

# Verso la Luna per l'esplorazione interplanetaria

di Clelia Iacomino, Mattia Pianorsi, Aristeia Saputo\*



Nel 2017, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) ha lanciato il programma internazionale Artemis, nato con l'obiettivo finale di riportare gli esseri umani sulla Luna. Nello specifico, mira a portare la prima donna e il primo uomo di colore sulla superficie lunare entro il 2024<sup>1</sup> (obiettivo a breve termine), a sviluppare spedizioni internazionali per impostare le basi per una presenza umana sostenibile sulla Luna (obiettivo a medio termine), e a preparare il terreno per l'estrazione di risorse lunari e nuove missioni verso Marte (obiettivo a lungo termine).

Nel perseguire tali obiettivi, la NASA è sostenuta da altre agenzie spaziali come l'Agenzia spaziale canadese, l'Agenzia spaziale europea (ESA) e l'Agenzia giapponese di esplorazione aerospaziale (anche l'Agenzia spaziale russa ha espresso il suo interesse a contribuire). L'ESA contribuirà alla creazione del Gateway, una stazione spaziale che, muovendosi tra diverse orbite lunari, offrirà un punto di sosta per le missioni sulla Luna e su Marte. Nello specifico, l'ESA fornirà il modulo principale per ospitare gli astronauti che visiteranno il Gateway, chiamato International Habitation Module (iHAB), e un modulo, chiamato ESPRIT (European System Providing Refuelling, Infrastructure and Telecommunications), che doterà gli astronauti di un ambiente lavorativo come nella Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Allo stesso tempo, l'ESA sta co-

\* Clelia Iacomino è Junior Lecturer di Business Government Relations e ricercatrice presso il SEE Lab di SDA Bocconi. Mattia Pianorsi è Junior Researcher presso il SEE Lab di SDA Bocconi. Aristeia Saputo è Lab Researcher presso il Sustainability Lab, l'AGRI Lab e il SEE Lab di SDA Bocconi.

struendo due moduli di servizio per Orion, la capsula che porterà gli astronauti sulla Luna. I moduli di servizio forniranno a Orion elettricità, acqua, ossigeno e azoto, e la manterranno alla giusta temperatura<sup>2</sup>.

### GLI ARTEMIS ACCORDS

Nell'ottobre 2020, la NASA e il Dipartimento di Stato degli Stati Uniti hanno redatto gli Artemis Accords, un protocollo che ha lo scopo di garantire che le attività esplorative, scientifiche e commerciali sulla Luna potranno contare su un ambiente sicuro, e di stabilire principi comuni da condividere tra le parti coinvolte negli accordi. I principali punti del documento riguardano il rafforzamento delle relazioni pacifiche tra le nazioni, la trasparenza sulle politiche e i piani di sviluppo, l'interoperabilità dei sistemi, la fornitura di assistenza in caso di emergenza, la registrazione degli oggetti spaziali lanciati, la condivisione dei dati scientifici raccolti, la protezione dei siti e dei manufatti con valore storico, l'estrazione delle risorse spaziali condotta nell'interesse di tutta l'umanità e senza appropriazioni nazionali, il rispetto delle zone di sicurezza delle attività degli altri Paesi (in questo modo si ritiene di poter abbassare le probabilità del verificarsi di situazioni conflittuali con l'obbligo di notificare gli obiettivi delle operazioni al fine di migliorare il coordinamento con gli altri Paesi) e la gestione tempestiva dei detriti spaziali. Attualmente, le nazioni firmatarie includono le agenzie spaziali di: Australia, Canada, Italia, Giappone, Lussemburgo, Emirati Arabi Uniti, Regno Unito, Stati Uniti, Ucraina, Corea del Sud, Nuova Zelanda, Brasile e Polonia. Solo alcuni di questi sono direttamente coinvolti nelle attività del programma Artemis, ma tutti si sono impegnati a rispettare i principi degli accordi. A partire dall'ottobre 2020, gli accordi di Artemis sono aperti a nuovi firmatari, poiché la NASA ritiene che molteplici Paesi saranno disposti ad aderire al programma nei prossimi anni<sup>3</sup>.

