A photograph showing an astronaut in a white spacesuit working on the exterior of the ESA Columbus laboratory module in space. The module is dark with various panels and equipment. The Earth's blue and white clouds are visible in the background. The ESA logo is prominent on the side of the module.

Come sarebbe un mondo senza piante? Difficile anche solo immaginare che potrebbe esistere essendo noi umani legati a doppio filo simbiotico con il mondo vegetale. Senza parlare del fatto che le piante hanno colonizzato il nostro pianeta per prime e lo hanno trasformato radicalmente permettendo l'arrivo del mondo animale cui noi apparteniamo. Sono convinto che se noi essere umani continuassimo nell'utilizzo corrente delle risorse del nostro pianeta, faremmo la fine dei dinosauri e forse saranno proprio le piante che, ancora una volta, riporteranno e manterranno la vita animale sulla terra. Portiamole quindi con noi nello Spazio per conoscerle meglio e affinché ci aiutino a sostenere la vita. Chissà, assieme magari riusciremo a trasformare altri pianeti in nuovi mondi abitabili!

Paolo Nespoli

Missione STS-120 (2007)

Missione MagISStra (2010)

Foto: astronauti all'esterno del laboratorio ESA Columbus. Credits: NASA/ESA

Spazio alle Piante

Il ruolo delle piante nello Spazio

"A volte credo che ci sia vita negli altri pianeti, a volte credo di no. In qualsiasi dei due casi la conclusione è sorprendente".

(Carl Sagan)

Qualsiasi ambiente sulla Terra comprende organismi vegetali, dalle alghe alle piante superiori. Queste ultime sono caratterizzate da tre organi fondamentali, diversi per struttura e funzione: radice, fusto e foglie. Nell'ecosistema, le piante sono considerate organismi "produttori" poiché sono capaci di produrre sostanza organica utilizzando il sole come fonte di energia. Grazie al processo di fotosintesi, infatti, le piante catturano l'energia del sole e la utilizzano per formare glucosio a partire da anidride carbonica ed acqua, producendo ossigeno come prodotto di scarto (Fig. 1). E' chiaro quindi che l'esistenza dell'uomo sulla Terra dipende dalla presenza delle piante. Sorge quindi spontanea una domanda: perché le piante non dovrebbero essere necessarie per sostenere la vita dell'uomo anche in ambienti extra-terrestri? Sin dall'inizio dell'esplorazione spaziale, l'uomo ha indagato con esperimenti via via più complessi la possibilità di far crescere le piante nello Spazio, al fine di utilizzarle come "produttori" anche in ecosistemi artificiali. Che i semi siano capaci di germinare nello Spazio e le piante di sopravvivere fino a formare nuovi frutti e semi completando il ciclo da seme a seme (seed-to-seed) è ormai una certezza. Tuttavia, il successo della coltivazione delle piante in ambiente extra-terrestre è ancora fortemente limitato da una serie di ostacoli di tipo biologico e tecnologico. Lo Spazio è infatti un ambiente ostile per la crescita degli organismi che si trovano ad essere sottoposti a due grossi gruppi di fattori ambientali: a) fattori normalmente presenti sulla Terra ma a livelli completamente diversi e per lo più incompatibili con la vita delle piante (per es. la temperatura, la durata dei cicli giorno-notte, la disponibilità di

acqua libera, la composizione atmosferica ed altre variabili presenti ad intensità differenti su altri pianeti o satelliti rispetto alla Terra); b) fattori normalmente non presenti sulla Terra (per es. microgravità e radiazioni ionizzanti).

Le piante attualmente viventi nei vari ecosistemi terrestri sono il risultato di lunghi processi di adattamento ed evoluzione avvenuti sotto la spinta di specifici fattori ambientali che hanno portato alla presente biodiversità. Una qualsiasi variazione del livello di questi fattori o l'introduzione di nuovi fattori ambientali indirizza l'adattamento e l'evoluzione in specifiche direzioni poiché influenza tutti i processi di crescita, dal ciclo cellulare, alla genesi degli organi ed al loro corretto funzionamento.

Foto: serra a bordo della ISS. Credits: NASA/ESA



Gli obiettivi dello studio delle piante nello Spazio possono essere ricondotti a due grandi ambizioni: 1) la realizzazione di sistemi ecologici artificiali, in cui ricreare condizioni ambientali simili a quelle terrestri per favorire la crescita delle piante, al fine di sostenere la vita dell'uomo anche al di fuori dell'ambito terrestre; 2) la comprensione dell'effetto di specifici fattori ambientali spaziali (per es. microgravità e radiazioni) sulla crescita degli organismi vegetali a

livello cellulare, strutturale e fisiologico, anche al fine di comprendere meglio alcuni aspetti dell'evoluzione delle piante sulla Terra. Nei paragrafi che seguono, sono riportate alcune riflessioni su questi due punti per capire il ruolo che le piante hanno nello Spazio, i limiti che è necessario superare per ottimizzarne la crescita e la produzione negli ecosistemi artificiali e come i fattori ambientali spaziali influenzano i principali proces-

si vitali. Infine, sono descritti un'attività ed un esperimento da svolgere nelle scuole, parallelamente alla missione dell'astronauta Samantha Cristoforetti. La prima è finalizzata a sottolineare l'importanza di una buona alimentazione nello Spazio come a Terra, mentre il secondo ha come obiettivo quello di evidenziare come la microgravità influenza la germinazione dei semi e quindi i primi momenti di crescita delle piante.

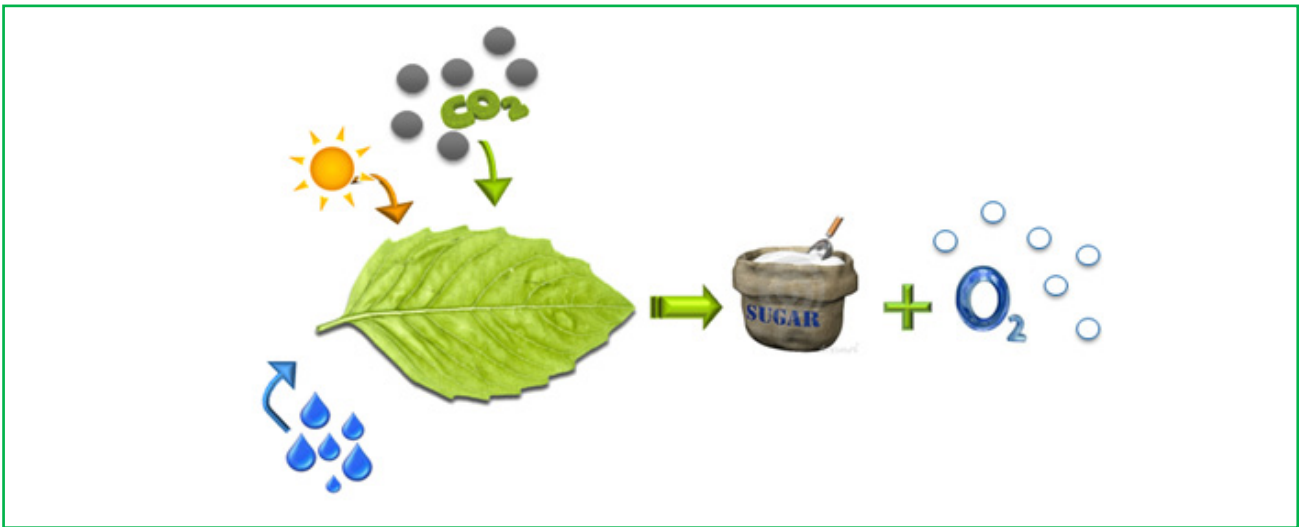


Fig. 1: la fotosintesi è il processo attraverso cui gli organismi autotrofi convertono l'energia luminosa proveniente dal Sole in energia chimica. Durante il processo fotosintetico vengono prodotti zuccheri e ossigeno a partire da acqua e anidride carbonica. Credits: C. Arena, V. De Micco, Università degli studi di Napoli Federico II

Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita

Allo stato attuale, le risorse necessarie per missioni spaziali brevi sono interamente trasportate dalla Terra. Tuttavia, ciò non sarà possibile per missioni di durata maggiore, per motivi di natura tecnica ed economica.

