

Piante per mondi lontani: biotecnologie per l'agricoltura extraterrestre

Nelle missioni verso Luna e Marte, le piante saranno fondamentali per produrre ossigeno, cibo e riciclare le risorse. Grazie all'agricoltura in ambiente controllato e all'uso di illuminazione LED, sarà possibile coltivare anche nello spazio in modo efficiente, mentre le biotecnologie aiuteranno a ottenere piante più resistenti alle condizioni estreme.

DOI 10.12910/EAI2025-081

di Silvia Massa, Luca Nardi, Elisabetta Bennici, Dipartimento Sostenibilità Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi Territoriali – Divisione Sistemi Agroalimentari Sostenibili, Laboratorio Agricoltura 4.0 – ENEA

I potenziale delle biotecnologie vegetali nello spazio

L'ingegneria genetica e le Tecniche di Evoluzione Assistita offrono strumenti fondamentali nel contesto agospaziale, consentendo modifiche mirate del genoma per ottimizzare la resa, la resilienza e la produttività delle piante e ottenerne la biofortificazione. Da un lato, le tecniche di editing del genoma, come CRISPR/Cas9 e varianti permettono la modificazione precisa di locus genici coinvolti in vie metaboliche chiave (ad esempio flavonoidi, carotenoidi, antiossidanti) o nei meccanismi di riparazione del DNA e difesa contro lo stress ossidativo (Chen et al., 2019). Utilizzando le TEA, è possibile accumulare in un'unica pianta più tratti agronomici o funzionali di interesse per l'agospazio che sarebbero difficilmente ottenibili con la sola selezione tradizionale. Questo aspetto, noto agli addetti al mestiere, è sottolineato con grande lungimiranza anche nel white paper della NASA *"Elevating the Use of Genetic Engineering to Support Sustainable Plant Agriculture for Human Space Exploration - A Topical White Paper for Submission to the*

Biological and Physical Sciences in Space Decadal Survey 2023-2032".

Ma le biotecnologie vegetali non si limitano alla semplice produzione di biomassa: includono il potenziale del *"molecular farming"*. Piante che sintetizzano farmaci, antiossidanti o composti nutraceutici destinati all'equipaggio spaziale saranno fondamentali per garantire l'autosufficienza nelle missioni di lunga durata. In missioni in cui lo spazio, le risorse di supporto vitale e i rifornimenti sono limitate, la capacità di progettare piante multi funzione è strategica.

La sfida del pomodoro spaziale

Tra i composti più promettenti alla base della biofortificazione delle piante di interesse per l'agospazio, spiccano le antocianine, pigmenti naturali appartenenti alla famiglia dei flavonoidi, responsabili delle colorazioni rosse, blu e viola di molti frutti e fiori. Oltre a conferire il colore, svolgono un ruolo fondamentale nella protezione delle cellule vegetali dagli stress ambientali, agendo come antiossidanti naturali e modulando i meccanismi di risposta a luce UV, freddo, siccità e radiazioni.

Il pomodoro (*Solanum lycopersicum* L.), alimento cardine della dieta umana, rappresenta un candidato ideale per le coltivazioni nello spazio. In particolare, le cultivar a crescita determinata come il MicroTom, inizialmente create a scopo ornamentale, grazie alla taglia ridotta (circa 15 cm di altezza), all'efficienza produttiva e al ciclo vitale relativamente breve (90-100 giorni), rappresentano candidati ideali per l'agospazio e costituiscono sistemi ottimali per test in condizioni controllate e per esperimenti di biologia spaziale.

Tuttavia, i frutti di pomodoro "domestico" non accumulano naturalmente antocianine. Per superare questa limitazione, ENEA ha utilizzato approcci di ingegneria genetica, introducendo nel genoma del pomodoro il gene *PhAN4* di *Petunia hybrida*, un fattore di trascrizione MYB noto per la sua capacità di attivare la biosintesi delle antocianine (Pagliarello et al, 2023 a; Figura 1). Grazie alla collaborazione con il Dipartimento NUC e, dunque, alla possibilità di utilizzare la facility di test ASIF (*ASI Supported Irradiation Facilities*) 'Calliope', i semi e le piante delle linee ingegner-