Gli accordi di Artemis si ispirano al Trattato sullo spazio extra-atmosferico, un accordo internazionale rilasciato nel 1967 e volto a regolare l'esplorazione e l'uso dello spazio extra-atmosferico, stabilendo fondamentalmente che qualsiasi attività in questo campo deve essere svolta a beneficio di tutta l'umanità, escludendo qualsiasi appropriazione nazionale dello spazio e vietando il dispiegamento di qualsiasi tipo di arma. Tuttavia, gli accordi di Artemis aggiungono un contributo fondamentale al quadro stabilito dal Trattato sullo spazio extra-atmosferico, poiché quest'ultimo non specificava alcun dettaglio sulle attività commerciali, delegando tutte le responsabilità delle parti pubbliche e private agli Stati nazionali.

Gli accordi di Artemis arrivano dopo diversi tentativi di regolamentazione delle iniziative legate alla Luna.

Infatti, nel 1979 l'Ufficio delle Nazioni Unite per gli affari dello spazio extra-atmosferico (United Nations Office for Outer Space Affairs-UNOOSA) promulgò il Trattato sulla Luna, che confermava i principi del Trattato dello spazio extra-atmosferico, ma indirizzandoli più specificamente alla Luna e ad altri corpi celesti e suggerendo che si sarebbe dovuto stabilire un regime internazionale per governare lo sfruttamento delle risorse spaziali. Solo 18 nazioni ratificarono l'accordo, poiché le sue condizioni erano considerate troppo severe per consentire lo sviluppo di attività commerciali. Basandosi sulla delega di responsabilità del Trattato sullo spazio extra-atmosferico, gli Stati Uniti e il Lussemburgo hanno istituito (rispettivamente nel 2015 e nel 2017) leggi nazionali per dare la possibilità ai privati di esplorare e sfruttare le risorse spaziali. Tali normative nazionali sono state particolarmente attraenti anche per altri Paesi, spingendoli a collaborare con Stati Uniti e Lussemburgo sull'uso delle risorse spaziali (è il caso di Portogallo, Polonia, Repubblica Ceca ed ESA, che hanno firmato *memorandum d'intesa* con il Lussemburgo per cooperare). In questo scenario, gli accordi di Artemis nascono come uno sforzo rinnovato per stabilire un accordo internazionale, specificamente mirato alle attività commerciali spaziali e fuori dai regolamenti nazionali<sup>4</sup>.

### BOOTS ON THE MOON

Parallelamente alle iniziative della NASA, nel 2006, 14 agenzie spaziali hanno istituito l'International Space Exploration Coordination Group (ISECG), un forum per condividere i loro piani e coordinare gli sforzi sull'esplorazione del sistema solare. Come risultato dei programmi e degli obiettivi dell'ISECG, una visione condivisa sull'esplorazione spaziale è espressa nella Global Exploration Roadmap (GER), che incorpora i propositi del programma Artemis. Infatti, la GER descrive una strategia di esplorazione che, partendo dalla stazione spaziale internazionale, guarda alla Luna, agli asteroidi, a Marte ed eventualmente da altre destinazioni. In particolare, l'esplorazione della superficie lunare è prevista sia per sviluppare attività sostenibili sulla Luna, sia come preparazione alle missioni su Marte.

La tabella di marcia dell'ISECG è strutturata in tre fasi principali, rispettivamente intitolate Boots on the Moon (fase 1), Expanding and Building (fase 2) e Sustained Lunar Opportunities (fase 3). La fase 1 fornirà le risorse essenziali per l'esplorazione umana della superficie lunare come lander<sup>5</sup> e rover non pressurizzati<sup>6</sup> con l'obiettivo di collaudare e validare la tecnologia. La fase 2 si concentrerà sulla preparazione di una presenza umana sulla superficie lunare. Nello specifico, le missioni con equipaggio svolgeranno attività di

esplorazione scientifica volte a dimostrare le capacità dei rover pressurizzati e l'utilizzazione delle risorse *in situ* (In-Situ Resource Utilisation-ISRU), passando da esplorazioni locali a regionali, concentrate al Polo Sud. Per concludere la seconda fase, le missioni si concentreranno sulla capacità tecnologiche per estendere la durata della permanenza umana sulla superficie lunare (da 8 a 14 giorni consecutivi in oscurità) al fine di continuare l'esplorazione al di fuori della regione del Polo Sud. Infine, basandosi sulle infrastrutture di base fornite dalle missioni precedenti come sistemi di abitazione, di telecomunicazione, e di generazione di energia, la fase 3 getterà le fondamenta per una presenza costante sulla superficie lunare, con un potenziamento delle infrastrutture di base a cui si legheranno attività commerciali connesse all'utilizzo delle risorse *in situ*. Quando l'accesso da e verso la superficie lunare sarà consolidato (con l'abbassamento dei costi di trasporto), l'economia lunare crescerà e permetterà ai governi di spostare, almeno parzialmente, il sostegno verso missioni di esplorazione in tutto il sistema solare<sup>7</sup>.