Infatti, con gli attuali sistemi di propulsione, per effettuare un viaggio di andata e ritorno su Marte sono necessari circa 6-8 mesi. Inoltre, poiché Marte e Terra si avvicinano solo una volta all'anno, l'equipaggio deve rimanere nello Spazio per almeno 18 mesi. E' stato stimato che per una missione di un anno, un equipaggio di 3 astronauti necessiterebbe di circa 33 tonnellate tra cibo, acqua ed ossigeno. Pertanto il riforni-

mento sarebbe estremamente costoso e tecnicamente difficile da effettuare.

E' ragionevole ipotizzare quindi che, in un futuro non troppo remoto, l'esplorazione umana dello Spazio debba essere basata principalmente su sistemi che consentono il riciclo continuo delle risorse: i Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (Bioregenerative Life Support System, BLSS) o Sistemi Ecologici Controllati di Supporto alla Vita (Controlled Ecological Life Support Systems, CELSS).

In tale contesto, le piante rappresentano un ottimo strumento per: a) rigenerare l'aria mediante l'assorbimento di CO_2 e l'emissione di O_2 attraverso



il processo fotosintetico; b) purificare l'acqua mediante la traspirazione e c) riciclare parte dei prodotti di scarto dell'equipaggio. Inoltre, esse stesse potrebbero fornire cibo fresco prodotto direttamente a bordo per integrare l'alimentazione dell'equipaggio (Fig. 2).

Diverse componenti biologiche (inclusi i pesci) sono state proposte nei BLSS; tuttavia, allo stato attuale, le piante costituiscono i rigeneratori più studiati e più promettenti per la loro relazione

complementare con l'essere umano: semplificando, infatti, le piante riciclano i rifiuti dell'uomo (CO_2 , feci, urine) e gli forniscono cibo, mentre l'uomo ricicla i rifiuti vegetali (O_2) e fornisce acqua e nutrienti alle piante. È stato dimostrato, inoltre, che le piante, contribuendo a creare un ambiente simile a quello terrestre, mitigano lo stress psicologico derivante dalla missione e dalle condizioni di isolamento che ne conseguono.

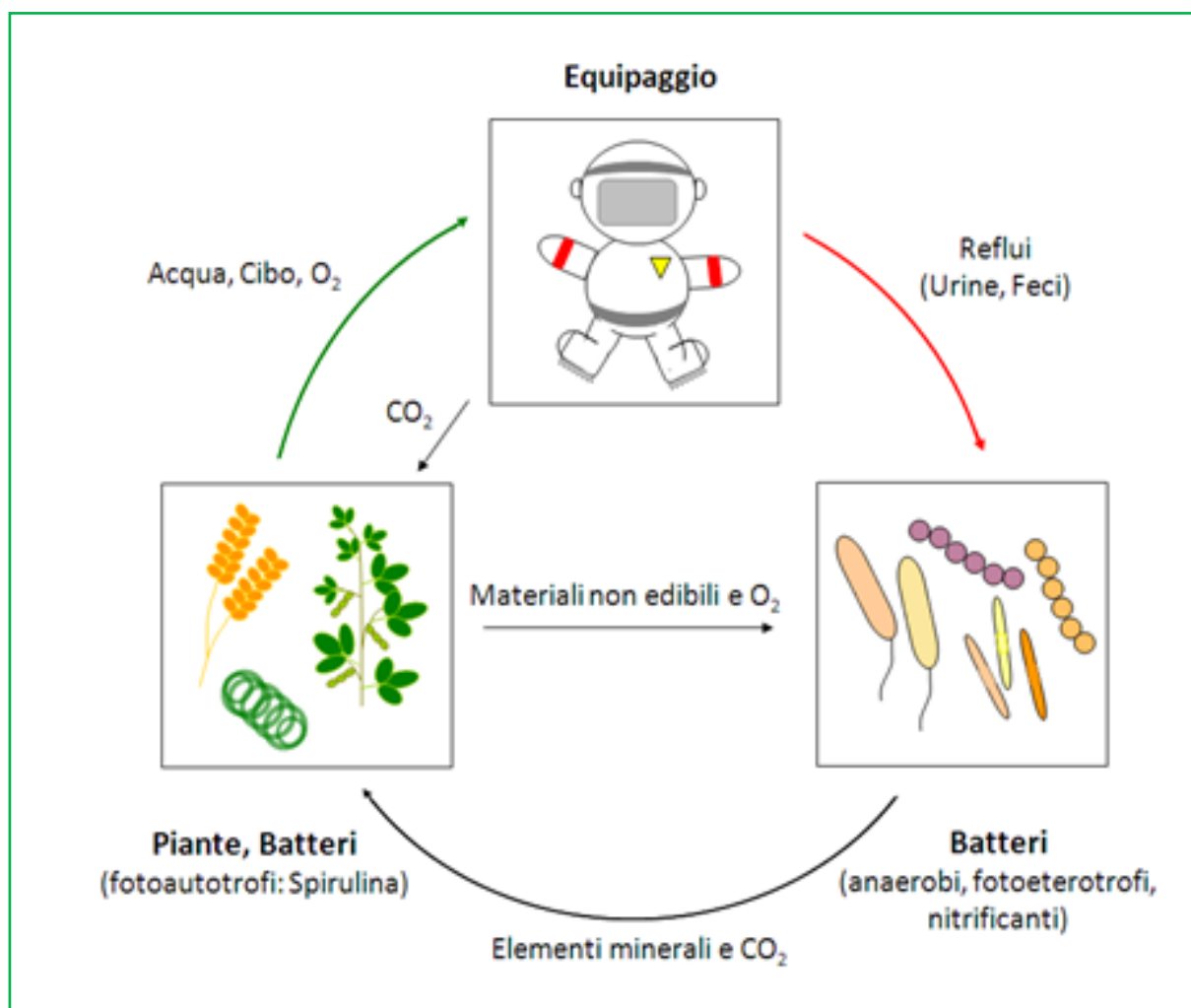


Fig. 2: schema semplificato di un Sistema Biorigenerativo di Supporto alla Vita - BLSS. Credits: Disegno di R. Buonomo, Università degli studi di Napoli Federico II

Le camere di crescita per gli esperimenti sulla Terra ed il controllo ambientale

Affinché le piante possano produrre ossigeno, biomassa edibile (commestibile) e riciclare prodotti di scarto, utilizzando la luce come fonte di energia per la fotosintesi, è necessario che siano allevate in opportune condizioni climatiche e colturali. Per questo motivo, negli esperimenti sulla Terra finalizzati alla progettazione di BLSS, la creazione di camere di crescita equipaggiate per il controllo preciso di tali parametri è di fondamentale importanza. I livelli di intensità luminosa, la concentrazione di CO₂, la temperatura e l'umidità relativa devono essere finemente regolati in modo da definire le modalità di coltivazione in grado di ottimizzare la crescita e la produttività delle colture. La maggior parte degli studi rivolti alla realizzazione di BLSS sono condotti in sistemi di coltivazione sofisticati comunemente indicati come "senza suolo" o "fuori suolo" o "idroponici", poiché le piante sono allevate in assenza di suolo che è sostituito da substrati diversi o da soluzioni acquose contenenti i necessari elementi nutritivi (Fig. 3). Tra i diversi sistemi esistenti, la Nutrient Film

Technique (NFT) è tra i più diffusi nella ricerca spaziale (Fig. 4).

Con il sistema NFT, le piante sono sospese in canaline leggermente inclinate, in cui la soluzione nutritiva scorre per gravità bagnando le radici e può essere raccolta e riutilizzata (ciclo chiuso), dopo opportune correzioni del volume e del contenuto di nutrienti, alterati per effetto dell'assorbimento da parte delle radici.

