

Orizzonti

N.2 - DICEMBRE 2025

ESPLORAZIONE LUNARE

Volume I - Missioni,
Infrastrutture
e Tecnologie



Orizzonti

La collana editoriale a cura
del Consiglio Tecnico Scientifico di ASI, dedicata
ad approfondimenti su nuovi studi del settore spazio.

Progetto grafico by Paola Gaviraghi - DCI ASI -
Ufficio Comunicazione - Editoria e Grafica

Consiglio Tecnico Scientifico di ASI:

Prof. **Paolo Tortora** – Alma Mater Studiorum – Università di Bologna –
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Ten Col. **Ferdinando Dolce** – Ministero della Difesa -
Direzione Nazionale degli Armamenti

Prof.ssa **Monica Monici** - LC ASAcampus, ASA Div. Ric. - Università
di Firenze - Dip. Scienze Biomediche Sperimentali e Cliniche

Prof.ssa **Sandra Savaglio** – Università della Calabria –
Dipartimento di Fisica

Prof.ssa **Stefania De Pascale** – Università degli Studi di Napoli
“Federico II” – Dipartimento di Agraria

Prof. **Jacopo Tirillò** – Sapienza Università di Roma –
Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente

Prof. **Giovanni Pratesi** – Università degli Studi di Firenze –
Dipartimento di Scienze della Terra.

In redazione:

Gabriele Mascetti– ASI – Direzione Scienza e innovazione - UES

Francesco Caprio – ASI – Presidenza - Ufficio Supporto organizzativo

Eloisa Menegoni – ASI – Presidenza - Ufficio Coordinamento strategico

Documento distribuito con licenza Creative Commons BY-NC-ND 4.0

Indice

1. Introduzione

- Storia dell'esplorazione lunare
- Obiettivi dell'esplorazione lunare futura
- Importanza strategica della Luna
- Collaborazione Internazionale e Competizione nello spazio

2. Missioni Lunari Programmate (2024-2044)

- NASA: Programma Artemis
- ESA: Collaborazioni e missioni lunari
- Programma lunare Russo
- Programma lunare Cinese
- Programma lunare Indiano
- Altre missioni private internazionali

3. Infrastrutture e Tecnologie per la Luna

- Stazioni orbitali lunari
- *Habitat* lunari permanenti
- Requisiti per la tutela della salute
- Strutture per l'assistenza medica e la gestione delle emergenze medico-chirurgiche
- *Rover* e veicoli per l'esplorazione della superficie
- Tecnologie di estrazione e utilizzo delle risorse lunari (ISRU)
- Tecnologie per la produzione di energia per missioni di lunga durata
- Sistemi rigenerativi fisico-chimici per il supporto vitale
- Sistemi biorigenerativi di supporto alla vita
- Sistemi di produzione di vegetali sulla superficie lunare

Conclusioni



1 Introduzione

L'esplorazione lunare rappresenta uno dei capitoli più affascinanti della storia dell'umanità, in cui scienza, tecnologia e geopolitica si sono intersecate, con importanti ricadute sulla civiltà contemporanea. Questo primo dei tre volumi che compongono la monografia sul tema della "Esplorazione lunare" si propone di tracciare un percorso che parte dalle antiche osservazioni fino alle moderne missioni spaziali, ripercorrendone le tappe principali, per poi analizzare gli obiettivi dell'esplorazione lunare futura, ponendo l'accento sull'importanza strategica e sulle potenzialità economiche e scientifiche di una presenza umana sostenibile.



In particolare, vengono ripercorse le tappe dell'esplorazione lunare, per mostrare quanto essa rappresenti un punto di svolta nel progresso scientifico, tecnologico e delle capacità, integrando conoscenze storiche e sfide attuali. La collaborazione tra enti pubblici e privati ha favorito lo sviluppo di infrastrutture e soluzioni *in-situ* per la gestione delle risorse e delle strutture di supporto alla vita. Questa esperienza passata costituisce la base per future missioni spaziali e per l'espansione dell'umanità sulla Luna, al fine di realizzare una naturale presenza sostenibile sul nostro satellite e per consolidare la conquista dello spazio come patrimonio condiviso, sebbene presenterà una fonte strategica ed econo-

mica dal valore oggettivo. Tale bilanciamento rappresenta probabilmente la sfida più complessa.

In un contesto di crescente cooperazione internazionale, ma anche di accesa competizione, la Luna rappresenta un banco di prova per le tecnologie destinate a missioni interplanetarie, per l'innovazione nello sfruttamento delle risorse *in-situ* e per il conseguente potenziamento delle capacità privato e governativo che deriverà da tali risorse. Tale analisi, pertanto, intende offrire una visione d'insieme, integrando prospettive storiche e proiezioni future, con l'obiettivo di contribuire al dibattito sulle strategie di espansione umana nello spazio profondo.

Storia dell'esplorazione lunare

La storia dell'esplorazione lunare affonda le sue radici nell'antichità più remota. Per migliaia di anni, la Luna ha esercitato un fascino profondo su filosofi, astronomi e scienziati, ispirando miti, calendari e speculazioni sulla sua origine. Solo con l'avvento del telescopio, a partire dal XVII secolo, studiosi del calibro di Galileo Galilei tracciarono le prime mappe dettagliate della superficie lunare, rivelando la complessa morfologia di mari, crateri e montagne, e ponendo le basi per le osservazioni ed esplorazioni che seguirono (*Ding et al., 2024, Oldham et al., 2025*).

L'era moderna dell'esplorazione lunare ebbe inizio nel 1959 con il programma sovietico *Luna*: *Luna 2* fu la prima sonda a impattare la superficie lunare, mentre *Luna 3* trasmise le prime immagini della faccia nascosta della Luna (*Pimenta, 2024*). La corsa allo spazio tra Stati Uniti e Unione Sovietica culminò con il programma *Apollo* della NASA, che nel 1969 portò i primi esseri umani sulla Luna, a bordo del modulo di allunaggio dell'*Apollo 11*. Gli astronauti Neil Armstrong e Buzz Aldrin condussero esperimenti scientifici *in-situ* e raccolsero campioni geologici, contribuendo a una comprensione più approfondita della composizione e dell'origine lunare (*Qiao et al., 2024*). Tra il 1969 e il 1972, le successive cinque missioni del programma *Apollo* permisero di raccogliere oltre 380 kg di rocce lunari e di esplorare diverse regioni della



superficie. Parallelamente, il programma sovietico *Luna* inviò sonde robotiche come *Luna 16*, che riportò sulla Terra campioni di regolite, e il rover *Lunokhod*, utilizzato per l'analisi remota del suolo lunare.

Dopo la conclusione del programma *Apollo*, l'interesse per l'esplorazione lunare con equipaggi umani subì un rapido declino. Dagli inizi degli anni Duemila, tuttavia, si è assistito al destarsi di una rinnovata



L'astronauta Harrison Schmitt, pilota dell'Apollo 17, durante la terza passeggiata lunare della missione presso il sito di atterraggio di Taurus-Littrow. Crediti: NASA

attenzione verso la Luna. L'Agenzia Spaziale Cinese (CNSA), con il programma *Chang'e*, ha realizzato allunaggi autonomi e perfino una raccolta di campioni, operata da *Chang'e-5* nel 2020 (*Ding et al., 2024*). L'India, con il lancio di *Chandrayaan-3* nel 2023, ha dimostrato capacità operative consolidate, concludendo un atterraggio controllato nei pressi del polo sud lunare (*Qiao et al., 2024*). Attualmente, il programma *Artemis* della NASA mira

a riportare astronauti sulla Luna entro il 2026, con l'obiettivo di stabilire una presenza sostenibile e di gettare le basi per future missioni su Marte. In parallelo, varie agenzie spaziali e attori privati esplorano strategie per l'estrazione e l'utilizzo delle risorse lunari, come il ghiaccio d'acqua nei crateri polari, potenzialmente sfruttabile per il supporto alla vita e la produzione di propellenti per missioni interplanetarie (*Pimenta, 2024*).

Obiettivi dell'esplorazione lunare futura

Laddove l'esplorazione lunare del XX secolo si era configurata come una competizione capacitiva, motivata dal clima geopolitico della Guerra Fredda, l'esplorazione lunare del XXI secolo appare mossa da obiettivi scientifici ed economici di lungo termine (Flahaut et al., 2023). Essa, infatti, si configura come un'impresa multidisciplinare che mira a consolidare la conoscenza scientifica e potenziare nuove tecnologie finalizzate anche a stabilire le basi per l'espansione umana oltre l'orbita terrestre, conferendo all'umanità stessa nuovi scenari nei quali agire e operare. I programmi spaziali internazionali, guidati dalla NASA, dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), dalla CNSA e da altre agenzie, convergono su obiettivi strategici che comprendono la ricerca scientifica avanzata, lo sfruttamento delle risorse *in-situ* (*In-Situ Resource Utilization*, ISRU), la costruzione di infrastrutture operative permanenti e la preparazione per missioni interplanetarie (Pimenta, 2024).

Uno dei principali obiettivi scientifici è lo studio della geologia e della cronologia lunare per comprendere l'evoluzione della crosta lunare e il suo rapporto con la storia primordiale del sistema Terra-Luna, nonché quella del Sistema Solare (Luna et al., 2024). La presenza di ghiaccio d'acqua nei crateri polari, identificata dalle missioni *Chandrayaan-1* e *Lunar Reconnaissance*



Orbiter, rende queste regioni prioritarie per future esplorazioni, data la loro importanza per la produzione di ossigeno e idrogeno utilizzabili come propellenti per missioni spaziali (Cilliers et al., 2023).

Un ulteriore aspetto cruciale, di tipo tecnologico, è lo sviluppo di *habitat* lunari per la presenza umana a lungo termine. Il già menzionato programma *Artemis* della NASA, in collaborazione con diversi partner internazionali, prevede la costruzione della stazione orbitale *Lunar Gateway* e la messa in opera di basi lunari con strutture re-



Multi Purpose Habitation module. Crediti: Thales Alenia Space

alizzate mediante tecnologie di stampa 3D (*additive manufacturing*) a partire dalla regolite estratta *in-situ* (Santomartino et al., 2023). Parallelamente, il progetto LUWEX dell'ESA esplora tecnologie per l'estrazione e la purificazione dell'acqua lunare, fondamentale per incrementare l'autonomia delle missioni future (Baiden et al., 2010).

Infine, la Luna rappresenta un banco di prova per tecnologie destinate all'esplorazione di Marte. La ridotta gravità lunare e la sua esposizione alle radiazioni cosmiche forniscono un ambiente ideale per testare

sistemi di supporto vitale, mobilità e protezione dagli agenti spaziali. Il quadro, nel complesso, indica che l'esplorazione lunare, oltre ad essere un significativo obiettivo scientifico, sta diventando gradualmente un elemento strategico per l'espansione sostenibile dell'umanità nello spazio profondo (McNutt, 2004).

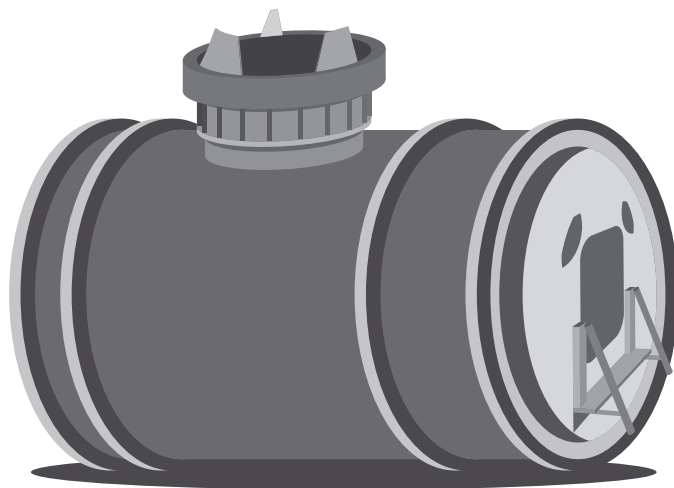
Tale strategicità, spesso legata anche alle risorse potenzialmente sfruttabili sulla Luna, conferisce una spinta tecnologica finalizzata a vincere un'evidente competitività - anche economica - di livello internazionale.