### L'EQUILIBRIO TRA GOVERNI E AZIENDE PRIVATE

Secondo la GER, un fattore determinante per un mercato lunare commerciale sostenibile sarà il passaggio della presenza umana sulla Luna da temporanea a permanente. Questa transizione dipenderà da un impegno stabile dei governi nel sostenere le aziende spaziali per lo sviluppo di programmi di innovazione tecnologica. Effettivamente, le prime infrastrutture di base sviluppate dalle società spaziali dovrebbero essere aggiornate in infrastrutture avanzate per il consolidamento della presenza umana permanente sulla superficie lunare. La costruzione di infrastrutture avanzate dovrebbe rappresentare il primo passo verso una domanda lunare commerciale. Gli interventi delle istituzioni pubbliche possono perciò contribuire al successo delle attività spaziali, riducendo costi e i rischi delle missioni e aprendo il mercato agli investimenti privati. Non appena i costi di trasporto spaziale (possibilmente grazie alla distribuzione del propellente lunare) e degli insediamenti diminuiranno, le basi lunari avranno necessità di essere espanse, creando i razionali economici per l'emergere di un mercato commerciale legato a infrastrutture e risorse (si pensi, per esempio, all'avanzamento dei sistemi di supporto alla vita). In questo scenario, i rischi e i potenziali profitti degli investimenti potrebbero essere assorbiti da aziende non spaziali che potrebbero entrare nel mercato commerciale lunare, insieme alle possibili aspettative di una domanda terrestre.

L'ISEGC stesso divide lo sviluppo tecnico per il sorgere di futuri casi commerciali in una «early Phase»

(che comprende le fasi 1 e 2) e una «mature phase» (corrispondente alla fase 3). La prima è propedeutica all'emergere della seconda, soprattutto con il passaggio di un sistema di approvvigionamento di risorse dalla Terra alla Luna che sia autosufficiente, e con una graduale transizione da un'economia basata sul pubblico (in termini di finanziamenti e domanda) a un mercato commerciale privato. Tuttavia, sebbene le attività lunari nella fase 3 non dipenderanno totalmente dai finanziamenti governativi, il sostegno pubblico continuerà a essere necessario, il che implica la creazione di un budget appropriato per le agenzie dedicate al programma.

L'equilibrio tra il coinvolgimento dei governi e delle società private sarà un fattore chiave per il successo dello sviluppo dei casi commerciali sulla Luna e dalla Luna alla Terra. Durante le fasi 1 e 2 dell'ISEGC, i governi dovrebbero investire principalmente nello sviluppo di infrastrutture di base (per esempio, impianti minerari), trasporti e distaccamenti lunari. La domanda pubblica sarà soddisfatta da società spaziali e, possibilmente, non spaziali (come, per esempio, energy, oil&gas, mining) che, a loro volta, porranno le basi per lo sviluppo della domanda privata essenziale per la fase 3. Fondamentalmente, le istituzioni pubbliche dovrebbero stimolare gli investimenti privati (finanziari e industriali) per creare attività che, alla fine, dovrebbero sfruttare le opportunità commerciali, indipendentemente dai governi. Nelle tre fasi, le istituzioni pubbliche giocheranno ruoli diversi: nelle fasi 1 e 2 avranno principalmente il ruolo di supportare le società spaziali allo sviluppo dell'innovazione tecnologica, in un'ottica di condivisione del rischio finalizzata alla sua commercializzazione; nella fase 3 i governi rappresenteranno essenzialmente clienti di prodotti e servizi basati sulla Luna (per esempio, per attività di natura scientifica). Tuttavia, possiamo supporre che gli sforzi delle istituzioni pubbliche in quest'ultima fase si sposteranno verso lo sviluppo di infrastrutture che serviranno per avviare attività di esplorazione di Marte.