Quando è gestita correttamente, la coltivazione idroponica consente un apporto ottimale di acqua e nutrienti alle piante ed una buona ossigenazione delle radici. Di contro, tuttavia, il sistema richiede un continuo monitoraggio della soluzione nutritiva ricircolante e comporta rischi per eventuali imprevisti malfunzionamenti dell'impianto. Inoltre, dal punto di vista microbiologico, gli organismi fitopatogeni possono facilmente diffondersi nell'ambiente radicale, anche a causa dell'assenza di una microflora antagonista generalmente presente nel suolo, imponendo il ricorso a piante o semi sani e a procedure di disinfezione sicure.



Fig. 3: Piantine di soia allevate in coltura idroponica, nelle prime fasi di sviluppo. Credits: R. Paradiso, S. De Pascale, Università degli studi di Napoli Federico II

Numerosi esperimenti sono condotti da ricercatori di tutto il mondo con l'obiettivo di definire condizioni ambientali e protocolli di coltivazione idroponica ottimali. Questi devono essere in grado di ottenere una rapida crescita delle piante e rese produttive soddisfacenti, minimizzando gli scarti non commestibili e massimizzando la produzione di O₂ ed acqua potabile, nelle colture identifica-

te come possibili candidate per BLSS. In parallelo, scopo della caratterizzazione del comportamento delle piante in determinati ambienti è prevedere i tempi e le dinamiche di produzione di cibo, acqua ed ossigeno, i necessari input (energia, acqua, nutrienti, gas) e i conseguenti output (CO₂ dalla traspirazione delle piante, scarti) del sistema bioregenerativo.



Fig. 4: sistema NFT per la coltivazione idroponica di soia e particolare della pianta nella fase di formazione dei baccelli. Credits: R. Buonomo, Università degli studi di Napoli Federico II

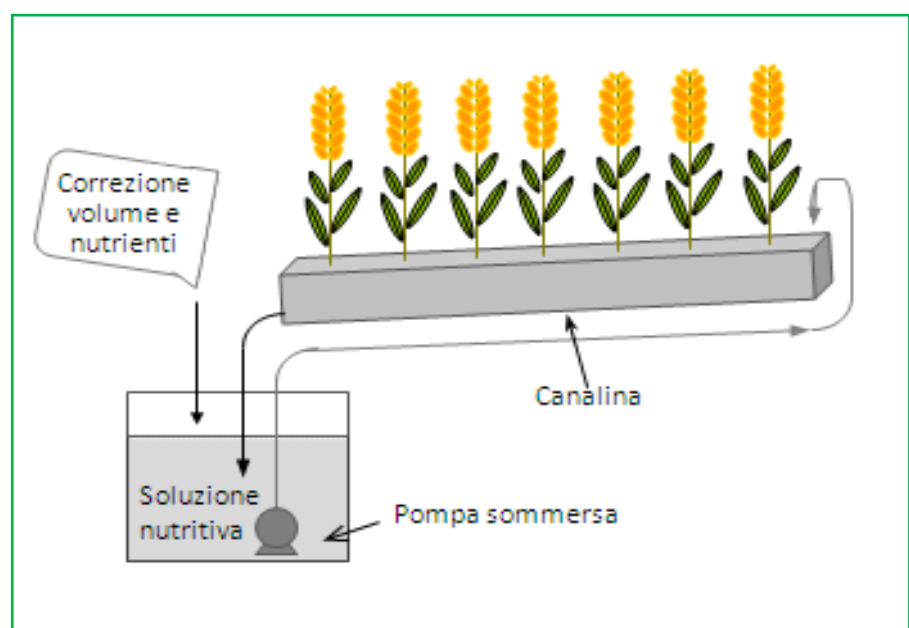


Foto: schema semplificato di un sistema di coltivazione idroponica NFT – Nutrient film technique. Credits: R. Paradiso, S. De Pascale, Università degli studi di Napoli Federico II

La scelta della specie

L'obiettivo di realizzare in un BLSS una produzione di cibo costante, in termini di quantità e qualità, può essere raggiunto solo attraverso la scelta delle specie vegetali e, nell'ambito di queste, delle varietà coltivate (cultivars, cvs) più idonee alle particolari condizioni di coltivazione. A tale scopo, nella selezione delle colture, devono essere considerati numerosi aspetti tecnici e nutrizionali. Le limitazioni tecniche sono strettamente legate alle condizioni, tipiche dei veicoli e delle piattaforme spaziali, di ridotta disponibilità di tempo, volume ed energia, ed alla necessità di sicurezza igienico-sanitaria. A tale riguardo, vengono preferite colture caratterizzate da ciclo colturale breve, taglia ridotta, resistenza a malattie ed alta produttività

(anche intesa come rapporto biomassa edibile/residui non edibili). Inoltre, il contenuto dei vari nutrienti nelle parti edibili, noto per la coltura nella coltivazione in suolo in pieno campo, deve essere confermato testando l'adattabilità di questa all'ambiente controllato ed alla coltivazione idroponica.

I requisiti nutrizionali consistono nell'attitudine dei diversi prodotti vegetali a soddisfare i fabbisogni alimentari dell'equipaggio. In generale, nei programmi di ricerca spaziale sono state selezionate colture che forniscono alimenti con elevato contenuto energetico e/o proteico e/o di antiossidanti (es. grano tenero e grano duro, patata, soia, pomodoro).

Principali fattori ambientali "spaziali" che influenzano la vita delle piante

Radiazioni ionizzanti e microgravità sono certamente "fattori ambientali spaziali" che influenzano la crescita delle piante. La maggior parte delle informazioni disponibili derivano da esperimenti svolti o a bordo delle piattaforme spaziali dove, di fatto, i due fattori agiscono insieme, oppure sulla Terra dove si analizzano gli effetti di elevati livelli di un tipo di radiazione o si altera il vettore gravitazionale con l'uso di centrifughe o clinostati (apparecchi che per annullare l'azione unidirezionale della forza di gravità sull'organismo lo fanno ruotare continuamente). I principali fattori ambientali spaziali possono essere percepiti come fonte di stress dalle piante e innescare alterazioni nella struttura e nella funzionalità dei diversi organi. Queste modifiche, anche quando non sono tali da mettere a rischio la sopravvivenza degli individui, potrebbero comunque determinare riduzioni della produttività e variazioni della qualità degli organi da utilizzare come cibo fresco a bordo delle stazioni spaziali. Capire l'ef-

fetto dei fattori spaziali sulla crescita delle piante diventa quindi importante non solo dal punto di vista scientifico per meglio comprendere alcuni processi di sviluppo (utilizzando quindi lo Spazio come uno speciale laboratorio), ma anche dal punto di vista pratico al fine di valutare le possibili conseguenze dal punto di vista nutrizionale ed infine economico.

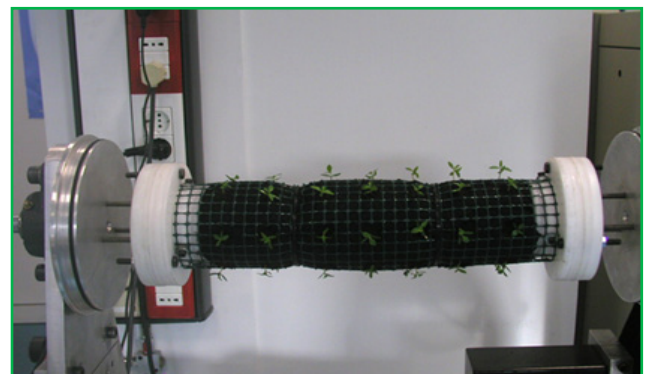


Foto: clinostato uniassiale con supporto dedicato per alloggiare terreno e piantine nelle prime fasi di sviluppo. Credits: S. Di Pasquale, Università degli studi di Napoli Federico II



La radiazione ionizzante: da effetti stimolatori a tossici

Nello Spazio, tutti gli organismi sono esposti a forti livelli di radiazioni ionizzanti, ossia radiazioni dotate di un'energia tale da poter ionizzare gli atomi e le molecole con cui interagiscono. Le radiazioni ionizzanti si dividono in due categorie principali: a) radiazioni ionizzanti che producono ioni in modo diretto (particelle cariche α , β^- e β^+); b) radiazioni ionizzanti che producono ioni in modo indiretto (raggi γ e raggi X). Le prime sono radiazioni ad alto LET (Linear Energy Transfer, energia trasferita dalla radiazione al materiale), mentre le seconde sono radiazioni di tipo ondulatorio a basso LET. Le radiazioni ad alto LET cedono energia in un breve percorso: possono comportare quindi un elevato danno biologico ma sono dotate di una minima capacità penetrativa poiché perdono gran parte dell'energia in un breve percorso. Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sulle piante dipendono non solo dal tipo di radiazione, ma anche dalle dosi, dal tipo di esposizione (acuta o cronica) e dalle caratteristiche dell'organismo: specie, cultivar, stato fisiologico e nutrizionale, momento del ciclo vitale (stadio fenologico) al momento dell'irraggiamento.