Importanza strategica della Luna

Per tutte le ragioni indicate, la Luna rappresenta un asset strategico di primaria importanza per il futuro dell'esplorazione spaziale, dello sviluppo tecnologico e della geopolitica internazionale. La sua vicinanza alla Terra, la presenza di risorse naturali e la possibilità di impiego come base di rifornimento e partenza per missioni interplanetarie la rendono un obiettivo chiave tanto per le maggiori agenzie spaziali, quanto per i consorzi spaziali privati (*Thirupathi Raj & Thangavelautham, 2024*).

Questa possibilità rende la Luna un *hub* logistico ideale per l'espansione dell'umanità nello spazio profondo, riducendo la dipendenza dalle missioni di rifornimento dalla Terra (*Flahaut et al., 2023*). Inoltre, il suolo lunare contiene isotopi preziosi come l'elio-3, potenziale carburante per future tecnologie di fusione nucleare (*Schmitt, 2013*).

Dal punto di vista strategico e militare, il controllo delle infrastrutture lunari e delle orbite circumlunari è diventato una priorità per le principali potenze spaziali. Programmi come *Artemis* della NASA, le missioni cinesi *Chang'e* e il progetto russo *Luna-Glob* dimostrano un crescente interesse per la supremazia nello spazio cislunare (*Mandt et al., 2024*). È facile desumere, dalle precedenti considerazioni, che l'installazione di basi permanenti sulla Luna potrebbe non solo sostenere la ricerca scientifica,



ma anche garantire un vantaggio tecnologico ed economico alle nazioni che riusciranno a realizzarle.

Infine, la Luna rappresenta un ambiente ideale per la sperimentazione di nuove tecnologie (per esempio, di tipo abitativo) il cui sviluppo è propedeutico allo svolgimento di missioni con umani su Marte e, potenzialmente, anche oltre. Le condizioni di bassa gravità e l'esposizione alle radiazioni cosmiche offrono un laboratorio naturale per lo sviluppo di *habitat* spaziali, sistemi di supporto vitale e metodi di estrazione mineraria avanzata. La competizione per l'accesso e lo sfruttamento della Luna, pertanto, sarà tra le priorità strategiche di tutte le maggiori potenze spaziali per buona parte del XXI secolo, riportando la Luna a un rinnovato ruolo di frontiera della corsa allo spazio (*Spudis, 2016*).



Collaborazione Internazionale e Competizione nello spazio

Attualmente, il programma lunare più importante in fase di realizzazione è Artemis. Il programma, inizialmente concepito dalla NASA, rappresenta la più ambiziosa iniziativa di esplorazione lunare dagli anni del programma Apollo. Annunciato nel 2017 e formalizzato con il lancio degli Artemis Accords nel 2020, il progetto mira a stabilire una presenza umana sostenibile sulla Luna entro la fine del decennio, fungendo da banco di prova per le future missioni su Marte (Maltagliati, 2023).

Il progetto Artemis, che ha visto immediatamente coinvolti Giappone (JAXA), Canada (CSA), ESA e Australia, prevede accordi spaziali destinati a stabilire norme di comportamento, promuovere una cooperazione pacifica tra i Paesi e garantire il rispetto dell'ambiente spaziale attraverso la condivisione dei dati scientifici e l'accesso equo alla Luna.

Sebbene la Russia sia stata per lungo tempo partner dell'Europa e degli USA nella realizzazione della Stazione Spaziale Internazionale (ISS), l'attuale tensione geopolitica ha condotto il Paese ad allontanarsi progressivamente dalla NASA e dall'ESA e a collaborare più strettamente con la Cina. Quest'ultima ha in poco tempo stabilito un suo programma spaziale indipendente caratterizzato da una rapida crescita: oggi la Cina dispone di una sua stazione spaziale (la Tiangong), sette volte più piccola della ISS, ma realizzata in soli 2 anni (rispetto ai 13 anni richiesti dalla ISS), e ha sviluppato proprie missioni lunari, come la Chang'e. A valle degli eccellenti risultati già ottenuti nello scorso quinquennio, la Cina è in procinto di progettare una stazione lunare che prevede la presenza umana permanente sul satellite.

Alle attività delle agenzie governative si sono aggiunte quelle del settore privato, caratterizzate da costi più bassi e tempi di realizzazione più brevi, anche se è doveroso ricordare che l'attuale situazione geopolitica mette a rischio ogni impegno previsto alcuni anni fa, e che la prioritizzazione della colonizzazione di Marte potrebbe rappresentare un serio rischio al proseguimento del programma Artemis.

2 Missioni Lunari Programmate (2024-2044)

NASA: Programma Artemis

Il programma prevede inizialmente tre missioni: *Artemis I*, una missione senza equipaggio lanciata nel 2022 per testare lo *Space Launch System* (SLS) e la capsula *Orion* (George et al., 2024), della quale sono state analizzate in particolare le proprietà di schermatura dalle radiazioni nello spazio profondo; *Artemis II*, previsto

dapprima per il 2025 e rimandato al 2026, sarà il primo volo con equipaggio attorno alla Luna; è previsto, infine, che *Artemis III*, nel 2027, riporti gli astronauti sulla superficie lunare, effettuando un allunaggio nei pressi del polo sud, allo scopo di esaminare il ghiaccio d'acqua che la comunità scientifica ritiene vi si possa trovare. *Artemis I*, peraltro, ha anche lanciato in orbita il cubesat *ArgoMoon*, realizzato dall'azienda Argotec su contratto dell'Agenzia Spaziale Italiana.

Parte della strategia del programma Artemis è anche lo sviluppo della stazione spaziale *Lunar Gateway* (Smith et al., 2020), che verrà assemblata con il contributo delle missioni *Artemis IV*, *V* e *VI*. Si tratterà, nei piani dell'agenzia statunitense, di un avamposto orbitale destinato a facilitare l'accesso alla superficie lunare e a supportare missioni a lungo termine. Il programma, inoltre, si avvale di collaborazioni con partner commerciali come SpaceX, che fornirà il veicolo di allunaggio Starship, e con altre agenzie spaziali, tra cui ESA, JAXA e CSA, per lo sviluppo di moduli abitativi, rover e sistemi di supporto vitale.

Oltre al notevole contributo alla ricerca scientifica e alla sperimentazione tecnologica, Artemis si configura come una piattaforma e un'opportunità per l'espansione delle capacità operative e delle attività economiche nello spazio cislunare. L'estrazione e l'utilizzo delle risorse lunari, in particolare l'acqua per la produzione di propellenti, rappresentano obiettivi cruciali per la sostenibilità del programma e per la preparazione di missioni interplanetarie (Smith et al., 2020).



La navicella Orion.
Crediti ESA

ESA: Collaborazioni e missioni lunari

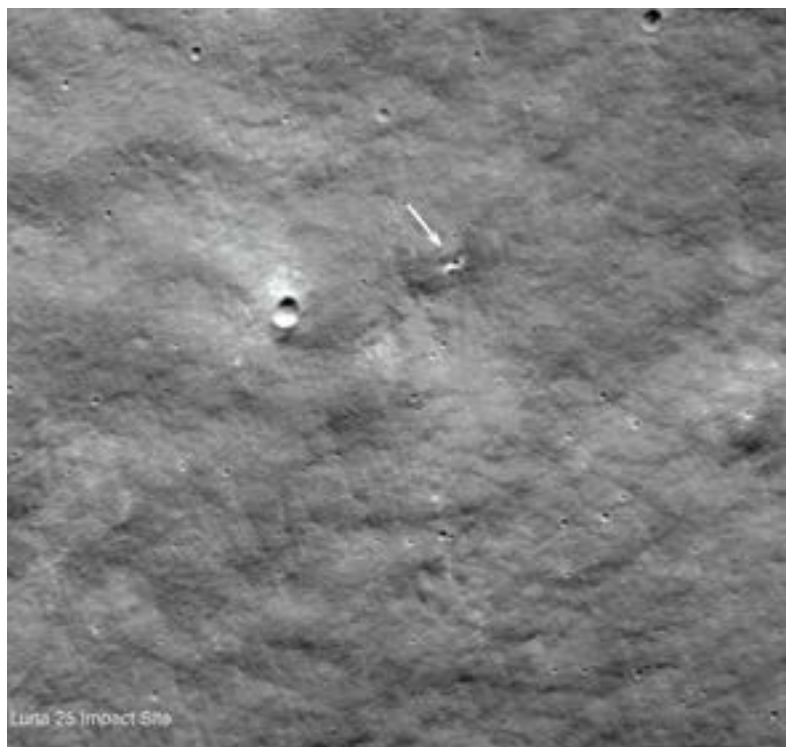
L'ESA partecipa attivamente alla nuova fase dell'esplorazione lunare, promuovendo lo sviluppo di tecnologie abilitanti e collaborando con altri enti spaziali, sia pubblici che privati. Le sue iniziative mirano soprattutto a sostenere il ritorno dell'umanità sulla Luna, la costruzione di infrastrutture permanenti e lo sfruttamento delle risorse lunari per future missioni interplanetarie (*Exploration of the Moon*, ESA, 2019).

Il contributo principale dell'ESA al programma Artemis della NASA è rappresentato dall'European Service Module (ESM) per la capsula *Orion*, che fornisce propulsione, energia e supporto vitale agli astronauti. L'ESA è, peraltro, coinvolta nello sviluppo

della già menzionata stazione orbitale *Lunar Gateway*, progettata per fungere da avamposto logistico per future missioni lunari e interplanetarie.

L'agenzia è impegnata anche in missioni autonome, come il progetto LUNA, un'iniziativa congiunta con il German Aerospace Center (DLR) per simulare condizioni lunari e testare tecnologie per *habitat* e sistemi di supporto vitale (Werkheiser & Sanders, 2023). Inoltre, l'ESA sta lavorando a un sistema di navigazione satellitare lunare, *Moonlight*, che fornirà servizi di posizionamento e telecomunicazione per missioni robotiche e con equipaggio (Ventura-Traveset, 2024). Altra missione autonoma degna di nota è quella che porterà il *lander Argonaut*, in fase di sviluppo, a garantire l'accesso europeo alla Luna a partire dal 2030 (ESA, 2023).

Quanto all'estrazione e all'uso delle risorse lunari, obiettivi condivisi dalla maggior parte degli attori internazionali, questi rappresentano un altro ambito di ricerca prioritario per l'ESA. Il progetto PROSPECT (*Package for Resource Observation and in-Situ Prospecting for Exploration, Commercial exploitation and Transportation*) studierà la possibilità di estrarre la regolite lunare, mentre altri concept di missione esplorano tecnologie per la produzione di acqua e ossigeno *in loco* (Werkheiser & Sanders, 2023). Attraverso queste iniziative, l'ESA si conferma come un attore di primo piano nel contesto dell'esplorazione lunare, contribuendo in maniera rilevante alla costruzione di una presenza umana sostenibile e alla preparazione di future missioni verso Marte (Crawford et al., 2024).