rizzate AN4-M e AN4-P2, contenenti una singola copia del gene *PhAN4*, e piante wild type sono stati esposti a dosi di radiazione gamma simulando differenti scenari di coltivazione in condizioni di missione marziana. Le risposte fisiologiche sono state monitorate lungo l'intero ciclo vitale attraverso analisi biometriche e tecniche di fluorescenza multiparametrica, che permettono di valutare in modo non distruttivo lo stato fotosintetico e metabolico (Pagliarello et al, 2023 b). I risultati hanno mostrato che tutte le piante hanno prodotto frutti e semi vitali fino a 5 Gy. Le differenze più marcate si sono osservate nella linea AN4-M, che ha mantenuto stabili i parametri fotosintetici e produttivi, evidenziando al contempo una significativa biosintesi di antocianine. Inoltre, le piante biofortificate hanno mostrato un habitus ulteriormente più compatto rispetto al tipo selvatico – una caratteristica particolarmente vantaggiosa in spazi confinati come moduli abitativi o serre spaziali (Pagliarello et al, 2023 b). A livello molecolare, il gene *PhAN4* ha

dimostrato di poter attivare un rimodellamento del trascrittoma orientato alla risposta positiva verso stimoli ossidativi e abiotici, suggerendo un effetto di “protezione sistemica” indotta (dati in pubblicazione). In altre parole, la biofortificazione genetica non solo aumenta il contenuto di antiossidanti, ma rafforza l'intera fisiologia della pianta, rendendola più resiliente alle radiazioni cosmiche raggiungendo il duplice obiettivo di ottenere colture con una maggiore fitness in ambiente spaziale ed anche un alimento fresco ad alto valore aggiunto per i futuri equipaggi spaziali.

Ricette di luce: strategie per colture resilienti e nutrienti in ambienti extraterrestri e sulla Terra

Negli ultimi anni, l'impiego di “ricette luminose” – ovvero la modulazione di spettro, intensità e fotoperiodo ed infine delle intensità di flusso radiativo – è emerso come strategia chiave per regolare il processo di crescita e sviluppo delle piante e l'accumulo di metaboliti di interesse a vari scopi (Lopez et al. 2017, Figura 3). Per la crescita vegetativa si consiglia uno spet-

tro luminoso con un giusto rapporto tra luce blu e rossa di 2:1 utilizzando ad integrazione luci LED con una lunghezza d'onda di picco di 450 nm per la luce blu e 660 nm per la luce rossa (Lopez et al. 2017). Per la fioritura e la fruttificazione si consiglia uno spettro luminoso con un rapporto tra luce blu e rossa che va da 1:3 ad 1:5 come viene fatto ad esempio in pomodoro. Per le intensità di flusso radiativo, espresse in $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ e misurate con lo spettroradiometro, si consiglia per la fase vegetativa di regolare a seconda del tipo di produzione tra 150 e 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ mentre per la fioritura e fruttificazione ci si orienta su intensità maggiori tra le 300-600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ (vedi tabella 1)(Ouzounis et al 2015; Darko et al. 2014).

Relativamente alla modulazione del metabolismo secondario mediante applicazione di specifiche ricette di luce, lo studio di Garegnani et al. (2024) ha analizzato due cultivar di microgreens di ravanella (*Raphanus sativus*) coltivate idroponicamente sotto tre ricette LED differenti: (L1: 20% rosso/20% verde/60% blu; L2: 40% rosso/20% verde/40% blu; L3: 60% rosso/20% verde/20% blu). Utilizzando una metodologia fluorimetrica non distruttiva, gli autori hanno monitorato in tempo reale l'accumulo di flavonoli, antociani e clorofilla, insieme ai parametri biometrici di crescita. La ricetta L2 ha prodotto un aumento significativo di biomassa e resa rispetto alle altre, mentre l'aggiunta di LED UV o far-red ha potenziato l'accumulo di metaboliti antiossidanti. Questi risultati suggeriscono la possibilità di ottimizzare colture compatte, altamente nutrienti e funzionali per missioni spaziali di lunga durata.

In scenari spaziali, l'integrazione di sensori ottici e sistemi di controllo in tempo reale consentirà di regolare dinamicamente i parametri lumi-

Genotype	Branch and leaves	Flower	Fruit ripening stages	Adult plant	Juvenile stage (7 days after sowing)
MicroTom wild type					
MicroTom PhAN4-M ('Magenta' 1 copy, homozygous)					
MicroTom PhAN4-P2 ('Purple' 1 copy, hemizygous)					

Figura 1 – Fenotipi specifici di MicroTom che esprime *PhAN4* sotto il controllo del promotore *CaMV35S*. Piantine di tipo selvatico, linea omozigote AN4-M e piante emizigoti AN4-P2. Rami, foglie, fiori, frutti (stadi verde immaturo, breaker, breaker +7 giorni e rosso maturo) e relative sezioni trasversali, piante adulte e stadi giovanili.