Le radiazioni ionizzanti sono un fattore a cui ben si applica uno dei principi fondamentali della tossicologia: come enunciato da Paracelso (Theophrastus Bombastus von Hohenheim) all'inizio del 1500, "Omnia venenum sunt: nec sine veneno quicquam existit. Dosis sola facit, ut venenum non fit" (cioè "Ogni cosa è veleno, non esiste cosa che non lo sia. Solo la dose fa sì che una sostanza non divenga veleno").

Questa idea, rifiutata per molto tempo, è ora comunemente accettata: è infatti riconosciuto che alcune sostanze possono avere effetti tossici ad alte concentrazioni, mentre a basse dosi possono avere effetti stimolatori positivi. Tale fenomeno, noto come ormesi, è stato

ricontrato anche nelle piante esposte alle radiazioni ionizzanti che ad alte dosi possono avere effetti tossici e addirittura letali, mentre a basse concentrazioni possono stimolare la crescita. In generale, le piante sono molto più resistenti alle radiazioni ionizzanti rispetto agli organismi animali: dosi letali per gli animali possono, infatti, ancora avere un effetto positivo o nullo sulle piante.

Foto: coltivazione vegetale sulla ISS. Credits: NASA/ESA



Quando la radiazione ionizzante colpisce la pianta, essa può agire a differenti scale: cellula, tessuto, organo, intero organismo. Le conseguenze di tale impatto sono molto variabili e non riconducibili ad un unico meccanismo di azione. Gli effetti delle radiazioni ionizzanti sulle piante possono essere classificati in: 1) effetti indiretti come espressione delle modifiche indotte a livello genetico; 2) danni diretti dovuti all'interazione delle radiazioni con specifiche strutture cellulari (per es. le varie componenti delle pareti cellulari) o alla produzione di radicali liberi (ROS - Reactive Oxygen Species, molecole instabili ed estremamente reattive) che possono danneggiare macromolecole strutturali e funzionali quali lipidi, proteine e acidi nucleici.

Gli effetti sulle piante possono essere ricondotti a tre livelli principali: cellulare, strutturale e fisiologico/metabolico.

Effetti a livello genetico e meccanismi di riparazione

Il nucleo delle cellule è considerato la parte più sensibile al danno da radiazione che determina diversi tipi di mutazioni: le più pericolose sono le "delezioni" (mutazione di una parte di un cromosoma, con conseguente perdita di materiale genetico). Si possono verificare anche altri fenomeni tra cui la sostituzione tra basi azotate della molecola di DNA, la rottura e lo scambio di cromatidi o la formazione di ponti di cromatina tra cromosomi di cellule adiacenti. La frequenza delle mutazioni aumenta quando ad essere irraggiati sono tessuti in via di sviluppo e quando si utilizzano ioni pesanti (radiazioni ad alto LET). Tuttavia dosi molto basse di radiazioni possono determinare una ampia gamma di mutazioni non letali ed in taluni casi addirittura effetti benefici (ormesi). Molte specie di piante sono poliploidi, ovvero hanno più di una copia dello

stesso gene: questa proprietà consente di contenere il danno da radiazione. I poliploidi infatti mostrano una sorta di ridondanza genetica per cui se una copia di un gene è danneggiata, ne esiste una di riserva (back-up) che garantisce l'espressione del gene stesso. Quando la radiazione colpisce i tessuti e gli organi, si avvia un complesso meccanismo di reazione da parte della cellula vegetale che tenta di "arginare il danno". Tra gli espedienti c'è l'incremento della sintesi di fenoli di membrana, ossia specifiche molecole che agiscono da schermo naturale contro la radiazione, ed il potenziamento di meccanismi enzimatici deputati alla rimozione di radicali liberi prodotti nei tessuti vegetali in seguito all'esposizione alla radiazione e responsabili di danni ossidativi letali alle membrane cellulari (Fig. 5).

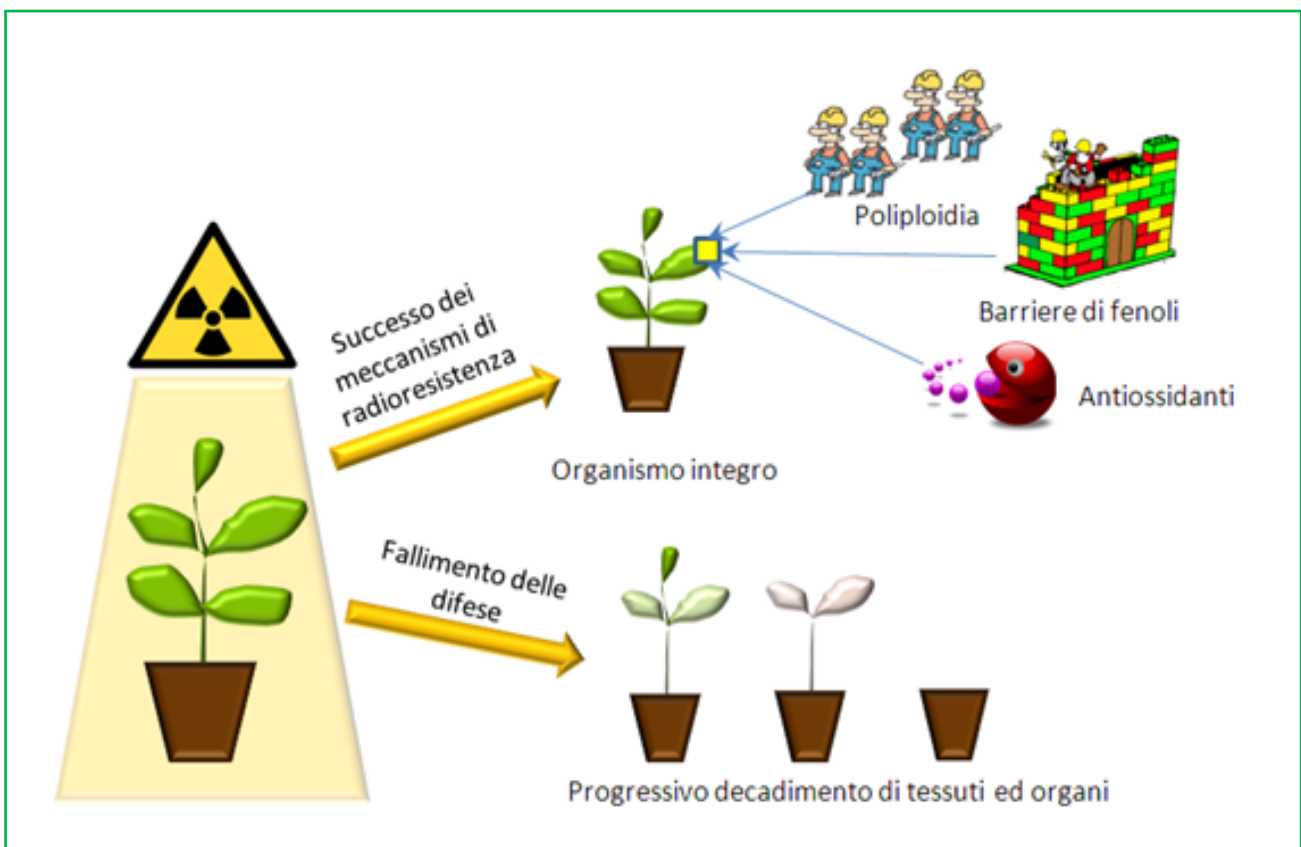


Fig. 5: le piante sono in grado di adottare meccanismi che limitano gli effetti deleteri dell'esposizione a radiazioni ionizzanti. Il fallimento di questi processi determina l'insorgenza di danni quasi sempre letali. Credits: C. Arena, Università degli studi di Napoli Federico II