### COMMERCIO LUNARE E TERRESTRE

La sostenibilità economica del mercato commerciale lunare dipenderà dalla domanda di prodotti e servizi basati sulla Luna distribuiti sulla Luna e/o, eventualmente, sulla Terra. Il SEE Lab di SDA Bocconi ha prodotto una valutazione preliminare dei possibili casi commerciali futuri, tenendo conto della domanda potenziale sia dalla Luna che dalla Terra.

Poiché le opportunità commerciali della fase 3 saranno strettamente dipendenti dall'ampliamento della permanenza umana sulla superficie lunare, lo sviluppo di prodotti e servizi con l'utilizzazione di risorse locali (ISRU) costituirà il fattore fondamentale per l'emerge-

re di un mercato basato sulla Luna. Conseguentemente, la maggior parte dei settori economici che possono dimensionare le opportunità lunari sono rappresentati all'interno del ciclo ISRU.

Le attività ISRU con l'identificazione, l'estrazione, il trattamento e l'uso delle risorse spaziali richiederanno lo sviluppo di capacità tecnologiche per creare prodotti e servizi destinati, principalmente, all'ampliamento delle infrastrutture sulla superficie lunare, sostituendo, di fatto, la catena di approvvigionamento di risorse basata sulla Terra. Gli obiettivi dell'ISRU saranno di sostenere l'autosufficienza delle basi lunari utilizzate per condurre operazioni scientifiche e di esplorazione, di ridurre i costi delle missioni tra Terra, Luna e Marte, incentivando la commercializzazione delle attività spaziali.

Inizialmente, l'ISRU getterà le basi per una domanda commerciale derivante dalla distribuzione di propellente per il rifornimento dei lanciatori nello spazio, abbassandone costi e/o ottimizzandone i ricavi. Le infrastrutture di estrazione, raffinamento e distribuzione di propellente si serviranno di strumentazione robotica teleoperata per ridurre al minimo gli interventi manuali. L'aumento di efficienza dei servizi di trasporto con l'utilizzo del propellente lunare renderà l'accesso allo spazio maggiormente economico, favorendo l'incremento della presenza umana tra l'orbita e la superficie lunare. Lo scenario fornirebbe i razionali economici per un potenziamento delle infrastrutture di base installate durante le fasi di validazione tecnologica che richiederanno una filiera per l'approvvigionamento di materie prime (principalmente minerali, acqua, ossigeno e idrogeno). Sebbene i governi continueranno a sostenere l'economia lunare come clienti, il previsto incremento di persone spinto dalla riduzione dei costi di trasporto spaziale sarà il fattore critico per stabilire una catena di approvvigionamento lunare con transazioni commerciali tra gli operatori. Con l'affiancamento di una domanda privata, si prevede che le società non spaziali entrino nel mercato sfruttando potenziali trasferimenti tecnologici dalle attività terrestri, senza escludere delle possibili *joint venture* con le imprese spaziali.

Allo stesso tempo, con il consolidamento delle attività lunari, si potranno generare opportunità commerciali mirate a soddisfare i bisogni di una domanda terrestre. Un caso commerciale è il turismo. Il turismo lunare si concretizzerà se ci sarà un abbassamento progressivo del rischio sottostante le attività, richiedendo un avanzamento nei servizi di trasporto (per esempio, lander e ascender) e delle strutture sulla superficie lunare (per esempio, rover pressurizzati). Un altro caso di business rilevante per la Terra è rappresentato dall'energia solare basata sulla Luna (Lunar-Based

Solar Power-LBSP), cioè l'assorbimento dell'energia solare dalla superficie lunare e la sua trasmissione alla Terra. Tuttavia, un mercato per LBSP potrebbe essere creato solo dopo l'aumento della presenza dei prodotti di consumo e delle infrastrutture di produzione (sia sulla superficie lunare sia nello spazio). In particolare, l'LBSP potrebbe rappresentare un sostituto della generazione e distribuzione di energia sulla superficie lunare.

Il potenziale collegato all'assorbimento dell'energia solare nello spazio tramite grandi piattaforme (Space-Based Solar Power-SBSP) nelle orbite terrestri è noto da decenni. Tuttavia, le prime architetture SBSP erano tecnicamente complesse ed era improbabile che si rivelassero economicamente sostenibili. Nell'ultimo decennio, sono state sviluppate diverse architetture SBSP che cercano di risolvere i problemi sopra menzionati. Tuttavia, la diminuzione dei costi di trasporto per portare i componenti necessari dalla Terra alle sue orbite è la chiave per determinare la fattibilità economica del progetto. Un'opportunità per abbassare le spese (soprattutto di trasporto dato che la gravità lunare è circa un sesto della terrestre) potrebbe basarsi sulla costruzione dei componenti di SBSP sulla Luna tramite ISRU e spostarli in orbita terrestre, con una potenziale riduzione dei costi di circa la metà\*.