	Irradianza PPFD (400-800 nm)	Fase di coltivazione	CRI	UV	Blue (400-500 nm)	Verde (500-600 nm)	Rosso (600-700 nm)	Rosso lontano (700-800 nm)
Luce solare diretta	1700 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (100%)	Ve F	100	10%	20%	23%	23%	24%
Luce sotto chioma	60 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V	90	3%	4%	14%	11%	68%
Lamp. Fluor. (15W)	10 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V	70	0	14%	37%	42%	7%
Lamp. Incand. (60W)	40 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V	100	0	3%	14%	30%	53%
Lamp. HPS (400W)	400-600 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V e F	24	0	5%	51%	38%	6%
LED								
Valoya solray	100-600 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V e F	90	2%	19%	36%	40%	3%
Valoya NS1	300-600 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V e F	90	1%	22%	36%	37%	4%
Valoya NS12	300-600 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V e F	90	1%	20%	36%	38%	6%
Valoya AP67	100-300 $\mu\text{moli}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	V	70	0	12%	16%	57%	16%

Tabella 1: Elenco principali ricette di luce realizzate con impianti di illuminazione LED utilizzate per la coltivazione delle piante in ambiente controllato. Sono riportate a confronto la luce solare e quella artificiale di lampade fluorescenti (tipo grolux), ad incandescenza ed ai vapori di sodio (HPS). Sono riportate le diverse condizioni (Spettro ed intensità del flusso radiativo) per cui è consigliata la ricetta di luce nelle diverse fasi vegetativa(V) oppure Fioritura(F)

+ *** Wild type		NT	0.5Gy	5Gy	30Gy
+ ** Altezza (cm)		11.56±0.17	10.89±0.26	11.7±0.59	9.69±0.18
+ * Numero di foglie		27.6±0.92	33±1.3	33.6±1.6	28.6±1.16
/ Superficie fogliare (mm²)		194.65±12.67	229.45±14.1	219.33±14.98	57.05±4.55
- * Numero di fiori		15.4±0.5	16.6±0.24	17.2±0.66	2±0.63
- ** Numero di frutti		16.4±1.02	16.2±0.37	15.4±0.67	/
- *** Peso dei frutti (g)		2.84±0.25	2.54±0.22	2.85±0.23	/
- *** Diametro dei frutti (mm)		17.48±0.68	19.88±1.33	18.6±0.54	/
- *** Numero di semi		17.7±1.03	21.2±0.75	19.7±0.47	/
AN4-M		NT	0.5Gy	5Gy	30Gy
Altezza (cm)		8.5±0.52	9.58±0.13	9.3±0.28	6.54±0.28
Numero di foglie		26±2.12	28±2.75	27±3.47	13±1.22
Superficie fogliare (mm²)		116.98±6.79	114.5±6.11	124.45±7.51	83.76±3.49
Numero di fiori		18±0.83	17.6±0.81	18.4±0.6	3±0.44
Numero di frutti		16.4±0.4	16.4±1.2	16±0.8	/
Peso dei frutti (g)		2.78±0.19	2.51±0.17	2.3±0.15	/
Diametro dei frutti (mm)		16.15±0.57	15.89±0.54	16.24±0.77	/
Numero di semi		21.5±0.63	22.2±0.48	21.7±0.3	/

Figura 2 - Analisi intra-genotipica condotta sulle caratteristiche fenotipiche di MicroTom di tipo selvatico, AN4-M e AN4-P2, sottoposti ai diversi trattamenti di irradiazione applicati alle piante a 30 giorni dopo la semina (DAS). Sono riportati i valori medi ± SE (n = 5).

nosi in risposta allo stato fisiologico della pianta, migliorando resilienza e qualità nutraceutica delle colture. Le “ricette di luce” rappresentano dunque un approccio strategico per l’agrosapazio, capace di aprire la strada a coltivazioni adattive.

Questi studi confermano il potenziale delle biotecnologie come leva strategica per l’esplorazione spaziale sostenibile. L’introduzione mirata di geni regolatori, l’editing puntiforme dei genomi vegetali e la conoscenza dei meccanismi molecolari regolati da stimoli ambientali come la luce possono consentire di progettare piante più capaci di adattarsi a condizioni estreme e, al contempo, produrre alimenti funzionali ad alto valore nutraceutico sulla Terra ed oltre.