Effetti su crescita e struttura

A differenza degli effetti a livello genetico, l'influenza della radiazioni ionizzanti su aspetti morfo-anatomici è stata meno studiata. La maggior parte degli esperimenti è stata condotta mettendo a confronto la crescita di piante derivanti da semi secchi irraggiati e semi controllo non esposti a radiazione. Oltre a germinazione ridotta, tra gli effetti negativi imputabili alle alte dosi, si fa spesso riferimento a letalità embrionale e difficoltà ad ottenere stadi di sviluppo avanzati (che comporta il mancato raggiungimento della fase riproduttiva), nanismo, modifica della morfologia fiorale con alterazione della fertilità. A basse dosi, invece, sono stati riscontrati effetti stimolatori su specifici parametri che determinano anche l'aumento della resa delle piante in termini di crescita (ad es. piante più alte), di successo riproduttivo (per es. maggiore numero di semi formati) e capacità di resistere agli stress ambientali (per es. deficit idrico). Per quanto concerne gli aspetti anatomici e citologici, è stato dimostrato che l'irraggiamento con raggi X e γ , non-

ché con raggi cosmici, modifica le caratteristiche della parete cellulare. Tutti questi fenomeni comportano una variazione della resistenza meccanica delle pareti cellulari e possono determinare la separazione delle cellule con conseguente alterazione della consistenza di tessuti e organi. In generale, i tessuti e le strutture più complessi sembrano essere maggiormente resistenti agli effetti dannosi e mutageni delle radiazioni. I diversi fenomeni di crescita sono influenzati diversamente dalle radiazioni: i processi che richiedono divisione cellulare e fasi di differenziamento sono più sensibili alle radiazioni e di conseguenza le cellule meristematiche (per es. apici vegetativo e radicale, cellule riproduttive) sono più sensibili rispetto a quelle somatiche.

Data l'enorme variabilità delle risposte ottenute in esperimenti nello Spazio o in condizioni simulate di elevati livelli di radiazione, basati sull'utilizzo di specie/cultivar differenti, non sempre è possibile individuare chiare tendenze dose-risposta.

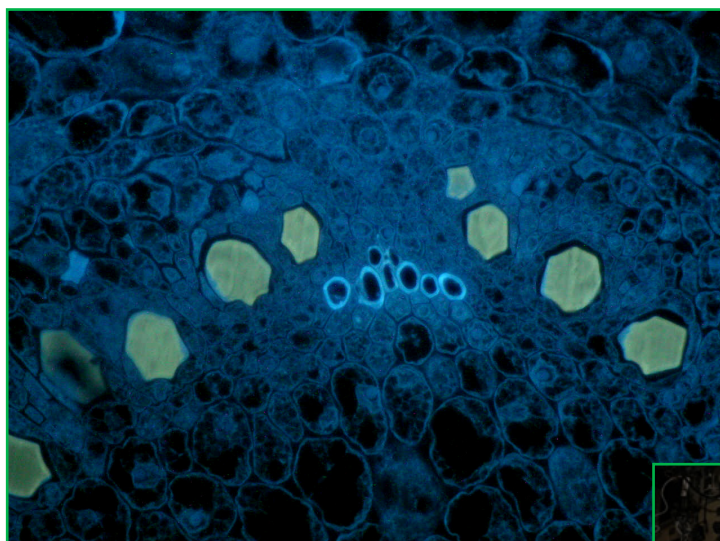


Foto: fotografia al microscopio a fluorescenza di un ipocotile di un germinello cresciuto nello spazio. Credits: V. De Micco, G. Aronne, Università degli studi di Napoli Federico II

Foto: esperimenti di biologia vegetale a bordo della ISS: Credits: NASA/ESA



Effetti sulla fotosintesi

Le radiazioni ionizzanti possono alterare il processo fotosintetico sia nella fase luminosa, compromettendo clorofilla e pigmenti antenna deputati alla cattura dell'energia luminosa, sia nella fase oscura, minando il funzionamento degli enzimi chiave, grazie ai quali avvengono le normali reazioni di assimilazione ed organizzazione della CO₂ atmosferica. Le radiazioni ionizzanti possono anche danneggiare la struttura delle membrane dei cloroplasti (organelli deputati alla fotosintesi) e di conseguenza ostacolare il normale svolgimento dell'assorbimento di luce. La maggior parte degli studi volti a valutare l'effetto delle radiazioni sulla fotosintesi sono stati eseguiti su cianobatteri o su piante sviluppate da semi irradiati. Il meccanismo di danno indotto ai componenti

dell'apparato fotosintetico non è ancora ben compreso, tuttavia, è stato accertato che organismi in uno stadio di sviluppo giovanile risultano più sensibili rispetto allo stadio adulto, quando cioè l'architettura dei tessuti della pianta è già pienamente definita. Le specie che sopportano alte dosi di radiazioni senza manifestare danni al processo fotosintetico, e alla crescita in generale, sono definite radioresistenti. Tale caratteristica può essere attribuita a meccanismi sia biochimici sia molecolari che formano uno speciale "mix di azione" contro la radiazione. Una specie radioresistente è capace di mantenere buoni tassi fotosintetici, condizione importante per assicurare la produzione di elevati valori di biomassa ed ossigeno nei BLSS.

La microgravità: effetti diretti e indiretti

L'idea che l'assenza di gravità, o meglio livelli di gravità ridotta, influenzino la crescita delle piante pone le fondamenta su una serie di considerazioni di tipo evolucionistico, biochimico, fisiologico e strutturale. Nel corso della loro evoluzione, le piante superiori sono state sottoposte a continue variazioni di numerosi fattori ambientali tra cui temperatura, luce, disponibilità di acqua e nutrienti. Ciò che invece le ha accompagnate nel lungo processo evolutivo in modo costante e continuo è il campo gravitazionale terrestre. Le piante hanno iniziato a percepire tutta l'intensità dell'attrazione gravitazionale quando hanno cominciato il processo di colonizzazione delle terre emerse affrancandosi gradualmente dall'ambiente acquatico: questo momento evolutivo chiave è stato accompagnato dall'evoluzione di vie metaboliche e di processi vitali specifici. Un esempio è rappresentato dalla comparsa di alcune sostanze tra cui la lignina, polimero complesso capace di

conferire resistenza meccanica ai tessuti e quindi di permettere la crescita in altezza delle piante, contro la forza di gravità.

L'effetto della microgravità è stato studiato principalmente su alcuni processi nel corso dello sviluppo delle piante ed in particolare su: capacità di germinazione dei semi e sviluppo morfologico, gravitropismo (crescita delle radici guidata dall'attrazione gravitazionale), sviluppo del sistema vascolare e fenomeni di lignificazione delle pareti cellulari (fondamentali per il trasporto dell'acqua nel sistema vegetale e per il supporto strutturale), traslocazione di sostanze di riserva, accumulo di sostanze fenoliche (sostanze antiossidanti prodotte generalmente a seguito di stress), capacità di riproduzione, efficienza degli scambi gassosi (fotosintesi e traspirazione), attività del nucleo e cicli cellulari.

Numerosi esperimenti a bordo di satelliti e stazioni spaziali hanno dimo-


to che l'assenza di gravità, o meglio la microgravità, non impedisce la realizzazione della maggior parte dei processi biologici, ma può alterare il loro normale svolgimento. La microgravità è ritenuta responsabile sia di effetti diretti su alcuni processi biologici, sia di effetti indiretti dovuti all'alterazione di fenomeni fisici come la dinamica dei fluidi.