Il luogo dell'impatto di Luna 25 (immagine pagina accanto), fotografato il 26 agosto 2023 dal Lunar Reconnaissance Orbiter della NASA. Crediti: NASA

Il Programma lunare Russo

Il programma lunare della Federazione Russa rappresenta il tentativo di riprendere e modernizzare le storiche missioni sovietiche, che tra gli anni '50 e '70 fornirono i primi dati dettagliati sulla superficie della Luna. Le iniziative attualmente in corso, guidate da Roscosmos, mirano a consolidare la presenza russa nello spazio cislunare, a esplorare la disponibilità di risorse minerarie estraibili e a gettare le basi per la costruzione di una futura stazione



permanente, in maniera non dissimile da quanto detto per le altre agenzie spaziali (Johnson, 1995; Lardier, 2018).

La missione *Luna-25*, lanciata nell'agosto 2023, ha segnato il ritorno della Russia sulla Luna dopo quasi cinquanta anni. Il tentativo di atterraggio, tuttavia, è fallito a causa di un'anomalia nel sistema di propulsione che ha portato allo schianto del *lander* sulla superficie lunare (Jones, 2023). Nonostante questa battuta d'arresto, il programma proseguirà con *Luna-26*, una sonda orbitale prevista per la fine del decennio che mapperà la superficie lunare e studierà il campo magnetico locale. Seguiranno *Luna-27*, un *lander* progettato

per analizzare campioni di regolite estratti dalla regione polare e testare tecnologie di estrazione di acqua e altri volatili, e *Luna-28*, una missione robotica destinata a riportare dei campioni di materiale lunare sulla Terra (Qiao et al., 2024).

In parallelo, la Russia collabora con la Cina per il progetto della *International Lunar Research Station* (ILRS), una base lunare automatizzata prevista per gli anni '30, concepita come alternativa al programma *Artemis* della NASA. Il coinvolgimento di Roscosmos nel *Lunar Gateway*, al contrario, è stato sospeso a causa delle tensioni geopolitiche internazionali.

In conclusione, il programma lunare russo si inserisce in una più ampia strategia di espansione delle capacità spaziali della Federazione, con l'obiettivo di garantire un accesso indipendente alle risorse lunari e di riacquistare un ruolo centrale nella futura esplorazione interplanetaria.

Il Programma lunare Cinese

Il programma spaziale cinese, sviluppato dalla China National Space Administration (CNSA), è uno dei più ambiziosi del XXI secolo e ha visto una rapida progressione negli ultimi decenni. La strategia di esplorazione lunare della Cina è incentrata sul programma *Chang'e*, che prende il nome dalla divinità lunare della mitologia cinese,

e ha come obiettivo a lungo termine la costruzione di una base lunare permanente entro la fine degli anni '30.

Dal 2007 la serie di missioni *Chang'e* ha segnato importanti traguardi: *Chang'e-3* (2013) ha portato il primo *rover* cinese sulla superficie lunare, *Yutu*, mentre *Chang'e-4* (2019) ha effettuato il primo atterraggio sul lato nascosto della Luna, aprendo nuove prospettive per la ricerca geologica e radioastronomica. Nel 2020, *Chang'e-5* ha riportato sulla Terra campioni lunari per la prima volta dai tempi delle missioni sovietiche Luna degli anni '70 (Wang et al., 2021, Zhou et al., 2022). Nei prossimi anni, *Chang'e-6* raccoglierà ulteriori campioni dal bacino Polo Sud-Aitken, una delle regioni più antiche (e di maggior interesse, per la già ricordata presenza di acqua) della superficie lunare.

È da evidenziare anche che, parallelamente, la Cina partecipa allo sviluppo del progetto *International Lunar Research Station* (ILRS), precedentemente menzionato, in collaborazione con la Russia e altri partner internazionali. Questo avamposto, previsto per il 2035, sarà costituito da moduli robotizzati e, successivamente, da *habitat* per astronauti (Wu, 2023, Malenkov et al., 2025).

Un altro elemento chiave del programma lunare cinese è lo sviluppo di tecnologie finalizzate all'utilizzo di risorse *in-situ* (ISRU). I futuri *lander* e *rover* esploreranno le possibilità di estrazione e utilizzo del ghiaccio d'acqua lunare, sempre allo scopo di produrre ossigeno e idrogeno, da destinare alla produzione di propellenti per rifornire future missioni interplanetarie. La



Rappresentazione artistica del *lander* delle missioni Chang'e 5 e 6. Crediti: Wikimedia Commons

Cina ha, peraltro, annunciato l'intenzione di inviare astronauti sulla Luna entro il 2030, segnando un altro passo significativo nella competizione globale per la *leadership* nell'esplorazione lunare.

Il programma spaziale cinese si distingue per il suo approccio metodico e a lungo termine, combinando avanzamenti tecnologici con una strategia geopolitica mirata a consolidare la presenza della Cina nello spazio. Le prossime missioni organizzate dalla CNSA, pertanto, non solo contribuiranno a raffinare la conoscenza scientifica dell'ambiente lunare, ma definiranno anche gli equilibri futuri dell'esplorazione spaziale, rendendo il dominio spaziale ancora più "*competitive*", "*congested*" e "*contested*".

Il Programma lunare Indiano

L'India, attraverso la Indian Space Research Organisation (ISRO), ha consolidato la sua posizione tra le principali potenze spaziali mondiali grazie a un programma di esplorazione lunare sempre più ambizioso. Il percorso indiano verso la Luna è iniziato con *Chandrayaan-1* nel 2008, una missione orbitale che ha avuto un impatto particolarmente significativo sulla ricerca spaziale, fornendo la prima conferma diretta della presenza di acqua sulla superficie lunare grazie allo strumento Moon Mineralogy Mapper della NASA (*Padma, 2017*).

Successivamente, nel 2019, *Chandrayaan-2* ha cercato di compiere un atterraggio morbido vicino al polo sud lunare, ma il *lander Vikram* ha perso il contatto con la Terra poco prima di raggiungere la superficie (*Mehta, 2023*). Questo fallimento non ha scoraggiato l'ISRO, che ha lanciato con successo *Chandrayaan-3* nel 2023, realizzando il primo atterraggio controllato nei pressi del polo sud lunare. La missione ha permesso di raccogliere dati cruciali sulla composizione del suolo lunare e sulle condizioni ambientali, aprendo la strada a future esplorazioni più avanzate (*Vadawale et al., 2024*).

Le prospettive dell'esplorazione lunare indiana sono focalizzate su progetti ambiziosi, tra cui la missione *LUPEX* (Lunar Polar Exploration Mission), in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Giapponese



Il *lander Vikram* sulla superficie lunare fotografato dal *rover Pragyan*. Crediti: ISRO

(JAXA). Questo progetto prevede il lancio di un *rover* destinato a esplorare i depositi di ghiaccio d'acqua nei crateri lunari, con l'obiettivo di valutare il potenziale delle risorse locali per missioni spaziali di lunga durata.

L'India mira inoltre a sviluppare tecnologie per un programma con equipaggio umano, con il progetto *Gaganyaan*, che prevede il primo volo orbitale indiano con astronauti entro il 2026. Anche se inizialmente focalizzato sull'orbita terrestre bassa, il programma potrebbe fornire le competenze necessarie per una futura missione lunare con equipaggio.

Con un approccio caratterizzato da investimenti contenuti e un'elevata efficienza operativa, l'India è emersa, tramite la sua agenzia spaziale, come un attore di primo piano nella nuova corsa alla Luna. Oltre ad aver scoperto la presenza di acqua presso il polo Sud del satellite terrestre, risultato tale da polarizzare l'attenzione degli altri attori sulla regione, le missioni organizzate da ISRO rafforzano di anno in anno anche la sua posizione strategica nello scenario spaziale globale, ponendo le basi per potenziali, e più ampie, collaborazioni internazionali.

Altre missioni private internazionali

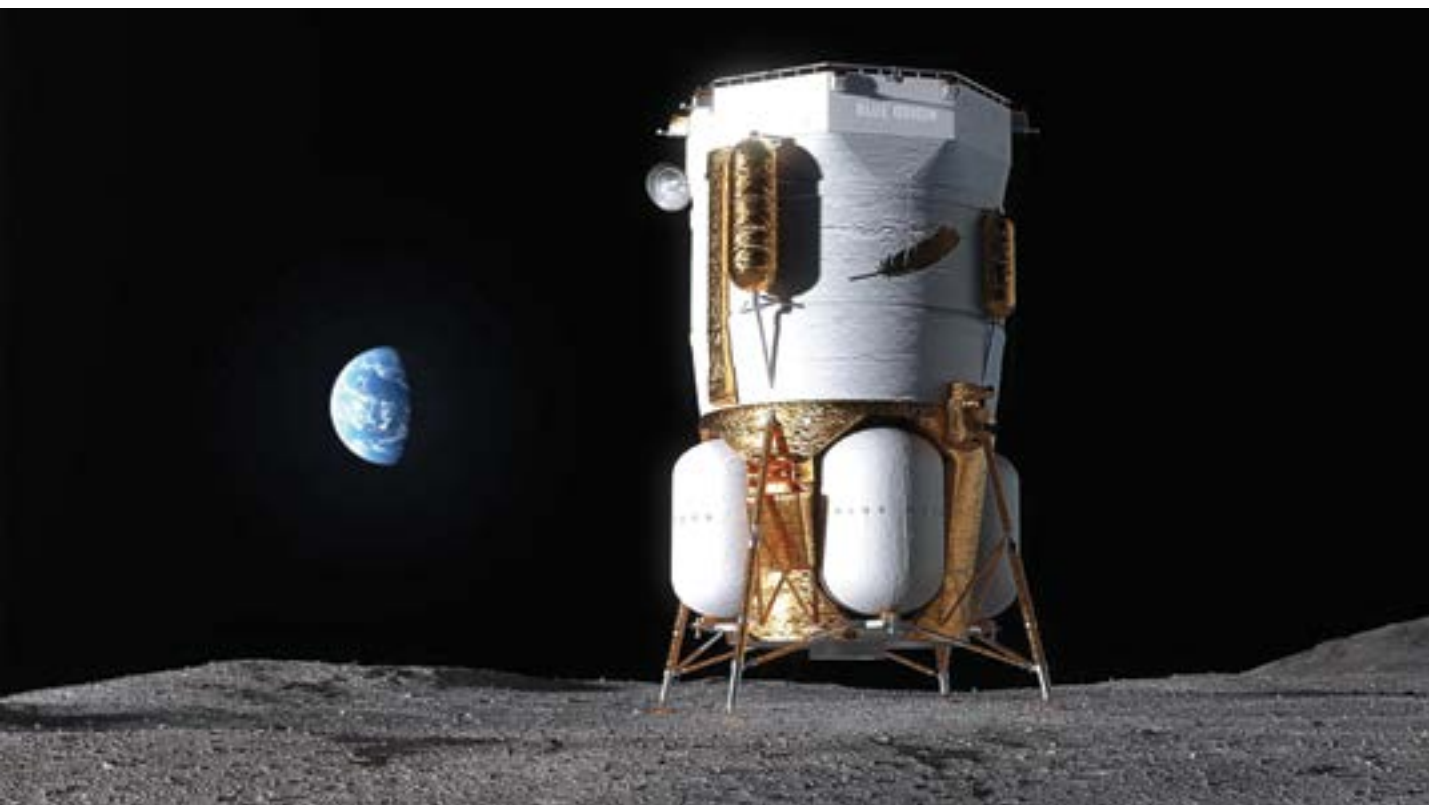
Negli ultimi anni il dominio spaziale ha assistito alla crescente partecipazione di attori privati nell'esplorazione lunare, segnando una trasformazione epocale che si allontana dal monopolio delle agenzie governative, il quale, invece, caratterizzò interamente la prima fase della corsa allo spazio e alla Luna (cfr. 1.1). Le missioni lunari commerciali si stanno sviluppando in diversi ambiti, dalla fornitura di servizi di trasporto spaziale fino all'estrazione di risorse e alla costruzione di infrastrutture permanenti sulla Luna. Tale processo enfatizza ancora di più quanto lo spazio si stia trasformando da un semplice dominio di ricerca a un dominio in grado di fornire capacità per il mercato, oltre che per i governi.