Anche se disponibili sulla Luna, gli elementi terrestri rari e l'elio-3 non presentano, attualmente, le condizioni (cioè la domanda e la tecnologia) per essere considerati commercialmente validi durante il primo sviluppo della fase matura. Tuttavia, questo rimane un campo interessante che dovrebbe essere monitorato man mano che la domanda e le tecnologie si evolvono.

### C'È ACQUA SULLA LUNA

Nel 1998, i dati derivati da Clementine, un progetto spaziale congiunto realizzato nel 1994 dalla NASA e dalla Ballistic Missile Defense Organization, hanno confermato la presenza di acqua sotto forma di ghiaccio ai poli lunari in una quantità sufficiente a sostenere una stazione di rifornimento per veicoli spaziali. In base alla suddetta necessità di ridurre i costi di trasporto e di rendere l'economia lunare autosufficiente, l'acqua lunare rappresenta una risorsa preziosa per produrre propellente per i razzi (oltre che, per esempio, essere utilizzata per i sistemi di supporto alla vita). Infatti, dato che il carburante costituisce una frazione significativa della massa dei lanciatori e dei veicoli di atterraggio/ascensione, produrre e distribuire il propellente dalla superficie lunare potrebbe offrire un risparmio significativo alla missione, riducendo la necessità di portare tutto il carburante necessario dalla Terra e rendendo i sistemi di trasporto spaziale maggiormente sostenibili e, riutilizzabili. Alla luce dei

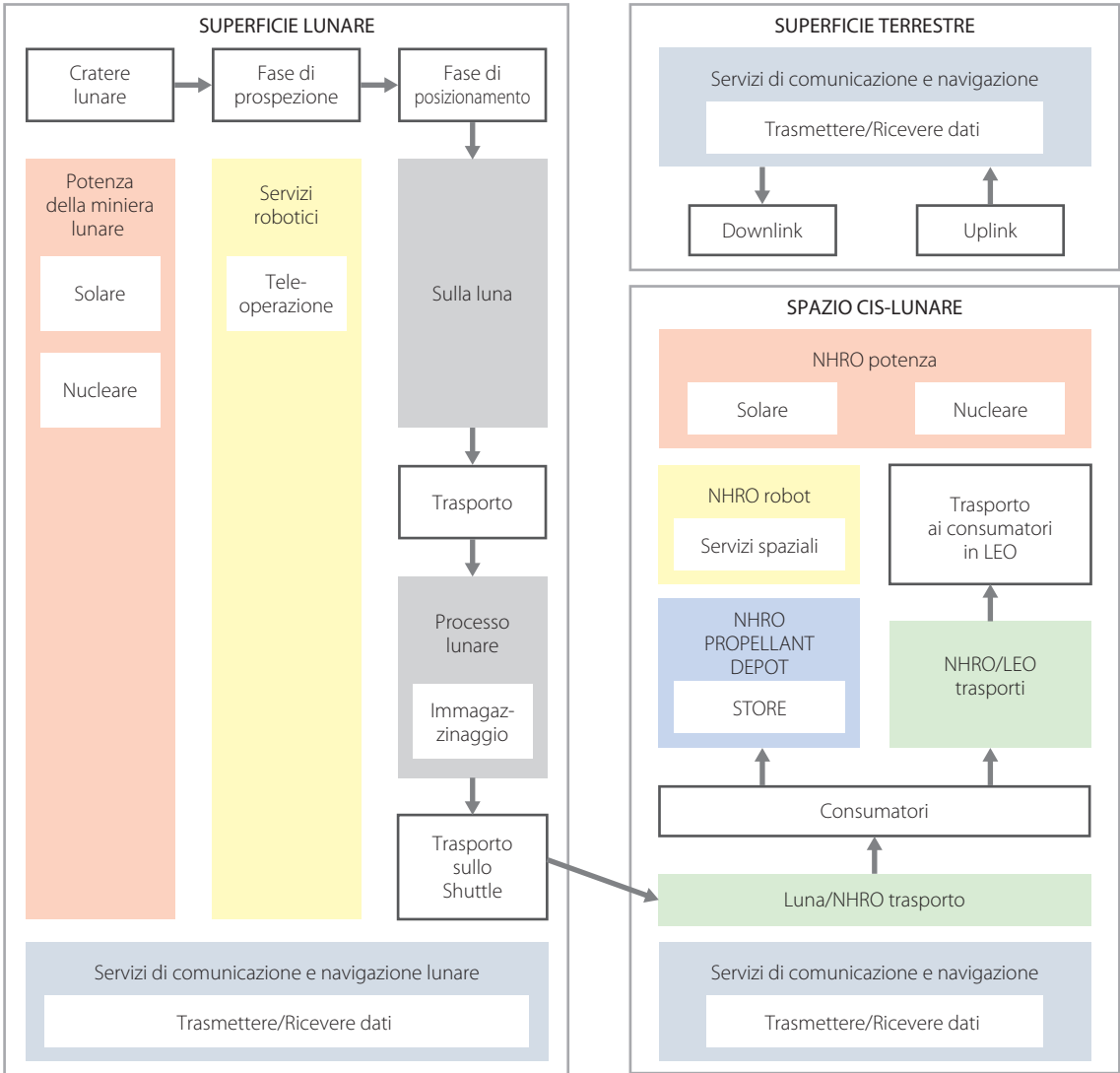
benefici della produzione di propellente lunare, esisterebbe una potenziale domanda privata, rendendo l'estrazione e il raffinamento del ghiaccio un promettente caso commerciale.