per info: silvia.massa@enea.it

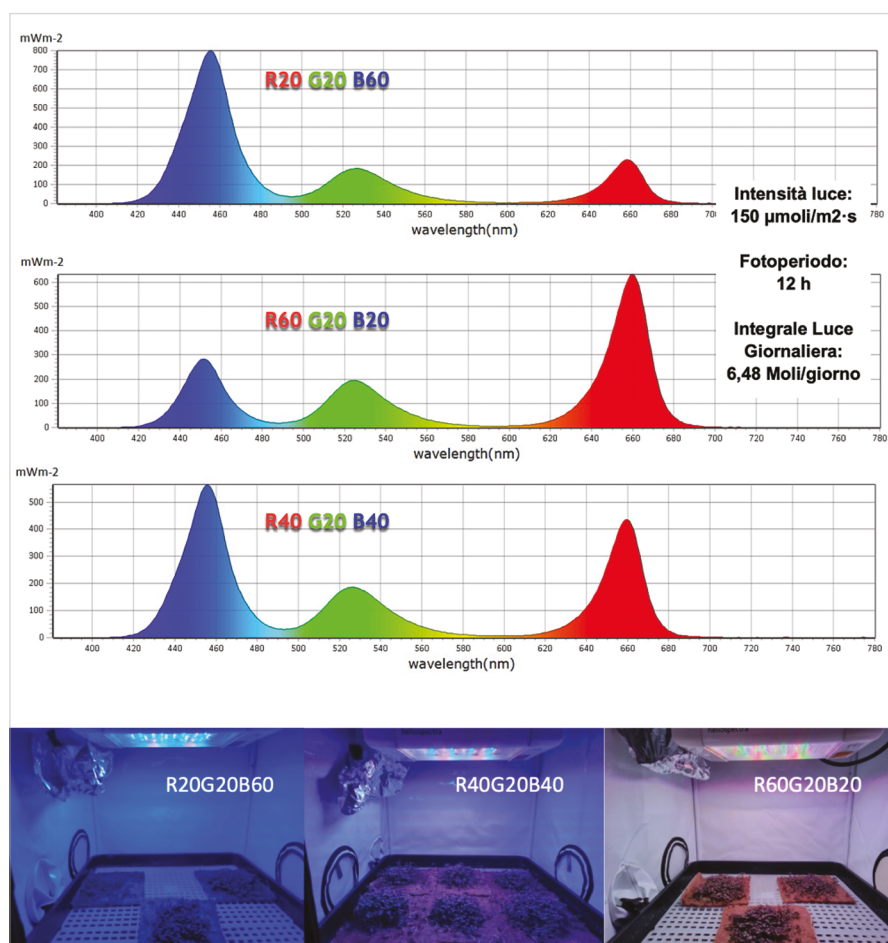


Figura 3 - Esempio di ricette di luce utilizzate durante una sperimentazione su microverdure. Sono riportati i parametri principali delle ricette di luce: Intensità; Durata/Fotoperiodo; Spettro (RGB espresso in valore percentuale) ed integrale di luce giornaliera (Garegnani et al. 2024).

Riferimenti bibliografici

- Chen, K., Wang, Y., Zhang, R., Zhang, H., & Gao, C. (2019). CRISPR/Cas genome editing and precision plant breeding in agriculture. *Annual Review of Plant Biology*, 70, 667–697. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100049>
- Pagliarello, R., Bennici, E., Cemmi, A., Di Sarcina, I., Spelt, C., Nardi, L., Del Fiore, A., De Rossi, P., Paolini, F., Koes, R., Quattrocchio, F., Benvenuto, E., & Massa, S. (2023). Designing a novel tomato ideotype for future cultivation in space manned missions. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, Article 1040633. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1040633>
- Pagliarello, R., Bennici, E., Di Sarcina, I., Villani, M. E., Desiderio, A., Nardi, L., Benvenuto, E., Cemmi, A., & Massa, S. (2023). Effects of gamma radiation on engineered tomato biofortified for space agriculture by morphometry and fluorescence based indices. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1266199. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1266199>
- Akiyama T. e T. Kozai, (2016) «Light Environment in the Cultivation Space of Plant Factory with LEDs», in *LED Lighting for Urban Agriculture*, T. Kozai, K. Fujiwara, e E. S. Runkle, A c. di, Singapore: Springer Singapore, pp. 91–109. doi: 10.1007/978-981-10-1848-0_7.
- Darko E., P. Heydarizadeh, B. Schoefs, e M. R. Sabzalian, (2014) «Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism», *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 369, fasc. 1640, p. 20130243, doi: 10.1098/rstb.2013.0243.
- Garegnani, Marco et al. (2024) "Non-destructive real-time analysis of plant metabolite accumulation in radish microgreens under different LED light recipes." *Frontiers in plant science* vol. 14 1289208., doi:10.3389/fpls.2023.1289208
- Kritsky M. S., (1984) «The blue light responses in evolutionary studies», in *Blue Light Effects in Biological Systems*, Springer, pp. 3–5.
- Lopez R. e E. S. Runkle, (2017) *Light Management in Controlled Environments*. Willoughby: Meister Media Worldwide.,
- Ouzounis, T., Rosenqvist, E., & Ottosen, C. O. (2015). Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: A review. *HortScience*, 50(8), 1128–1135.