Uno dei principali programmi in questo ambito è il Commercial Lunar Payload Services (CLPS) della NASA, che finanzia aziende private per sviluppare e lanciare *lander* robotici e strumenti scientifici sulla Luna. Tra le aziende coinvolte vi sono Astrobotic Technology con il *lander* Peregrine, Intuitive Machines con il *lander* Nova-C, e Firefly Aerospace con Blue Ghost, il cui obiettivo è fornire servizi di trasporto e comunicazione per future missioni umane e robotiche (Wilmer et al., 2024).



Starship. Crediti SpaceX

Anche SpaceX gioca un ruolo fondamentale con lo sviluppo di Starship, il veicolo spaziale destinato a supportare il programma Artemis, oltre che missioni commerciali verso la Luna. Tra i progetti più ambiziosi figura dearMoon, un volo privato circumlunare finanziato dall'imprenditore giapponese Yusaku Maezawa.



Il lander Blue Moon. Crediti Blue Origin

Diverse altre aziende, parallelamente (come Blue Origin con il *lander Blue Moon*), stanno svolgendo ricerche sulle infrastrutture finalizzate allo sfruttamento delle risorse lunari e sulla costruzione di basi lunari.

Si segnala anche la start-up giapponese ispace, che ha lanciato la missione *Hakuto-R*, ovvero il primo tentativo (purtroppo fallito) di atterraggio lunare da parte di un'azienda privata non americana. Nel giugno 2025 la ispace ha ritentato l'allunaggio con la missione *Hakuto-R Mission 2*, (*Resilience*), che è nuovamente non andato

a buon fine: le comunicazioni con il *lander* sono state perse circa 90 secondi prima dell'atterraggio previsto e il *lander* si è con ogni probabilità schiantato sulla superficie lunare.

La commercializzazione dello spazio lunare apre nuove prospettive per la sostenibilità delle missioni a lungo termine, ma solleva anche questioni legali ed economiche riguardanti il diritto allo sfruttamento delle risorse e la governance dello spazio cislunare (Witze, 2023). Con l'aumento degli investimenti privati e la proliferazione di missioni commerciali, l'esplorazione lunare sta rapidamente evolvendo in un settore economico e di vantaggio competitivo ad alto potenziale (McKinney, 2024).



3 Infrastrutture e Tecnologie per la Luna

Stazioni orbitali lunari

È evidente, dal sommario delle iniziative spaziali attuate dai vari paesi coinvolti, che le stazioni orbitali lunari rappresentano un elemento chiave nelle strategie di esplorazione e colonizzazione del nostro satellite, fornendo un'infrastruttura critica per il supporto alle missioni umane e robotiche. Queste piattaforme serviranno come *hub* logistici, laboratori scientifici e basi di rifornimento per future missioni interplanetarie, riducendo la dipendenza dai lanci dalla Terra.



Il modulo di rifornimento e telecomunicazione ESPRIT. Crediti: Thales Alenia Space

Fra i progetti più avanzati in questo ambito ricordiamo i già citati *Lunar Gateway* e la *International Lunar Research Station* (ILRS).

Dal punto di vista tecnologico, le stazioni orbitali lunari richiedono soluzioni avanzate per la protezione dalle radiazioni cosmiche, la gestione dei rifiuti e la generazione autonoma di energia.

Il progetto *ESPRIT* dell'ESA, ad esempio, prevede lo sviluppo di un modulo di telecomunicazione e rifornimento per il *Lunar Gateway*, fondamentale per la sostenibilità delle operazioni in orbita lunare (Jess et

al., 2023). Inoltre, le stazioni orbitali lunari potranno ospitare telescopi per l'osservazione dell'Universo profondo, sfruttando l'assenza di disturbi atmosferici e l'isolamento dalla radiofrequenza terrestre.

L'implementazione di queste infrastrutture rappresenta un passo essenziale per la futura colonizzazione dello spazio.

La crescente cooperazione internazionale e l'ingresso di attori privati nel settore dell'esplorazione lunare suggeriscono che entro il prossimo decennio assisteremo alla realizzazione di stazioni orbitali in grado di supportare una presenza umana permanente oltre l'orbita terrestre (Witze, 2023).



Habitat lunari permanenti

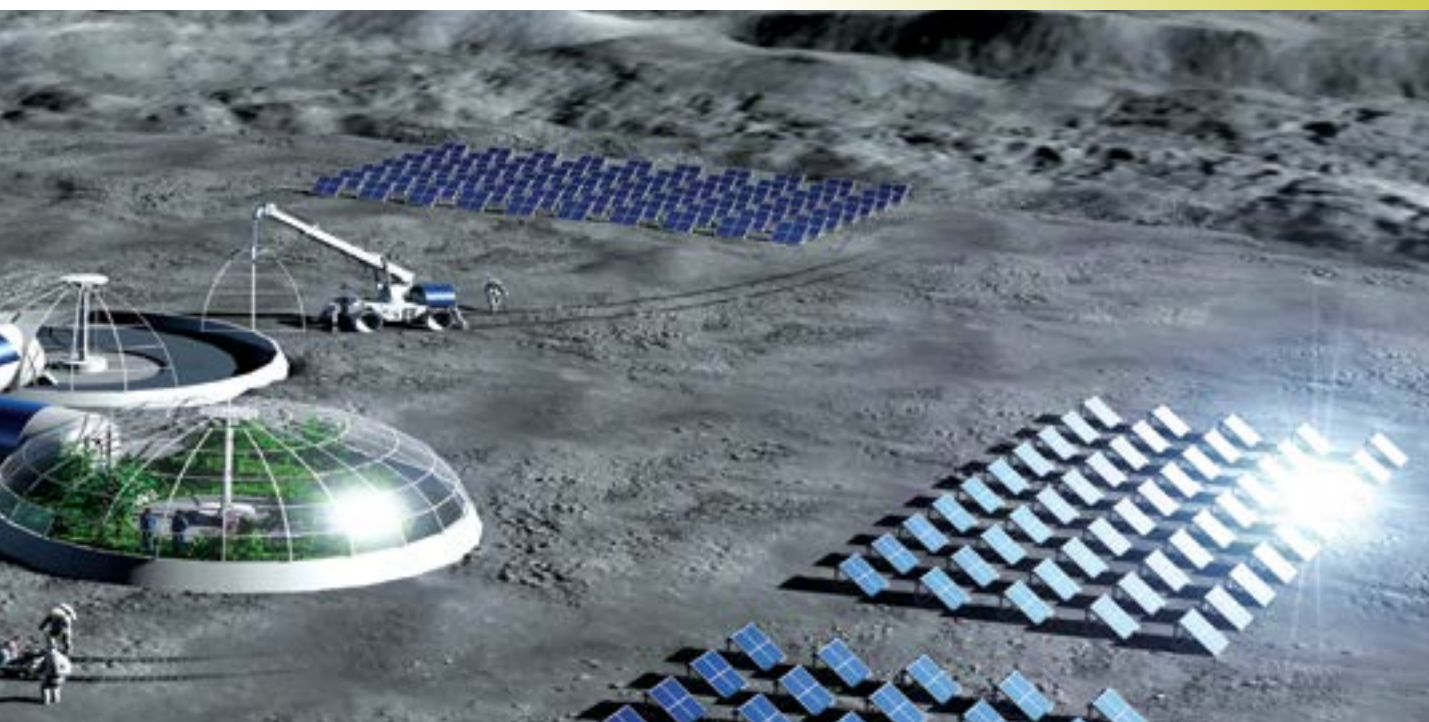
La nuova corsa all'esplorazione della Luna si impenna su un concetto di sostenibilità della stessa: non si torna più sul suolo lunare per dimostrare di esserne capaci, ma per garantirvi una presenza umana continuativa e stabile.

L'imprescindibile sostenibilità di una simile campagna di missioni necessariamente implica la predisposizione di *facility* adeguate al sostegno di una presenza umana di lungo periodo; dunque, vanno predisposti apparati per poter ospitare astronauti, si-

stemi in grado di produrre energia, *facility* e processi per estrarre risorse dai materiali presenti *in situ*, nonché per recuperare e riciclare i prodotti di risulta delle attività umane e gli scarti dei processi fisiologici.

Il nostro Paese, all'avanguardia nella realizzazione di moduli pressurizzati, (i.e. strutture modulari necessarie alla realizzazione di avamposti abitabili nello spazio quali la ISS e il Gateway), ha appaltato uno studio per la realizzazione di un modulo abitativo permanente da utilizzare come riparo per astronauti sulla superficie lunare.

Il progetto è stato inserito dalla NASA all'interno dell'architettura Moon 2 Mars, il piano di lungo termine dell'agenzia americana che stabilisce obiettivi, termini e requisiti della prossima campagna di esplorazione del nostro satellite naturale.



Concept di un avamposto lunare. Crediti: ESA - P. Carril.

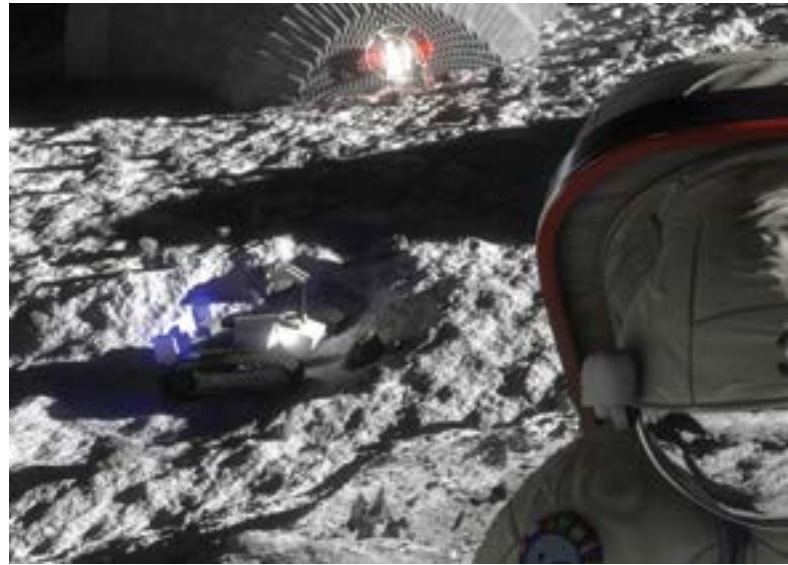
In un'ottica di presenza di lungo termine di astronauti in orbita e sulla superficie lunare, le nuove strutture abitative dovranno non solo provvedere al sostentamento dell'equipaggio, ma anche garantire i presupposti perché gli occupanti possano essere in condizioni di *comfort* adeguato all'intera durata della missione. Oltre agli aspetti di supporto alla vita e al benessere della *crew*, gli *habitat* lunari dovranno affrontare sfide complesse, quali la sopravvivenza alla notte lunare (più di 100 ore di assenza di luce saranno un *driver* chiave per la realizzazione di sistemi di generazione di energia, nonché per il controllo della temperatura in modo da garantirne livelli adeguati alla sopravvivenza dell'equipaggio e dei sistemi), protezione e contromisure per gli effetti della polvere lunare, trasferimenti da un modulo all'altro, capa-

cità dei moduli di autosostenersi e autoripararsi in assenza di equipaggio, gestione dei rischi connessi alla presenza di alta concentrazione di ossigeno negli ambienti pressurizzati (e dunque connessi rischi di infiammabilità), limitate possibilità di trasporto da Terra (per il sostentamento) e di rientro a Terra (per situazioni emergenziali), protezione da radiazioni, ottimizzazione delle interazioni uomo-macchina. Non ultimo, in considerazione dell'enorme ostacolo posto dall'impegno finanziario associato a una impresa esplorativa che contempla la presenza umana, la realizzazione di un complesso abitabile sulla superficie lunare dovrà poter trovare sostegno in capitali privati; andranno stimolati e sostenuti nuovi mercati che favoriscano la crescita del valore e l'accesso di investitori privati al settore.