Studi recenti<sup>9</sup> hanno dimostrato che utilizzare il propellente estratto e prodotto sulla Luna (idrogeno e ossigeno ottenibile tramite il processo di elettrolisi) sarebbe maggiormente economico che trasportarlo dalla Terra per il rifornimento dei lanciatori. Sono state condotte molteplici analisi sull'estrazione e lo sfruttamento delle risorse spaziali che hanno aiutato la nostra attuale comprensione dell'utilizzo delle risorse lunari. Tuttavia, la completezza della valutazione di fattibilità tecnica ed economica fornita dallo studio «Commercial

Lunar Propellant Architecture: A Collaborative Study of Lunar Propellant Production»<sup>10</sup> lo rende un punto di riferimento adeguato per identificare i possibili fattori di reddito, derivati dalla distribuzione di propellente.

Lo studio descrive in dettaglio i sistemi In-Situ Propellant Production (ISPP), che comprendono tutte le operazioni chiave per produrre e distribuire il propellente lunare. Tali sistemi sono comunemente composti da tre fasi di attività: ricognizione del sito e valutazione delle risorse; acquisizione, isolamento e preparazione delle risorse; lavorazione delle risorse per la produzione di materiali di consumo (acqua, ossigeno e idrogeno). Il diagramma di flusso (Figura 1<sup>11</sup>) identi-

FIGURA 1 | L'ARCHITETTURA DEL PROPELLENTE LUNARE



Fonte: Commercial Lunar Propellant Architecture (2019).

© Egea SpA - TUTTI I DIRETTI SONO RISERVATI

fica le operazioni cruciali mettendo in evidenza le funzioni dei blocchi del sistema mentre traccia il ciclo di estrazione, produzione e distribuzione del propellente. Le configurazioni dei sistemi di distribuzione dipendono dalla posizione del potenziale cliente: la superficie lunare, lo spazio cis-lunare e la Terra.

Una volta che le operazioni di prospezione (ricognizione del sito e valutazione delle risorse) sono completate con il sostegno di finanziamenti pubblici, saranno necessari elementi infrastrutturali per l'estrazione, la lavorazione, lo stoccaggio del propellente, la generazione e la distribuzione di energia e le attività di trasporto (nello spazio e sulla superficie lunare). I sistemi commerciali per la produzione e distribuzione di propellente lunare si basano su un progetto che non richiede la presenza umana, il che implica che tutte le fasi delle operazioni – costruzione, trasporto, manutenzione, riparazione, estrazione, raffinazione, stoccaggio e trasferimento del propellente – saranno eseguite con mezzi robotici. Infatti, affinché ISPP possa essere economicamente fattibile, gli autori affermano che i robot dovranno eseguire la maggioranza delle attività autonomamente, comunicando e lavorando collettivamente verso un obiettivo comune, mentre vengono monitorati da teleoperatori nel caso in cui sia necessario un intervento. Un contesto che si applicherà non solo sulla superficie lunare, ma anche per le operazioni nello spazio di stoccaggio e rifornimento di propellente. Di conseguenza, tra le attività necessarie alle operazioni, i servizi di comunicazione e navigazione emergono come elementi cruciali per favorire le opportunità legate allo sfruttamento del propellente lunare. Nello specifico, le capacità di comunicazione Terra-Luna (con infrastrutture in orbita e sulle superficie lunare) forniranno i servizi necessari per il monitoraggio delle attività. Per quanto riguarda i servizi di navigazione, le soluzioni forniranno un supporto decisionale soprattutto per le missioni di esplorazione e prospezione (per esempio, definizione delle riserve e *rendering* delle tecnologie di estrazione e recupero) e per la mobilità sulla superficie lunare.

