli alimenti, non solo la loro produttività.

Cenni su regolamentazione degli OGM in Europa e transizione alle NBT

Gli organismi ottenuti tramite DNA ricombinante sono sottoposti a una normativa estremamente rigida, basata sul principio della precauzione. Tuttavia, mentre la legislazione resta ancorata alle tecniche tradizionali, la scienza ha sviluppato nuove metodologie molto più precise, note come NBT (New Breeding Techniques) o tecniche di genome editing. Le NBT riducono drasticamente il rischio di inserzioni casuali e permettono modifiche puntuali al DNA, alcune delle quali indistinguibili da mutazioni naturali. **La distanza tra innovazione scientifica e aggiornamenti normativi è oggi una delle principali sfide del settore.**

A differenza del DNA ricombinante, che introduce spesso materiale genetico esterno, il genome editing utilizza sistemi enzimatici che modificano il DNA direttamente nel punto desiderato. Il metodo più noto è **CRISPR-Cas9**, che funziona come una “forbice molecolare” che taglia il DNA in un punto specifico, guidata da un RNA leader (sgRNA) che guida l'enzima fino alla sequenza bersaglio. Una volta che la rottura del DNA è avvenuta, la cellula la ripara tramite meccanismi che possono introdurre mutazioni mirate o sostituire una sequenza con una nuova (HDR). Questo tipo di editing consente di modificare “lettere” del DNA con un livello di precisione impensabile solo venti anni fa.

Il genome editing comprende diverse varianti oltre a CRISPR-Cas9:

- **TALEN (Transcription Activator-Like Effector Nucleases)**, basato su proteine progettate per riconoscere sequenze specifiche;
- **ZFNs (Zinc Finger Nucleases)**, pionieri dell'ingegneria genomica, meno usati oggi per la complessità di progettazione;
- **Base editing**, che permette di trasformare una singola base del DNA senza creare rotture a doppio filamento;

- **Prime editing**, definito “word processor del DNA”, capace di inserire o correggere sequenze con grande accuratezza.

Queste tecniche permettono di intervenire su geni esistenti, senza necessariamente introdurre materiale genetico esterno. In molti casi, il risultato finale è indistinguibile da una mutazione spontanea, un fattore cruciale da tenere in considerazione per la revisione della normativa; fattore, che pone l’accento sull’importanza e la necessità che le normative procedano di pari passo con l’evoluzione tecnologica e con la comunicazione scientifica per garantire un uso consapevole e ben compreso delle innovazioni.