Requisiti per la tutela della salute

Il ritorno e la permanenza sulla Luna comportano importanti sfide dal punto di vista della tutela della salute e dell'assistenza medica. In un ambiente così ostile è tutt'altro che facile mantenere lo stato di salute e la "performance" degli astronauti, cercando di assicurare livelli di assistenza medica più vicini possibile agli standard terrestri.

Nonostante l'elevato livello di conoscenze che è stato possibile acquisire dai tempi delle prime attività spaziali umane, sussistono tuttora *knowledge gap* importanti sugli effetti che una permanenza prolungata nello spazio può comportare per gli organismi viventi. In un approccio olistico e integrato, le interconnessioni tra i diversi ambiti delle scienze della vita sono oggi studiate con una attenzione maggiore che in passato, in modo da garantire una visione completa e approfondita. La salute umana è oggi considerata in modo integrato con la psicologia, la scienza dell'alimentazione, e le interazioni con altri organismi. I requisiti per la tutela della salute durante le missioni di esplorazione lunare non sono stati ancora completamente definiti. Piuttosto, partendo dai requisiti esistenti per le attuali missioni sulla ISS e dai cinque livelli di assistenza, definiti in base alla crescente complessità del supporto assistenziale richiesto (NASA-STD-3001), si è avviato un processo sistematico che mira alla definizione di nuovi requisiti e concetti operazionali per lo sviluppo di un sistema medico



che consideri gli aspetti etici, i rischi, la capacità di implementare gli strumenti, le risorse e i programmi di formazione necessari per supportare le operazioni mediche in situazioni estreme come quelle dell'ambiente lunare.

Le condizioni ambientali della superficie lunare sono proibitive per l'organismo umano sotto diversi aspetti:

- Non sono presenti un'atmosfera né un campo magnetico, che sulla Terra offrono schermatura dalle radiazioni ionizzanti, a cui dunque sulla Luna gli astronauti sono esposti in misura decisamente maggiore. La superficie della Luna è esposta a tre tipi di radiazioni: il vento solare, le eruzioni solari e i raggi cosmici galattici. L'effetto delle radiazioni ionizzanti sulla salute umana è continuo e cumulativo.
- La superficie lunare è caratterizzata da una maggiore esposizione alla caduta di



Crediti: ESA

meteoriti, in assenza di una protezione atmosferica come sulla Terra.

- La temperatura varia da circa -170 a +110 gradi Celsius nel corso di un ciclo giorno/notte lunare, la cui durata è pari a circa 29 giorni terrestri.
- La superficie della Luna è coperta da uno strato con spessore variabile da 4 a 10 metri di polvere lunare o "regolite", che è tossica e dannosa per le vie aeree, la cute, le mucose, gli occhi, e complica il processo di guarigione in caso di ferite.
- Sulla Luna la gravità è un sesto di quella terrestre.
- In assenza di atmosfera, non è presente ossigeno.

Quindi, un requisito indispensabile per la presenza dell'uomo in un ambiente così ostile è la realizzazione di adeguati sistemi

protettivi, sigillati e isolati termicamente, che spaziano dai dispositivi per la protezione personale (tute) agli edifici in cui trovare riparo. Sono stati proposti vari tipi di schermature, sia permanenti, per futuri insediamenti, che mobili, per attività di superficie di breve durata. Sono allo studio progetti per la creazione di moduli abitativi gonfiabili all'interno di cavità naturali nella lava basaltica: i *Moon Lava Tubes*, scoperti nella regione equatoriale della Luna con la missione SELENE, offrono infatti una temperatura stabile e una protezione naturale sia dalle radiazioni che dall'impatto dei meteoriti e si sta quindi attentamente valutando, in considerazione dei problemi di accessibilità e dei rischi di instabilità, la possibilità di pressurizzare piccoli *lava-tubes* con aria respirabile senza alterarne l'integrità strutturale. Una proposta non necessariamente alternativa ai *lava-tubes* riguarda l'applicazione di tecniche di manifattura additiva che possano utilizzare la regolite come materiale di base per la

costruzione di *habitat* e strati schermanti; anche questa soluzione, però, richiede un approfondito studio di fattibilità, in ragione dell'alta tossicità della regolite. Inoltre, alcuni tipi di regolite contengono materiale radioattivo e quindi andrebbero evitati. Ovviamente, qualsiasi tipo di insediamento, oltre a richiedere moduli abitativi adeguati, necessiterebbe di sistemi di supporto vitale, sistemi per l'approvvigionamento di acqua ed energia e per le comunicazioni, come già puntualizzato in altri paragrafi.

Le tute spaziali per l'ambiente lunare utilizzate durante le missioni Apollo hanno evidenziato diversi svantaggi: scomodità, difficoltà nei movimenti, tempi lunghi per indossarle e svestirle, ciclo di lavoro limitato, frequente necessità di riparazione e di pezzi di ricambio e insufficiente schermatura dalle radiazioni, che è un problema di importanza cruciale. Pertanto, operatori pubblici e privati stanno studiando tute pressurizzate più confortevoli e resistenti, che offrono un livello di mobilità maggiore, più isolanti per la temperatura e per le infiltrazioni di polvere lunare e – requisito fondamentale – più schermanti nei confronti delle radiazioni. Axiom Space e Prada hanno presentato all'International Astronautical Congress, svoltosi nell'ottobre 2024 a Milano, le tute per attività extraveicolari disegnate per la missione Artemis III della NASA. Anche la China Manned Space Agency (CMSA) ha recentemente presentato la sua prima tuta spaziale lunare specificamente progettata

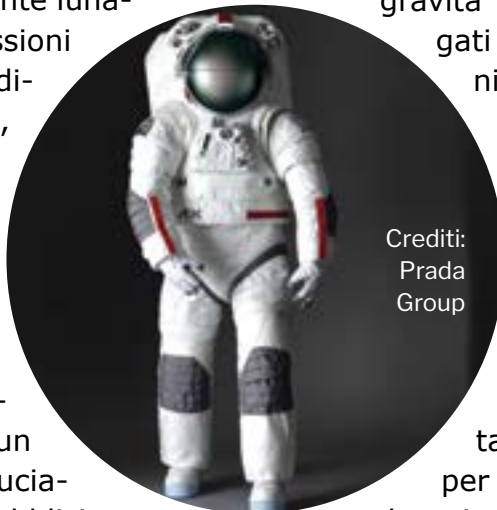
per gli sbarchi sulla Luna in missioni con equipaggio.

Le attività di superficie necessiteranno anche di veicoli robotizzati, tele-operati e opportunamente schermati, che ridurrebbero i rischi, fornirebbero una migliore protezione dei soggetti impegnati nelle attività e ridurrebbero il loro affaticamento, consentendo turni di lavoro prolungati.

Sulla Luna la gravità è un sesto di quella terrestre. Gli effetti che l'esposizione a

gravità ridotta per tempi prolungati possono avere sull'organismo umano sono stati a lungo studiati, anche se non del tutto chiariti. Tuttavia, la maggior parte degli studi è stata svolta in condizioni di microgravità, mentre i dati sugli effetti dell'esposizione prolungata a gravità ridotta sono insufficienti. Misure per contrastare gli effetti della microgravità, come l'esercizio

fisico o l'assunzione di specifici farmaci, sono già applicate sulla ISS. Da anni è stato proposto l'uso di grandi centrifughe per contrastare gli effetti della microgravità e della gravità ridotta, ma sono necessari studi per definire i livelli di ipergravità e i tempi di esposizione efficaci. Sono in corso di valutazione anche gli impatti sulla salute degli astronauti, e le contromisure da adottare, per esposizione a livelli di gravità diversi nel corso della stessa missione, nel passaggio dalla orbita intorno alla Luna o dalla fase di transito tra la Terra alla superficie lunare.



Crediti:
Prada
Group

Strutture per l'assistenza medica e la gestione delle emergenze medico-chirurgiche

Esistono "relativamente" pochi studi sulla progettazione di un *habitat* per l'assistenza medica concepito per le future missioni di esplorazione spaziale di lunga durata e per insediamenti umani sulla Luna e, successivamente, su Marte. In questo tipo di scenari, dove aumenta la probabilità di situazioni di emergenza medico-chirurgica, la distanza dalla Terra preclude la possibilità di evacuazione medica in tempi utili, non consente comunicazioni in tempo reale per consulti né il rifornimento di materiale di consumo e medicinali; di conseguenza, queste "infermerie spaziali" sono indispensabili per garantire non solo la sopravvivenza dell'equipaggio, ma anche per poterlo mantenere in condizioni confortevoli adeguate al livello di attività da svolgere. I concetti che si stanno elaborando per la creazione di strutture di assistenza medica dovrebbero poter supportare missioni di lunga durata (fino a 1200 gg) con equipaggio. Per la progettazione di queste strutture, il cui obiettivo è quello di garantire un livello di assistenza almeno equivalente a quello della ISS (ma dovrebbe essere superiore), si è tenuto conto delle *facilities* attualmente presenti sulla ISS, e anche delle *facilities* e delle capacità medico-chirurgiche in ambienti estremi terrestri,

come gli scenari di combattimento.

I modelli mettono a fuoco alcuni punti fondamentali che riguardano il collocamento della struttura di assistenza medica,

che deve essere facilmente individuabile, raggiungibile e accessibile, le caratteristiche architettoniche, l'ambiente di lavoro (si opererà in condizioni di gravità parziale), la strumentazione medica a disposizione, le procedure operative e gli aspetti igienici (Tab. 1). Si dovrà anche tener conto del fattore umano: solo casualmente coloro che dovranno operare in questi *habitat* saranno medici e chirurghi, più probabilmente saranno membri dell'equipaggio che hanno ricevuto un apposito *training*.

Il NASA-STD-3001 presenta un elenco di capacità mediche necessarie in base alla destinazione e alla durata della missione. Le missioni lunari (> 30 giorni) e le missioni su Marte sono classificate rispettivamente come Medical level of Care IV e V e, pertanto, richiederebbero come capacità mediche base il supporto vitale avanzato (ad esempio, la capacità di stabilizzare e/o recuperare l'equipaggio in condizioni critiche), l'assistenza odontoiatrica, l'assistenza chirurgica, ed altre. La progettazione dell'*habitat* per l'assistenza medica deve prevedere volumi di stivaggio per materiali e farmaci, carrelli per attrezzature portatili, superfici dispiegabili e apparecchiature fisse, un ecografo e un tavolo di trattamento potenzialmente riconfigurabile. La progettazione del tavolo di trattamento è



complessa: l'orientamento attuale è pensarla come una barella chirurgica mobile che consenta: a) il trasporto del paziente dal sito di infortunio alla struttura di assistenza medica, anche senza la collaborazione del paziente stesso; b) il trattamento del paziente in varie posizioni; c) la possibilità, per gli operatori, di accedere al paziente da tutti i lati.