Lo studio citato fornisce inoltre un'analisi economica per convalidare l'ISPP come commercialmente sostenibile. Le stime suggeriscono molteplici scenari con ritorni economici positivi basati su una valutazione deterministica della domanda. Il propellente verrebbe distribuito sulla superficie lunare, il punto lagrangiano L1 e l'orbita terrestre bassa, su cui sono calibrati i requisiti di produzione di ISPP con i relativi costi di sviluppo e operativi. Lo studio compara il costo del propellente lunare distribuito nelle tre località rispetto alla possibile opzione terrestre. La Tabella 1 mostra che, nelle tre località, il combustibile lunare sarebbe maggiormente economico del combustibile trasportato dalla Terra. Da notare che, ovviamente, il costo del propellente lunare aumenta se distribuito in orbita bassa terrestre, poiché il servizio di trasporto richiederebbe il consumo di propellente.

Sempre secondo la ricerca, l'aumento dell'efficienza del trasporto spaziale dovuto al rifornimento con propellente lunare renderebbe possibile l'incremento del numero di persone in orbita o sulla superficie lunare. Perciò, se le società di trasporto spaziale rappresenterebbero i clienti chiave per l'ISPP, ci sarà una progressiva diversificazione della domanda dovuta alla necessità di l'ossigeno (per esempio, aria respirabile o come ossidante) e di acqua (per esempio, per bere o per schermare le radiazioni) che potrebbero essere prodotti dallo stesso impianto per il propellente lunare.

Analisi sulla sostenibilità economica dell'estrazione e utilizzo delle risorse lunari sono state successivamente proposte da Sommariva in due diversi studi<sup>12</sup>. Il primo ha ricercato e confermato la fattibilità economica della costruzione di un impianto minerario sulla superficie lunare per provvedere all'estrazione del ghiaccio e ricavarne propellente. In particolare, il lavoro ha messo in discussione la necessità dell'intervento pubblico per sostenere le attività di esplorazione, poiché rappresentano le operazioni di maggiore rischio. Infatti, la definizione dei requisiti tecnologici e logistici degli impianti per l'estrazione del ghiaccio dipendono dalla quantità presente e dalla sua qualità,

TABELLA 1 | COSTO DEL PROPELLENTE DELLA LUNA E DEL PROPELLENTE DELLA TERRA IN DIVERSE LOCALITÀ

|                                | Dalla Terra      | Dalla Luna      |
|--------------------------------|------------------|-----------------|
| Superficie terrestre           | 1 dollaro/kg     | -               |
| Orbita terrestre bassa         | 4000 dollari/kg  | 3000 dollari/kg |
| Punto di Lagrange Terra-Luna 1 | 12000 dollari/kg | 1000 dollari/kg |
| Superficie lunare              | 36000 dollari/kg | 500 dollari/kg  |

Fonte: Commercial Lunar Propellant Architecture (2019).

così come dalla locazione della risorsa stessa. A oggi, non sono state compiute missioni indirizzate a restituire evidenze dirette sulla superficie lunare. Dunque, il rischio di non capitalizzare i risultati dell'esplorazione con il successivo sfruttamento del ghiaccio (in caso di uno o più insuccessi nell'identificare giacimenti idonei) e l'alto costo per la messa in opera di tali attività (circa 700 milioni di dollari) disincentiverebbe sicuramente il solo intervento delle società private. Il secondo studio confronta due possibili progetti per rifornire di propellente un deposito posizionato nel punto lagrangiano L1 ossia acquisendo e trasportando il combustibile dalla Luna o dalla Terra. Il lavoro conferma non solo la fattibilità tecnica di lanciare e posizionare un deposito per il rifornimento di satelliti e lanciatori (all'interno delle attività di *On-Orbit Servicing*) ma anche che la sua ricarica è economicamente più conveniente se viene utilizzato il propellente lunare. Questo risultato dipende essenzialmente da due fattori: prima di tutto,