Tali alterazioni possono provocare fenomeni di asfissia radicale, riduzione della traspirazione ed accumulo di etilene, un ormone normalmente prodotto dalle piante in alcuni momenti del ciclo vitale che, alle giuste concentrazioni, può stimolare alcuni processi, mentre in concentrazioni eccessive può ostacolarli.

Nei primi esperimenti condotti nello Spazio, molte delle aberrazioni di cre-

scita (per es. ridotta germinazione, o mancato completamento del ciclo riproduttivo a causa di problemi in varie fasi del ciclo tra cui la formazione del polline, la schiusura delle antere e la formazione dell'embrione) sono state imputate alla microgravità, per essere poi nel tempo attribuite proprio a fenomeni di accumulo di etilene, eccesso di umidità o scarsità di anidride carbonica, causati da problemi nel controllo ambientale delle camere di crescita utilizzate a bordo. Fenomeni di crescita ridotta e rallentata riscontrati in piante cresciute in condizioni di microgravità sono stati talvolta ascritti proprio a condizioni di asfissia dovute all'assenza di moti convettivi che normalmente permettono gli scambi tra i fluidi.

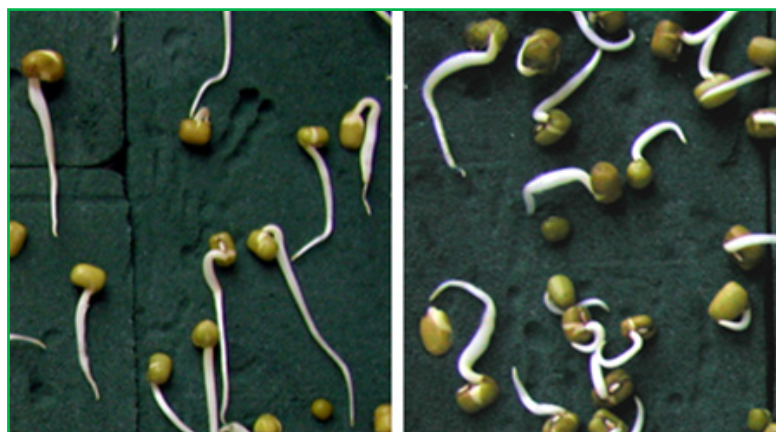


Foto: semi che germinano in presenza di gravità sviluppano radici che crescono tutte parallele nella direzione del vettore gravità (sinistra). Al contrario, in microgravità simulata (clinorotazione), le radici non mostrano alcuna direzione preferenziale di sviluppo (destra). Credits: V. De Micco, Università degli studi di Napoli Federico II

Effetti sugli scambi gassosi

L'alterazione della fisica dei fluidi che si verifica in microgravità può indurre modifiche nei fenomeni di trasporto idrico e degli scambi gassosi nelle piante.

In condizioni normali sulla Terra, le foglie traspirano perdendo acqua sotto forma di vapore attraverso gli stomi (cellule specializzate presenti sulle epidermidi degli organi verdi) che durante il giorno lasciano entrare anidride carbonica e uscire ossigeno. Il vapore perso dalle foglie crea la forza motrice

necessaria per la risalita dell'acqua attraverso tutta la pianta a partire dalla radice; inoltre abbassa la temperatura dei tessuti. In microgravità, invece, gli scambi gassosi sono ostacolati dalla presenza di uno strato di aria stagnante intorno alle foglie che si viene a creare proprio per l'assenza di moti convettivi. Ciò comporterebbe non solo un rallentamento della fotosintesi, ma anche un eccessivo aumento della temperatura delle foglie. Per evitare questi effetti,

in microgravità si impongono condizioni opportune di ventilazione e controllo ambientale, in modo da far crescere piante sane senza riduzioni di traspirazione, fotosintesi, ed efficienza nell'uso dell'acqua. In talune condizioni si è addirittura assistito ad uno stimolo dei tassi fotosintetici. La risposta fotosintetica delle piante che crescono in microgravità può dipendere fortemente dalla quantità di luce che raggiunge le foglie. Livelli molto elevati di luce possono interagire con la microgravità determinando la riduzione dell'attività di alcuni

componenti dei fotosistemi (insiemi di pigmenti ed enzimi deputati alla cattura della luce nella fase luminosa della fotosintesi). Danni alla struttura interna dei cloroplasti e riduzione della dimensione delle foglie sono stati riscontrati in alcune specie come frumento e rapa (due tipiche specie modello).

Un ridotto tasso di fotosintesi in microgravità è stato anche recentemente imputato ad un accumulo di amido nei cloroplasti dovuto ad un rallentamento nei fenomeni di traslocazione dei fotosintetati alle altre parti della pianta.

Sviluppo morfologico e riproduzione

La letteratura sull'effetto della microgravità sull'organogenesi e sulla riproduzione delle piante è ricca di esempi che offrono spesso risultati contrastanti a causa dell'utilizzo di specie e hardware di volo differenti, quindi di condizioni ambientali molto diverse.

L'organogenesi è un processo molto complesso che richiede la corretta realizzazione di divisioni cellulari seguite da fenomeni di crescita e differenziazione che sono regolati dall'espressione genica e da segnali ormonali. E' certo che la microgravità influenza la proliferazione cellulare agendo in momenti diversi del ciclo cellulare e può anche alterare la crescita delle cellule poiché interferisce con la deposizione della cellulosa nelle pareti cellulari che rappresentano una limitazione meccanica all'aumento di volume. A causa delle limitazioni di tempo e volumi imposti dalla sperimentazione in ambito spaziale, la maggior parte delle informazioni disponibili sull'effetto della microgravità sull'organogenesi deriva da studi condotti su piante nelle prime fasi di sviluppo, ossia su germinelli (semi germinati che generalmente iniziano a formare le prime foglie vere). Gli studi che invece hanno preso in considerazione l'intero ciclo vitale (fino alla formazione dei frutti) sono stati condot-

ti su piccole piante di specie modello come *Arabidopsis thaliana*.

La maggior parte delle modifiche riscontrate a livello morfo-anatomico in risposta all'esposizione alla microgravità nello Spazio sono state imputate a tre fenomeni principali:

- la disorganizzazione del citoscheletro (reticolo di natura proteica che permea le cellule e permette il movimento di organelli e altre strutture influenzando anche l'accrescimento);
- l'aumento della produzione di radicali liberi;
- modifiche metaboliche (soprattutto per quanto concerne sintesi, traslocazione e degradazione di amido e di sostanze fenoliche).

Ad esempio, disordini nell'organizzazione del citoscheletro in cellule di germinelli cresciuti nello Spazio o in condizioni di microgravità simulata (per es. sul clinostato) possono determinare alterazioni nelle dimensioni delle cellule, e di conseguenza degli organi, poiché è proprio il citoscheletro che regola l'espansione del citoplasma e la disposizione delle molecole di cellulosa nelle pareti cellulari.



Una fase delicata: germinazione dei semi e gravitropismo

Come accennato precedentemente, la maggior parte degli esperimenti condotti in microgravità reale o simulata ha riguardato la germinazione dei semi e lo sviluppo di germinelli. L'interesse per queste fasi iniziali del ciclo vitale risiede non solo nelle limitazioni in volume, ma anche in motivazioni scientifiche poiché la gravità ridotta rappresenta una condizione "speciale" che ha aiutato a chiarire una serie di processi che culminano nelle risposte gravitropiche. Inoltre, i germinelli rappresentano anche una fase del ciclo delle piante di particolare interesse dal punto di vista nutrizionale poiché hanno un elevato valore nutrizionale e potrebbero essere prodotti in poco tempo e con poche risorse direttamente a bordo delle piattaforme spaziali per integrare la dieta degli astronauti con cibo fresco. Pur senza entrare nei dettagli dei meccanismi genetici e metabolici che regolano il gravitropismo, confrontiamo come viene indirizzata la crescita della radice quando un seme germina in presenza o in assenza di gravità (Fig. 6).