In ambiente medico-sanitario, gli aspetti igienici sono fondamentali. Le superfici dovrebbero essere facili da pulire e disinfettare. È indispensabile prevedere le capacità di controllo e contenimento delle infezioni e avere la possibilità di isolare il paziente infetto. La progettazione e sistemazione dei servizi igienici dovrebbe poter consentire il lavaggio antisettico degli operatori e la pulizia degli strumenti medico-chirurgi-

ci. Un altro aspetto cruciale è la gestione dei rifiuti, in particolare di quelli biologici, chimici, infetti, contaminati da polveri e/o sostanze tossiche, radioattivi. Infine, anche la gestione di un soggetto deceduto all'interno dell'*habitat* per l'assistenza medica deve essere attentamente pianificata.

La maggior parte delle strutture di assistenza medica spaziale progettate fino a ora prevede la presenza di un singolo paziente. È evidente che le future missioni di esplorazione spaziale proporranno scenari in cui è possibile che vi siano più pazienti contemporaneamente. Quindi, le strutture in via di progettazione devono avere la capacità di gestire sia un singolo paziente politraumatizzato sia più membri dell'equipaggio infortunati o affetti da patologie di vario tipo.

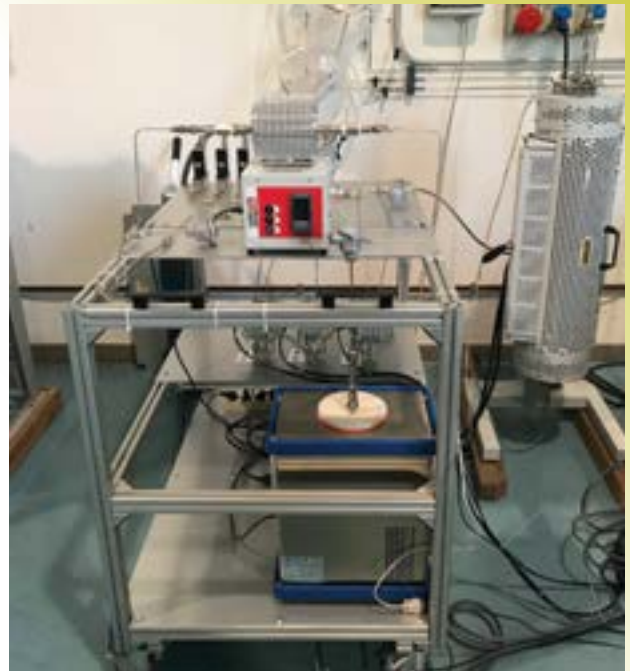
Tab 1. L'assistenza medica nello spazio, strumentazione, procedure e igiene

CATEGORIE	PUNTI CHIAVE
Caratteristiche Architetture	<ul style="list-style-type: none"> • La dimensione dell'area adibita alle cure mediche dipende da diversi fattori, ad esempio, dalla dimensione dell'equipaggio, dalla durata della missione etc...; • Le strategie operative in caso di emergenza influenzano anche la progettazione dell'area di assistenza medica ad esempio, scenari nei quali più membri di un equipaggio siano impossibilitati ad operare e necessitano di assistenza medica contemporaneamente
Ambiente di lavoro e fattori di rischio	In condizioni di microgravità, è necessario fornire misure di contenimento sia al paziente che all'operatore sanitario, ed infine anche all'attrezzatura durante tutto il tempo del trattamento
Operazioni	<ul style="list-style-type: none"> • L'attrezzatura medica deve essere semplice da usare anche con un training minimo; • Gli strumenti decisionali aiutano l'equipaggio a eseguire in modo efficiente le operazioni mediche di emergenza • Alcuni materiali medici di consumo richiedono un controllo ambientale per conservarsi al meglio (ad esempio, la temperatura)
Servizi-Igienico Sanitari	<ul style="list-style-type: none"> • Le capacità di assistenza medica autonoma sono necessarie per le missioni di esplorazione spaziale a causa del supporto limitato in real-time dalla Terra • Necessario sviluppare una strategia e una struttura per affrontare la perdita di un membro dell'equipaggio
Servizi-Igienico Sanitari	È necessario individuare una procedura per la gestione dei rifiuti speciali (ad esempio, sangue, fluidi corporei), dei dispositivi medici in dotazione all'equipaggio (ad esempio, siringhe) al fine di prevenire infortuni, la trasmissione di malattie etc...

Rover e veicoli per l'esplorazione della superficie

I *rover* lunari rappresentano strumenti fondamentali per l'esplorazione della superficie selenica, consentendo il trasporto di carichi scientifici, la raccolta di campioni e l'installazione di strumenti. Le missioni Apollo hanno aperto la strada con il Lunar Roving Vehicle (LRV), che ha permesso agli astronauti di esplorare aree più vaste rispetto a quelle raggiungibili a piedi. Le tecnologie odierne puntano a veicoli autonomi e teleoperati dotati di capacità avanzate di navigazione autonoma, riconoscimento degli ostacoli e adattamento al terreno irregolare. I moderni *rover* sono progettati per resistere a condizioni ambientali estreme, incluse le escursioni termiche che vanno da -173°C durante la notte lunare a $+127^{\circ}\text{C}$ durante il giorno.

Esempi recenti includono il *rover* cinese Yutu-2, il primo a esplorare il lato nascosto della Luna, e il progetto NASA VIPER, che esplorerà il polo sud lunare alla ricerca di ghiaccio d'acqua utilizzando strumenti come il Neutron Spectrometer System e il Trident Drill. Le sfide principali per i *rover* includono la gestione delle polveri abrasive che possono danneggiare i meccanismi mobili e i componenti elettronici, oltre alla necessità di sistemi energetici affidabili, come pannelli solari avanzati e batterie ad alta capacità.



Impianto per l'estrazione dell'acqua dalla regolite.
Crediti: PoliMI

Tecnologie di estrazione e utilizzo delle risorse lunari (ISRU)

Le tecnologie di *In-Situ Resource Utilization* (ISRU) sono cruciali per garantire la sostenibilità delle missioni lunari a lungo termine, riducendo la dipendenza dai rifornimenti terrestri. L'estrazione di ghiaccio d'acqua dai crateri polari rappresenta una risorsa vitale per le future missioni lunari; l'acqua può essere utilizzata direttamente per il consumo umano oppure dissociata in ossigeno e idrogeno tramite elettrolisi al fine di fornire aria respirabile e propellente per razzi.

Oltre all'acqua, la regolite lunare è una fonte abbondante di ossigeno. Tecniche come la riduzione carbotermica e l'elettrolisi della regolite fusa permettono di estrarre ossigeno, mentre altri elementi come ferro, alluminio e silicio possono essere recuperati per costruzioni e produzione di strumenti. Il Politecnico di Milano, ad esempio, in collaborazione con OHB Italia, sta sviluppando un sistema per estrarre ossigeno dalla regolite lunare. Questo processo, chiamato ORACLE (Oxygen Retrieval Asset by Carbothermal-reduction in Lunar Environment), permette di produrre ossigeno direttamente sulla Luna, consentendo l'utilizzo per supportare le future missioni spaziali e la creazione di infrastrutture lunari. Inoltre, progetti come il NASA ISRU Demonstration Mission mirano a testare l'insieme delle tecnologie menzionate direttamente sulla superficie lunare, validando processi di estrazione e raffinazione.

Un ulteriore ambito di ricerca riguarda la produzione di materiali da costruzione, come mattoni sinterizzati o strutture stampate in 3D utilizzando regolite locale. Questo approccio potrebbe consentire la costruzione di *habitat* e infrastrutture direttamente sul suolo lunare.



Gli scienziati dell'ESA ispirandosi alle costruzioni LEGO, hanno utilizzato la polvere di un meteorite per stampare in 3D dei "mattoncini spaziali" per costruire sulla Luna. Crediti: ESA

Tecnologie per la produzione di energia per missioni di lunga durata

La produzione di energia affidabile e continua è essenziale per le missioni lunari di lunga durata, specialmente per basi permanenti. I sistemi fotovoltaici rappresentano la soluzione primaria grazie alla disponibilità di luce solare sulla superficie lunare, in particolare presso i poli dove alcune aree ricevono illuminazione quasi continua.

Tuttavia, le lunghe notti lunari, che durano circa 14 giorni terrestri, pongono sfide significative.

I reattori nucleari a fissione, come il progetto NASA Kilopower, offrono una soluzione promettente grazie alla loro capacità di fornire energia stabile e continua indipendentemente dalle condizioni ambientali.

Il Kilopower utilizza un reattore a uranio-235 con un sistema Stirling per convertire il calore in elettricità.

Altre tecnologie in sviluppo includono le celle a combustibile rigenerative, che possono immagazzinare energia prodotta durante il giorno per l'uso notturno, e le batterie ad alta capacità progettate per resistere agli ambienti estremi della Luna.

Esistono anche studi sulla possibilità di installare sistemi di trasmissione di energia tramite microonde o laser per alimentare a distanza le basi lunari.

Sistemi rigenerativi fisico-chimici per il supporto vitale

L'obiettivo di rendere sostenibili le prossime missioni di esplorazione lunare non può prescindere dai sistemi di supporto vitale rigenerativi (Life Support Systems, LSS), sia in termini di ottimizzazione delle tecnologie esistenti sia nell'identificazione di nuovi approcci. Questi sistemi devono garantire la degradazione dei rifiuti organici, la rimozione dell'anidride carbonica, il rilascio di ossigeno e la purificazione dell'acqua, riducendo la dipendenza dai rifornimenti terrestri e migliorando la sostenibilità delle missioni.

Questi processi possono essere realizzati anche senza il contributo degli organismi viventi che, al loro volta, sono elemento imprescindibile per altri processi, quali per esempio la produzione di cibo fresco per astronauti; in questo caso si parla di sistemi biorigenerativi, che saranno presentati nel successivo paragrafo.

Il Sistema di Controllo Ambientale e di Supporto Vitale (ECLSS) della ISS rappresenta un modello di riferimento, utilizzando processi fisico-chimici per il riciclo dell'acqua tramite distillazione e filtrazione, e per la rimozione della CO_2 dall'atmosfera tramite filtri a zeolite e sistemi Sabatier, che convertono l'anidride carbonica in acqua e metano. Questi sistemi presuppongono comunque un rifornimento periodico da



L'astronauta Frank De Winne con l'unità di distillazione dell'Urine Processor Assembly (UPA). Crediti: NASA

Terra di acqua, nonché di ossigeno e idrogeno ad alta pressione. A oggi si è stati in grado di dimostrare la capacità di recuperare il 98% dell'acqua a bordo della ISS; il livello di ossigeno recuperato dalla CO_2 si attesta viceversa sul 50%. In vista delle future esplorazioni lunari, sono allo studio tecnologie per incrementare a più del 75% questo valore, con un obiettivo ideale di recupero del 100% dell'ossigeno dai processi respiratori degli astronauti.