il prezzo finale di vendita del propellente agli utilizzatori finali (satelliti e lanciatori) è inferiore se prodotto e trasportato dalla Luna; in secondo luogo, l'alternativa più costosa ovvero quella terrestre è anche più esposta alla volatilità dei risultati economici e, quindi, a un rischio maggiore.

In definitiva, la possibilità di sfruttare il propellente lunare sembra essere essenziale per perseguire lo sviluppo delle attività lunari e per espandere le traiettorie di esplorazione interplanetarie. Seppur queste analisi non rappresentino in alcun modo studi di fattibilità, i loro risultati dovrebbero rappresentare i primi passi verso una visione commerciale delle attività spaziali extra-atmosferiche, anche quelle più a lungo termine. L'esortazione è di iniziare a prepararsi già da oggi con piccoli investimenti per assicurarsi un posizionamento competitivo domani e questo vale non solo per le imprese spazio ma anche, e soprattutto, per quelle società non direttamente coinvolte, ancora oggi, in questo settore.

<sup>1</sup> Sebbene sembra che la missione verrà posticipata a non prima del 2025.

<sup>2</sup> «NASA's Lunar Exploration Program Overview», ESA, 2020.

<sup>3</sup> «The Artemis Accords», NASA, 2020.

<sup>4</sup> «Global Exploration Roadmap. Supplement August 2020. Lunar Surface Exploration Scenario Update», ISECG, 2020.

<sup>5</sup> Si tratta di un tipo di navicella spaziale per la discesa e la sosta sulla superficie di un corpo celeste.

<sup>6</sup> Veicolo a quattro ruote a propulsione elettrica per l'esplorazione delle superfici di un corpo celeste.

<sup>7</sup> «Global Exploration Roadmap. Supplement August 2020. Lunar Surface Exploration Scenario Update», ISECG, 2020.

<sup>8</sup> J. Mankins, «SPS-ALPHA: The First Practical Solar Power Satellite via Arbitrarily Large Phased Array (A 2011-2012 NASA NIAC Phase 1 Project)», Artemis Innovation Management Solutions LLC, 2012.

<sup>9</sup> D. Kornuta et al. «Commercial Lunar Propellant Architecture: A Collaborative Study of Lunar Propellant Production», *Scopus*, 13, 2019.

<sup>10</sup> Kornuta et al. «Commercial Lunar Propellant Architecture: A Collaborative Study of Lunar Propellant Production», *Reach*, 13, 100026, 2019.

<sup>11</sup> NHRO (Near-Rectilinear Halo Orbit) è un'orbita cislunare dove verrà posizionata la nuova stazione spaziale Gateway.

<sup>12</sup> A. Sommariva, L. Gori, B. Chizzolini, M. Pianorsi, «The Economics of Moon Mining», *Acta Astronautica*, 170, pp. 712-718; A. Sommariva, «On-Orbit Refuelling. Technical and Economic Viability of Moon-Mined Propellant Transportation, Storage, and Distribution», *ISPI*, 11 dicembre 2020.

### IN SINTESI

- Sottoscritti nel 2017, gli accordi di Artemis regolano l'esplorazione e l'uso dello spazio extra-atmosferico, stabilendo che qualsiasi attività in questo campo deve essere svolta a beneficio di tutta l'umanità, imponendo inoltre restrizioni sullo sfruttamento commerciale dello spazio.
- La realizzazione di un avamposto permanente lunare richiederà la costruzione di infrastrutture, in orbita e in superficie, destinate a supportare la presenza umana sulla Luna. L'utilizzazione di risorse locali costituirà il fattore fondamentale per l'emergere di un mercato commerciale lunare a partire dall'estrazione e della raffinazione del ghiaccio per la produzione di propellente.
- Le attività di esplorazione per l'identificazione e la valutazione delle riserve di ghiaccio dovranno essere supportate da finanziamenti pubblici mentre la domanda per propellente, acqua e ossigeno potrà rendere economicamente sostenibili iniziative di mining, anche di natura privata.