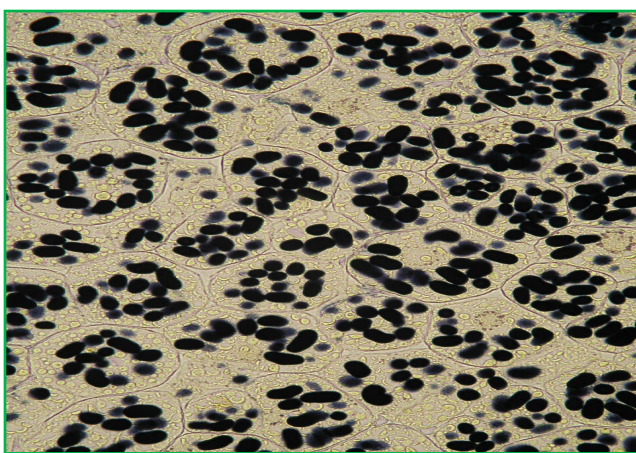


Foto: fotografia al microscopio ottico di cellule contenenti amido (grani scuri) in una foglia embrionale di un seme germinato nello spazio. Credits: V. De Micco, G. Aronne, Università degli studi di Napoli Federico II

Nelle piante, la percezione della gravità avviene alla punta della radice. A livello dell'apice radicale infatti c'è una zona,

detta cuffia, che si trova all'interfaccia col terreno. La cuffia possiede cellule più esterne con pareti mucillagino-se che, sfaldandosi, svolgono una sorta di azione lubrificante e favoriscono la penetrazione della radice nel terreno, mentre la zona centrale, detta columella, è dotata di speciali sensori per la gravità. Le cellule della columella sono anche dette statociti e sono cellule capaci di percepire lo stimolo gravitazionale grazie alla presenza di granuli di amido in speciali amiloplasti (un tipo di plastidi), detti statoliti.

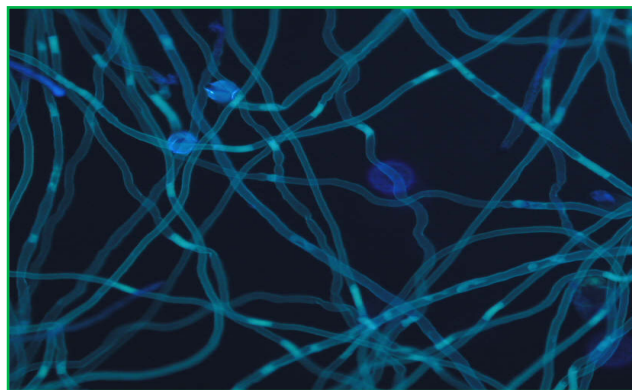


Foto: fotografia al microscopio a fluorescenza di tubetti pollinici di pesco sviluppati su clitostato. Credits: V. De Micco, G. Aronne, Università degli studi di Napoli Federico II

Gli statoliti, attraverso un meccanismo di polarizzazione della cellula che coinvolge anche altri sistemi endo-cellulari e segnalazioni ormonali, sono spinti a spostarsi sulla parete inferiore della cellula per cui l'apice radicale si accresce nella direzione così determinata. Quando la radice è deviata dalla direzione verticale (come avviene anche in natura quando la radice incontra un ostacolo), gli statoliti si muovono risistemandosi sempre sulla parete inferiore ed appena possibile l'apice radicale effettua una curva e continua a penetrare nel terreno in direzione verticale. In microgravità, questi meccanismi di polarizzazione della cellula, di percezione dello stimolo e induzione della direzione di sviluppo sono alterati: ad esem-

pio molti studi hanno rivelato modifiche nel metabolismo dell'amido e nella produzione e traslocazione di ormoni che culminano nell'assenza di una direzione preferenziale di crescita della radice. In assenza di gravità nello Spazio o su clinostato quindi è semplicemente l'orientamento dell'embrione a determinare la direzione di sviluppo della radice: mentre il germoglio può trovare un orien-

tamento, principalmente rispondendo agli stimoli luminosi, la radice appare invece "disorientata", si sviluppa disordinatamente, spesso formando riccioli o curvature senza una direzione specifica. Pur essendo stato molto studiato, il meccanismo della gravipercezione è complesso e le relative basi biochimiche e molecolari, non sono state ancora del tutto chiarite.

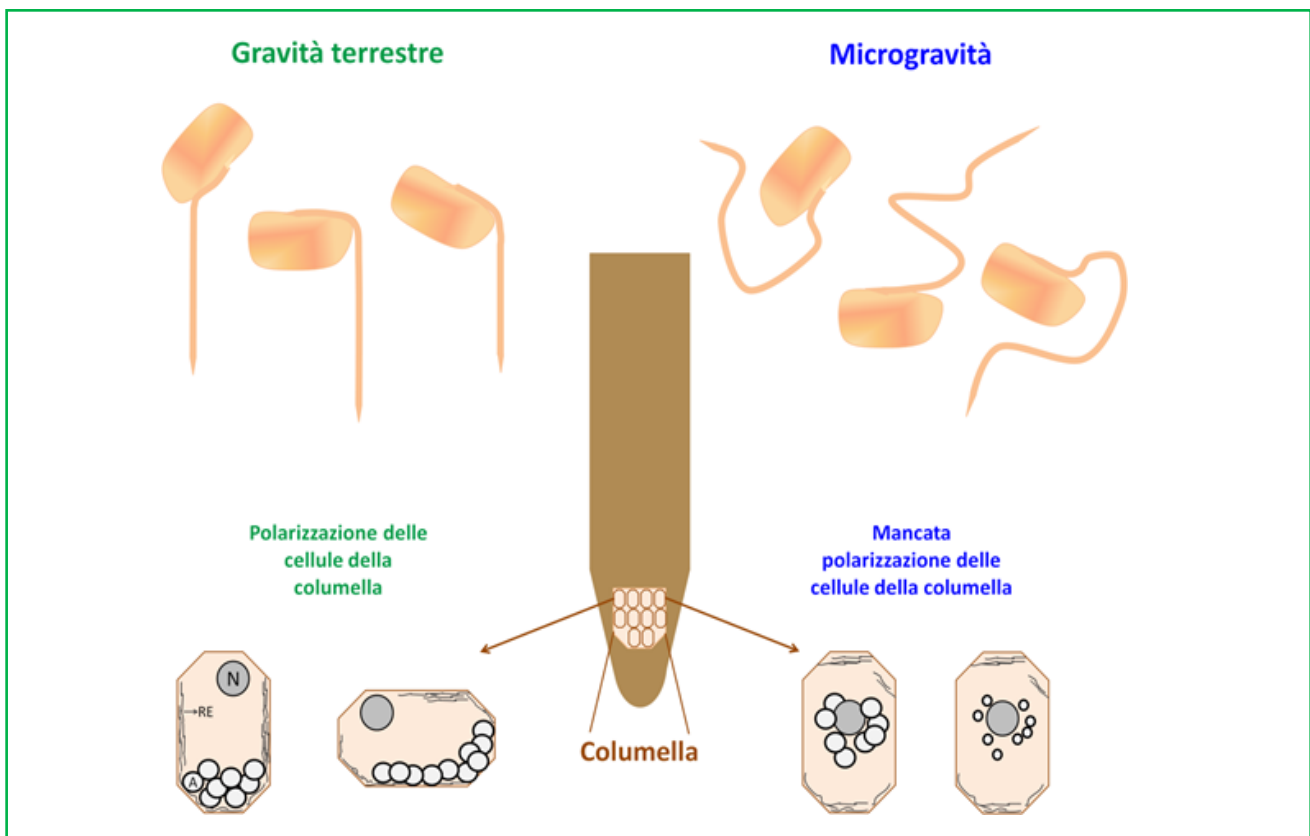


Fig. 6: Modello semplificato di risposta alla gravità di semi che germinano sulla terra in presenza di attrazione gravitazionale (sinistra) e in microgravità reale o simulata (destra). I semi che germinano in presenza di gravità presentano radici che si sviluppano con una direzione preferenziale di crescita lungo la verticale, guidate dall'attrazione gravitazionale: le radici si sviluppano tutte parallele tra loro e parallele alla direzione del vettore gravità indipendentemente dalla posizione dei semi. I semi che germinano in condizioni di microgravità reale nello Spazio o simulata (su clinostato) presentano radici che si sviluppano senza una direzione preferenziale. La percezione dello stimolo gravitazionale avviene a livello della columella, le cui cellule contengono amiloplasti che si comportano da statoliti. In presenza di gravità, le cellule sono "polarizzate" ossia presentano una precisa disposizione di tutte le strutture interne e gli amiloplasti sono addossati alle pareti trasversali delle cellule della columella in radici che crescono verticalmente verso il basso. Quando la stessa radice è ruotata su di un lato, gli amiloplasti "scivolano" nuovamente per addossarsi alla parete perpendicolare alla forza di gravità. In assenza di gravità, invece, possono verificarsi vari fenomeni tra cui la mancata polarizzazione della cellula che comporta la distribuzione casuale degli amiloplasti oppure la degradazione dell'amido che risulta nella presenza di amiloplasti di dimensioni ridotte. (A = amiloplasto; N = nucleo; RE = reticolo endoplasmatico).