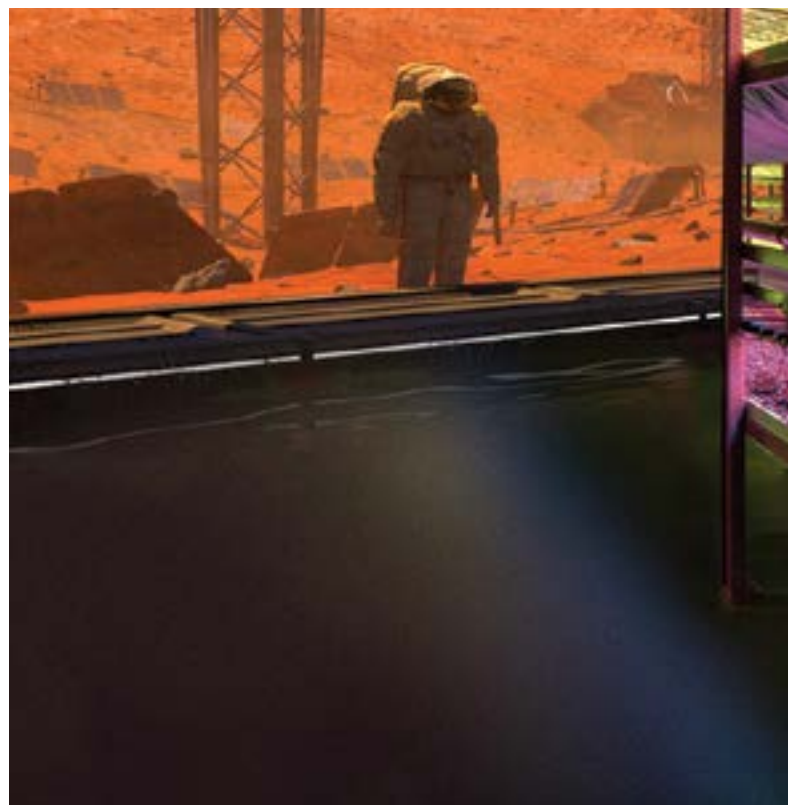
Anche la gestione dei rifiuti solidi è oggetto di studio, con tecnologie che prevedono la loro trasformazione in materiali utili o combustibili.

L'efficienza energetica di questi sistemi è cruciale per ridurre il carico energetico complessivo della base lunare, così come la loro affidabilità e facilità di manutenzione.

Sistemi biorigenerativi di supporto alla vita

I Sistemi Biorigenerativi di Supporto alla Vita (BLSS) costituiscono una tecnologia strategica per la realizzazione di missioni spaziali di lunga durata e per la costruzione di *habitat* umani autonomi su corpi celesti come la Luna e Marte. A differenza dei sistemi fisico-chimici, che si basano su processi tecnologici per il riciclo delle risorse, i BLSS integrano organismi viventi - tra cui batteri, microalghe e piante superiori - all'interno di cicli chiusi, finalizzati alla rigenerazione delle risorse ambientali (aria e acqua) e alla produzione di cibo. Questi sistemi si ispirano ai principi dell'ecologia e riproducono le dinamiche funzionali degli ecosistemi terrestri, basandosi sull'interazione tra esseri umani, microrganismi e organismi fotosintetici, ospitati in compartimenti specifici. In ciascun compartimento, i sottoprodotti di un organismo diventano risorsa per un altro, in un ciclo chiuso ideale. In particolare, gli organismi fotoautotrofi assimilano anidride carbonica e rilasciano ossigeno tramite la fotosintesi; i rifiuti organici vengono trattati biologicamente per essere trasformati in nutrienti utili alle colture; l'acqua, invece, è rigenerata attraverso processi combinati di traspirazione, evaporazione, condensazione e filtrazione biologica.

I BLSS rappresentano un'evoluzione rispetto ai sistemi puramente fisico-chimici, grazie all'integrazione di componenti biolo-



giche, da cui deriva il termine *biorigenerativi*. Sono concepiti come sistemi circolari e il termine di supporto alla vita ne descrive l'obiettivo: non solo fornire cibo, ma garantire un ambiente vitale stabile e sostenibile per l'equipaggio umano. Rispetto ai sistemi fisico-chimici, i principali vantaggi dei BLSS sono rappresentati da:

- **Autonomia operativa:** riduzione della dipendenza da rifornimenti terrestri, aspetto essenziale per missioni di lunga durata o insediamenti extra-planetari permanenti.
- **Circolarità:** massimizzazione dell'efficienza nell'uso delle risorse e dell'energia, attraverso la chiusura dei cicli, riducendo ridurre al minimo gli scarti.



L'Adaptive Vertical Farm per la coltivazione di piante e verdure nello spazio. Crediti: Space V

- **Supporto psicologico:** la presenza di vegetazione contribuisce al benessere psicofisico dell'equipaggio, riducendo stress e senso di isolamento.

I BLSS sono sistemi complessi e la loro realizzazione presenta importanti sfide scientifiche e tecnologiche, tra cui:

- **Protezione dalle radiazioni:** gli organismi viventi sono vulnerabili alle radiazioni cosmiche; per questo motivo, gli *habitat* destinati a ospitarli dovranno essere dotati di sistemi di schermatura altamente efficaci, in grado di garantire condizioni di sicurezza per la loro sopravvivenza e funzionalità.

- **Controllo ambientale:** la gestione di parametri ambientali critici (pressione e composizione atmosferica, temperatura, umidità, illuminazione) richiede sistemi avanzati di monitoraggio e automazione.

- **Gestione integrata delle risorse:** l'equilibrio tra flussi energetici e cicli di nutrienti impone lo sviluppo di modelli predittivi e algoritmi di controllo complessi che integreranno le potenzialità dell'intelligenza artificiale (IA).

- **Selezione degli organismi:** è fondamentale individuare organismi biologici resilienti, capaci di sopravvivere e proliferare in condizioni ambientali estreme. È inoltre necessario selezionare e migliorare specie

e varietà vegetali che combinino un'elevata efficienza fotosintetica con la capacità di produrre alimenti ad alto valore nutrizionale.

Il progetto MELiSSA (*Micro-Ecological Life Support System Alternative*), promosso ESA a partire dal 1987 e formalizzato nel 1989, è il programma europeo per lo sviluppo di sistemi rigenerativi a ciclo chiuso per il supporto alla vita in missioni spaziali con equipaggio con un approccio ecosistemico. L'obiettivo primario è riprodurre, in forma tecnologicamente avanzata e affidabile, le funzioni ecologiche di un ecosistema acquatico terrestre per rigenerare aria, acqua e alimenti a partire dai rifiuti organici prodotti dalla missione (es. urina, CO₂, scarti organici solidi).

MELiSSA si articola in compartimenti funzionali, ciascuno dei quali ha un compito specifico: degradazione dei rifiuti, nitrificazione, rigenerazione dell'aria (rimozione di CO₂ e produzione di O₂), recupero delle risorse ambientali (aria e acqua), produzione di cibo e interazione con l'equipaggio (consumatori). Ogni compartimento è caratterizzato da comunità microbiche o specie vegetali, ed è oggetto di ricerche per ottimizzarne le prestazioni all'interno di un ciclo chiuso. Nel 2009, presso l'Università Autonoma di Barcellona, è stato istituito il MELiSSA Pilot Plant (MPP), che consente la validazione sperimentale del sistema a scala ridotta. Il MPP comprende fotobioreattori colonizzati da un cianobatterio (la spirulina), un compartimento per la coltivazione piante superio-

ri in condizioni controllate, tre bioreattori microbici e una camera per l'equipaggio (simulato con roditori). I dati ottenuti suggeriscono che, in condizioni di piena integrazione, il sistema MELiSSA può garantire il completo riciclo di aria e acqua coprendo fino al 50% del fabbisogno alimentare dell'equipaggio.

L'Italia riveste un ruolo centrale nel progetto MELiSSA grazie al coinvolgimento dell'Università di Napoli Federico II, partner ufficiale del consorzio dal 2013. Il Dipartimento di Agraria ospita il *Laboratory*

of Crop Research for Space, nato nel 2019 dalla collaborazione con ASI ed ESA, dotato di una Plant Characterization Unit (PCU), progettata nel contesto del progetto PAC-MAN (PIAnt Characterization unit for closed life support system - engineering, MANufacturing and testing).

La PCU permette il monitoraggio continuo dei parametri ambientali e fisiologici delle piante, fornendo dati cruciali per la progettazione di BLSS efficienti.

Nell'ambito dei BLSS, una linea di ricerca promettente riguarda la *In-Situ Resource Utilization* (ISRU), ovvero l'impiego di risorse disponibili in loco (es. regolite, ghiaccio, CO₂ atmosferica) per la realizzazione di sistemi autosufficienti, riducendo la necessità di rifornimenti dalla Terra. La regolite, inoltre, opportunamente gestita, potrebbe svolgere un ruolo chiave, sia come substrato per la coltivazione che come materiale per costruire infrastrutture di supporto.



Crediti: ESA/NASA



Il primo germoglio di cotone nato sulla Luna. Crediti: Chinese Lunar Exploration Program, Chongqing University

Sistemi di produzione di vegetali sulla superficie lunare

La coltivazione di piante sulla Luna rappresenta una sfida cruciale per lo sviluppo di insediamenti umani sostenibili nello spazio. Gli esperimenti di biologia vegetale in ambienti lunari mirano a comprendere come la gravità alterata, le radiazioni cosmiche, la regolite lunare e l'interazione tra questi fattori influenzino la crescita e lo sviluppo delle piante. La capacità di coltivare vegetali *in-situ* ridurrebbe la dipendenza dalle risorse terrestri, fornendo cibo, ossigeno e acqua purificata per gli astronauti, oltre a contribuire al riciclo dell'anidride carbonica e degli scarti organici.

Un esperimento significativo in questo ambito è stato condotto dalla missione cinese Chang'e-4, che nel 2019 ha trasportato sulla faccia nascosta della Luna un mi-

ni-biosistema contenente semi di cotone, colza, patata e *Arabidopsis*, oltre a uova di moscerino della frutta e lieviti (Wang et al., 2021, Zhou et al., 2022). Per la prima volta, un seme è germogliato sulla superficie lunare: il cotone ha mostrato segni di crescita poco dopo l'atterraggio del *lander*, anche se il ciclo di vita della pianta è stato interrotto a causa delle condizioni estreme dell'ambiente lunare.

Le ricerche condotte a bordo della ISS dimostrano che le piante possono adattarsi a condizioni spaziali. Tuttavia, è necessario approfondire gli studi sugli effetti della specificità dell'ambiente lunare sulla fisiologia vegetale e sulle implicazioni per la progettazione degli *habitat* di crescita (Paradiso & De Pascale, 2021). L'integrazione di tecnologie avanzate, come serre pressurizzate, tecniche di coltivazione idroponica e bioreattori, potrebbe facilitare la crescita delle piante e consentire lo sviluppo di sistemi biorigenerativi per il supporto della vita nello spazio (De Micco et al., 2023).

Un altro esperimento innovativo è stato realizzato con la missione ASI-GreenCube, il primo orto spaziale italiano in miniatura, lanciato nel 2022 a bordo di un CubeSat 3U. Questo progetto aveva come obiettivo la coltivazione di micro-ortaggi, in condizioni di microgravità, all'interno di un sistema completamente autonomo e controllato da remoto ben oltre l'orbita terrestre (a circa 6000 km dalla Terra). A causa delle condizioni estreme cui è stato esposto GreenCube, la germinazione dei semi è fallita; tuttavia, GreenCube ha fornito dati fondamentali sulle tecnologie necessarie per lo sviluppo di apparati di crescita compatti e autosufficienti per future missioni di lunga durata (Santoni et al., 2020; Marzioli et al., 2022).

Le principali sfide tecnologiche per la coltivazione di piante in ambienti lunari riguardano diversi aspetti critici. L'esposizione alle radiazioni cosmiche e solari, dovuta all'assenza di un'atmosfera protettiva, può danneggiare il DNA delle cellule vegetali e alterare i loro processi fisiologici, rendendo necessario lo sviluppo di materiali schermanti per le serre. La gravità ridotta, pari a circa un sesto di quella terrestre, potrebbe influenzare la crescita delle radici, la distribuzione dei nutrienti e la circolazione dell'acqua nelle piante, richiedendo soluzioni innovative come l'idroponica e l'aeroponica (El-Nakhel et al., 2019). La regolite lunare è priva di materia organica e contiene composti potenzialmente tossici, il che impone la necessità di sviluppare substrati artificiali o tecniche di *bioremediation* per renderlo adatto alla crescita delle piante (Duri et al., 2022). La gestione dell'acqua rappresenta un'altra sfida

cruciale, poiché si tratta di una risorsa limitata sulla Luna: sistemi di irrigazione a circuito chiuso e il riciclo efficiente dei nutrienti saranno fondamentali per garantire la sostenibilità delle coltivazioni (Amitrano et al., 2020). Tra gli ostacoli principali vi sono le già citate condizioni atmosferiche e termiche estreme, che rendono indispensabile la progettazione di serre pressurizzate in grado di mantenere un microclima interno idoneo e stabile. Un altro fattore critico riguarda l'illuminazione: la Luna è infatti caratterizzata da giorni lunghi circa 14 giorni terrestri, seguiti da altrettante notti. L'impiego di illuminazione artificiale a LED e/o di specchi solari potrebbe garantire la fotosintesi e la crescita vegetale (Pannico et al., 2022). Infine, la gestione delle colture richiederà un alto grado di automazione e monitoraggio remoto, con sensori avanzati e intelligenza artificiale per ottimizzare la crescita delle piante senza la necessità di un intervento umano continuo (Marzioli et al., 2022).

Conclusioni

L'analisi avviata in questo primo volume proseguirà e verrà ulteriormente sviluppata nei due successivi volumi in fase di pubblicazione, che saranno incentrati, rispettivamente, su geologia, risorse della Luna e nuove sfide (2) e ricerca, ambiente e tutela della salute e della vita (3).

Bibliografia:

Requisiti per la tutela della salute

1. Allard, C. China unveils first lunar spacesuit for 2030 moon mission. *Nat Rev Mater* 9, 765 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00744-4>
2. Anderton R, Posselt B, Komorowski M, Hodgkinson P. Medical considerations for a return to the Moon. *Occupational Medicine* 2019;69:311–313, doi:10.1093/occmed/kqz099
3. Childress SD, Williams TC, Francisco DR. NASA Space Flight Human-System Standard: enabling
4. Human spaceflight missions by supporting astronaut health, safety, and performance, *npj Microgravity* (2023) 9:31; <https://doi.org/10.1038/s41526-023-00275-2>
5. Feng Y, Pan PZ, Tang X, Wang Z, Li Y, Hussain A. A comprehensive review of lunar lava tube base construction and field research on a potential Earth test site. *International Journal of Mining Science and Technology* 34 (2024) 1201–1216
6. George SP, Ramona Gaza R, Daniel Matthia D, Laramore D, Lehti J, Campbell-Ricketts T, Kroupa M, Stoffle N, Marsalek K, Przybyla B, Abdelmelek M, Aeckerlein J, Bahadori AA, Barzilla J, Dieckmann M, Ecord M, Egeland R, Eronen T, Fry D, Jones BH, Hellweg CE, Houri J, Hirsh R, Hirvonen M, Hovland S, Hussein H, Johnson AS, Kase-mann M, Lee K, Leitgab M, McLeod C, Milstein O, Pinsky L, Quinn P, Riihonen E, Rohde M, Rozhdestvenskyy S, Saari J, Schram A, Straube U, Turecek D, Virtanen P, Waterman G, Wheeler S, Whitman K, Wirtz M, Vandewalle M, Zeitlin C, Semones E, s Berger T. Space radiation measurements during the Artemis I lunar mission. *Nature* | Vol 634 | 3 October 2024, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07927-7>
7. Hailey M., Urbina M., Reyes D., Antonsen E. Interpretation of NASA-STD-3001 Levels of Care for Exploration Medical System Development. NASA/TM-2017-219290
8. Johnson JE, Spry JA, Race MS, Conley CA, Siegel B. NASA's Path to Planetary Protection Requirements for Human Exploration Missions: Update on Recent Progress. 978-1-4673-7676-1/16/\$31.00 ©2016 IEEE
9. Martinez NL, Sanjurjo-Rivo M, Diaz-Alvarez J, Martinez-Frias J. Additive manufacturing for a Moon village, Proceedings of the 7th Manufacturing Engineering Society International Conference – Vigo (Spain) – June 2017

10. Spacesuit for NASA's Artemis III Moon Surface Mission Debuts- NASA Communications-Mar 2023, <https://www.nasa.gov/humans-in-space/spacesuit-for-nasas-artemis-iii-moon-surface-mission-debuts/>

Strutture per l'assistenza medica e la gestione delle emergenze medico-chirurgiche

11. Babocs D., Preda A., Christiansen R. Cis-lunar and surface missions: Health risks and potential surgical conditions, *Journal of Space Safety Engineering* 11 (2024) 295–300, <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2024.04.005>
12. Howard LR and Campbell BT. Configuration and Projected Capabilities of the Common *Habitat* Medical Care Facility, (2024). Human Research Program Investigators' Workshop, NASA
13. Mancl MCC and Andrews TC (2019). Deep Space *Habitat*–Medical Bay Concept Design and Human Factors Engineering Analysis. Proceedings of the Wisconsin Space Conference (Vol. 1, No. 1)
14. Momose K and Heinicke C. Medical Bay Design Considerations for the Moon and Mars Base Analog (MaMBA). Proceedings of the 50th International Conference on Environmental Systems 12-15 July 2021 (ICES-2021-157)

Rover e veicoli per l'esplorazione della superficie

15. Li, C., et al. "Yutu-2 Rover's Observations on the Lunar Far Side." *Nature Astronomy*, vol. 4, no. 9, 2020, pp. 856–861
16. Colaprete, A., et al. "The Volatiles Investigating Polar Exploration Rover (VIPER): Mission Overview." *Lunar and Planetary Science Conference*, 2020

Tecnologie di estrazione e utilizzo delle risorse lunari (ISRU)

17. Sanders, G. B., et al. "In-Situ Resource Utilization (ISRU) for Lunar Missions: State of the Art and Future Prospects." *Acta Astronautica*, vol. 120, 2016, pp. 198–208
18. Anand, M., et al. "A Brief Review of Chemical and Mineralogical Resources on the Moon and Likely Initial In-Situ Resource Utilization (ISRU) Applications." *Planetary and Space Science*, vol. 74, no. 1, 2012, pp. 42–48

Tecnologie per la produzione di energia per missioni di lunga durata

19. Poston, D. I., et al. "The Kilopower Reactor Using Stirling Technology (KRUSTY) Nuclear Ground Test Results." NASA Technical Reports, 2018
20. Mellor, A., et al. "Design and Analysis of Lunar

Surface Solar Power Systems.” *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 31, no. 3, 2018

Sistemi rigenerativi fisico-chimici per il supporto vitale

21. Eckart, P. “Spaceflight Life Support and Biospherics.” *Microcosm Press*, 1996
22. Anderson, M. S., et al. “Lessons Learned from the International Space Station Environmental Control and Life Support System.” *Acta Astronautica*, vol. 65, no. 7–8, 2009, pp. 1052–1060

Sistemi biorigenerativi di supporto alla vita

23. Caporale, A.G., Palladino, M., De Pascale, S., Duri, L.G., Rouphael, Y., Adamo, P. (2023). How to make the Lunar and Martian soils suitable for food production - Assessing the changes after manure addition and implications for plant growth. *Journal of Environmental Management*, 325, art. no. 116455
24. De Micco, V., Amitrano, C., Mastroleo, F., Aronne, G., Battistelli, A., Carnero-Diaz, E., De Pascale, S., Detrell, G., Dussap, C.-G., Ganigué, R., Jakobsen, Ø.M., Poulet, L., Van Houdt, R., Verseux, C., Vlaeminck, S.E., Willaert, R., Leys, N. (2023) Plant and microbial science and technology as cornerstones to Bioregenerative Life Support Systems in space. *NPJ Microgravity*, 9 (1), art. no. 69
25. De Pascale, S., Arena, C., Aronne, G., De Micco, V., Pannico, A., Paradiso, R., Rouphael, Y. (2021). Biology and crop production in Space environments: Challenges and opportunities. *Life Sciences in Space Research*, 29, pp. 30-37
26. Godia, F., Albiol, J., Montesinos, J. L., Pérez, J., Creus, N., Lasseur, C., & García-Riera, A. (2004). MELiSSA: A loop of interconnected bioreactors to develop life support in space. *Journal of Biotechnology*, 108(3), 207–215
27. Lasseur C., Brunet J., de Weever H., Dixon M., Dussap G., Godia F., Leys N., Mergeay M., Van Der Straeten D. (2010). MELiSSA: The European project of Closed Life Support System. *Gravitational and Space Biology* 23(2): 3-12
28. MELiSSA Foundation. (2022). *MELiSSA Pilot Plant Overview*. Retrieved from <https://www.melissa-foundation.org/>
29. Pannico, A., Cimini, G., Quadri, C., Paradiso, R., Bucchieri, L., Rouphael, Y., De Pascale, S. (2022). A Plant Characterization Unit for Closed Life Support: Hardware and Control Design for Atmospheric Systems. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 9, art. no. 820752
30. Wheeler, R. M. (2010). Plants for human life support in space: From Myers to Mars. *Gravitational and Space Research*, 23(2), 25–35

Sistemi di produzione di vegetali sulla superficie lunare

31. Amitrano, C., Chirico, G.B., De Pascale, S., Rouphael, Y., De Micco, V. (2020). *Crop management in controlled environment agriculture (CEA) systems using predictive mathematical models*. Sensors (Switzerland)
32. De Micco, V., Amitrano, C., Mastroleo, F., ... Willaert, R., Leys, N. (2023). Plant and microbial science and technology as cornerstones to Bioregenerative Life Support Systems in space. *npj Microgravity*
33. Duri, L.G., Pannico, A., Petropoulos, S.A., ... De Pascale, S., Rouphael, Y. (2022). Bioactive Compounds and Antioxidant Activity of Lettuce Grown in Different Mixtures of Monogastric-Based Manure With Lunar and Martian Soils. *Frontiers in Nutrition*
34. El-Nakhel, C., Giordano, M., Pannico, A., ... De Pascale, S., Rouphael, Y. (2019). Cultivar-specific performance and qualitative descriptors for butterhead salanova lettuce produced in closed soilless cultivation as a candidate salad crop for human life support in space. *Life*
35. Marzioli, P., Boscia, M., Kumar, S., ... Impresario, G., Santoni, F. (2022). Autonomous cultivation system for nano platforms: the GreenCube mission. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*
36. Pannico, A., Cimini, G., Quadri, C., ... Rouphael, Y., De Pascale, S. (2022). A Plant Characterization Unit for Closed Life Support: Hardware and Control Design for Atmospheric Systems. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*
37. Paradiso, R., De Pascale, S. (2021). Bioregenerative systems to sustain human life in space: The research on higher plants. *Italus Hortus*
38. Santoni, F., Gugliermetti, L., Piras, G., ... Mari, S., Del Bianco, M. (2020). GreenCube: Microgreens cultivation and growth monitoring on-board a 3U cubesat. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2020 - Proceedings



Orizzonti
**La collana editoriale
a cura del
Consiglio Tecnico
Scientifico di ASI**