Credits: V. De Micco, Università degli studi di Napoli Federico II

Piante e alimentazione. Contesto generale

Una corretta alimentazione è uno dei fattori chiave per condurre una vita sana sulla Terra e difendersi dagli stress. Questo è ancor più vero nello Spazio, dove l'organismo degli astronauti è sottoposto a fattori di stress maggiori dovuti non solo alla microgravità e alle radiazioni, ma anche alle condizioni di forte isolamento.

L'introduzione di alimenti freschi, opportunamente scelti, nella dieta dell'equipaggio, non solo potrebbe essere utile grazie all'apporto di fattori nutrizionali e sostanze antiossidanti, ma sarebbe anche da supporto alla psicologia degli astronauti che si sentirebbero meno lontani da una normale vita terrestre. Di qui l'idea di poter produrre germinelli di varie specie vegetali direttamente a bordo delle stazioni spaziali in poco tempo e con poche risorse.

I semi germogliati infatti costituiscono un alimento fresco, che si presta ad essere mangiato crudo, ricchissimo di nutrienti quali vitamine, enzimi, oligoelementi, aminoacidi essenziali. Sono facili da digerire, facili da preparare e conservare, privi di scarti poiché si utilizzano per intero. Il loro elevato valore nutrizionale è dovuto alle profonde modificazioni nella struttura del seme durante la germinazione. Nel germinello in crescita, in conseguenza di comples-

se reazioni enzimatiche, le sostanze di riserva del seme, contenute nel tessuto parenchimatico dei cotiledoni, vengono trasformate e mobilizzate. Proprio durante la trasformazione delle sostanze di riserva avvengono le numerose trasformazioni biochimiche, non del tutto chiarite, che danno al germoglio la sua ricchezza di sostanze: esso diventa un vero e proprio scrigno di principi nutritivi, che sono di più facile digestione ed assimilazione da parte dell'organismo. Le sostanze di riserva contenute nel seme sono costituite per lo più da amidi ed emicellulose. Questi carboidrati complessi vengono in gran parte trasformati in destrine e maltosio, sostanze più semplici e dolciastre, che danno al germoglio il suo caratteristico sapore delicato e leggermente dolce. Anche la parte proteica del seme subisce una trasformazione; infatti le proteine vengono "predigerite" dagli enzimi scomponendosi in aminoacidi, di più facile e veloce digestione e assimilazione. Oltre ad aumentare gli aminoacidi essenziali, nei germogli crescono anche i livelli di acidi nucleici, sali minerali e oligoelementi, che inoltre vengono a trovarsi in forma organica e quindi più facilmente assimilabile ed utilizzabile dall'organismo (per es. il ferro). Anche le vitamine subiscono aumenti considerevoli.

Azioni educative ed obiettivi

Al fine di sensibilizzare gli studenti sull'importanza di mangiare sano in qualsiasi ambiente, sia esso terrestre o extra-terrestre, sono presentate due azioni:

- 1) Svolgimento di un'esperienza di "mangiare come un astronauta" che si svolge in più scuole e a bordo della Stazione Spaziale Internazionale.
- 2) Svolgimento di un esperimento di

germinazione in presenza dell'attrazione gravitazionale e in condizioni di microgravità simulata.

Quest'ultima azione ha anche obiettivi più propriamente scientifici, finalizzati ad illustrare le differenze nella germinazione dei semi e nelle prime fasi di sviluppo dei germinelli sulla Terra e nello Spazio.

Attività Previste

Attività n. 1 - Mangiare come un astronauta. Lo scopo di questa prima attività è illustrare l'importanza del diverso apporto nutrizionale di differenti specie vegetali in una dieta sana. Questa prima attività prevede che gli studenti in varie scuole mangino barrette energetiche ricche di fibre e cereali come quelle che vengono consumate normalmente dagli astronauti a bordo della Stazione Spaziale Internazionale. La barretta proposta contiene numerosi ingredienti tra cui: sesamo, olio di girasole, orzo, quinoa, mela disidratata, cioccolato, miglio, avena e mais. I docenti spiegheranno le differenti proprietà nutrizionali contenute nei vari ingredienti e sottolineeranno l'importanza di associare alimenti con caratteristiche differenti in una dieta sana.

Attività n. 2 - Germinazione in presenza e assenza di gravità. Lo scopo di questo esperimento è mostrare come germinazione dei semi e crescita dei germinelli sono influenzate dalla presenza di gravità, confrontando germinelli sviluppati in condizioni di gravità terrestre e in condizioni di microgravità simulata. Queste ultime sono realizzate facendo germinare i semi su un clinostato uniaassiale o tridimensionale.

Questa attività prevede lo svolgimento di due esperimenti simultaneamente:

a) il primo esperimento è condotto in contemporanea in più scuole: gli studenti fanno germinare semi tra vari strati di carta assorbente in capsule di Petri tenuti in due posizioni (verticale ed orizzontale);

b) gli stessi semi negli stessi contenitori sono fatti germinare in condizioni di microgravità simulata, su clinostato, in due Università (Università degli Studi di Napoli e Università di Sassari).

Nel corso dell'esperimento di germinazione, gli studenti svolgono visite guidate presso le Università, e ricevono periodicamente immagini dei germinelli in via di sviluppo su clinostato al fine di

confrontarli con quelli che germinano in condizioni normali di gravità. La specie scelta per quest'esperimento è l'orzo (*Hordeum vulgare* L.), i cui germinelli sono interessanti dal punto di vista nutrizionale per l'apporto bilanciato di proteine, fibre e lipidi, ed i cui semi ben si prestano ad una facile germinazione alle temperature normalmente riscontrabili nelle scuole.

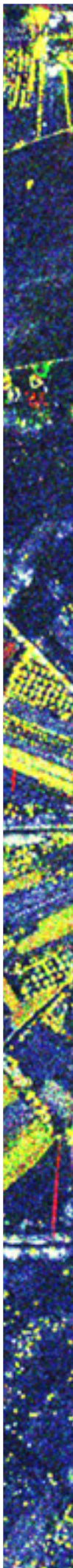
Risultati Attesi

Il take-home message di questo esperimento è che i germinelli messi nelle tre condizioni (due nelle scuole e una nelle università) mostrano una diversa morfologia di sviluppo. In particolare:

a) i semi messi a germinare in presenza di gravità su di un piano verticale presentano radici che si sviluppano con una direzione preferenziale di crescita lungo la verticale, guidate dall'attrazione gravitazionale. Di conseguenza, indipendentemente dalla posizione iniziale del seme, le radici si sviluppano tutte parallele tra loro e parallele alla direzione del vettore gravità;

b) i semi messi a germinare in presenza di gravità su di un piano orizzontale presentano radici che si sviluppano senza una direzione preferenziale: sono distribuite in tutte le direzioni e si può osservare una leggera curvatura dell'apice radicale verso la direzione del vettore gravità;

c) i semi messi a germinare in condizioni di microgravità simulata (su clinostato) presentano radici che si sviluppano senza una direzione preferenziale e gli apici radicali non mostrano alcuna curvatura proprio come crescono le radici nello Spazio.



Scrivi qui i tuoi appunti

