

Arquitectura espacial

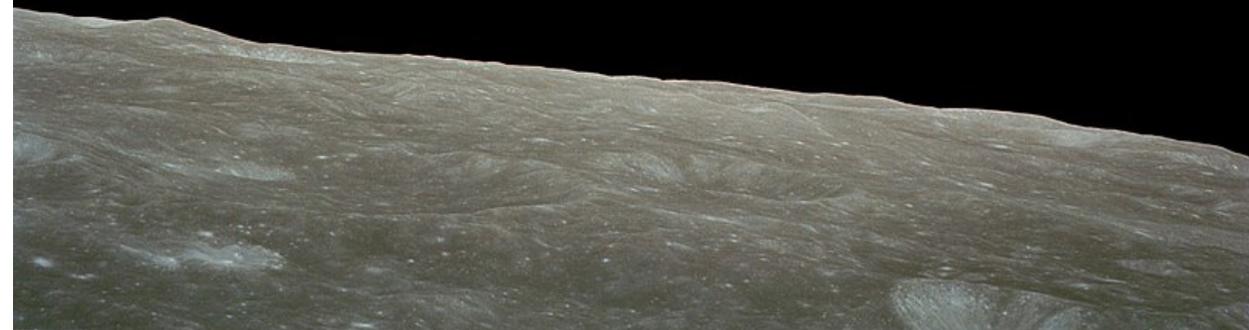
Vivir fuera de la Tierra

Estudio compositivo y diseño de colonias espaciales en la Luna.



Lucas Collado Sanchis

Tutora: Maria Teresa Palomares Figueres



Grado Universitario en Fundamentos de la Arquitectura
Curso 2019-2020
Trabajo Fin de Grado
Universitat Politècnica de València
Septiembre 2020



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



[F1] *Stairway of Humanity*, Robert T. McCall y Andrei Sokolov, 1990. Acrílico sobre lienzo. El mural muestra los logros alcanzados en las tres primeras décadas de exploración espacial. Y conmemora la colaboración entre la nación soviética y norteamericana.
Fuente: McCall Studios

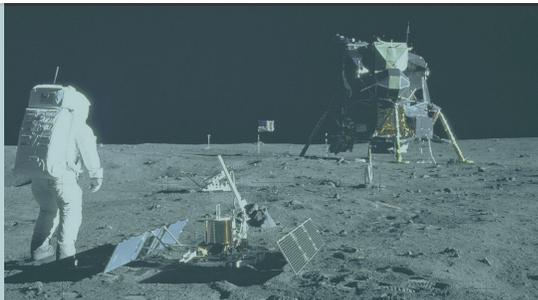
Resumen

La fascinación del hombre por la belleza y los misterios del cosmos hunde sus raíces hasta el inicio de la especie. La llegada del hombre a la Luna supuso la cima de décadas de duro esfuerzo e investigación y marcó el primer paso hacia una nueva era en la que la humanidad abandona su cuna, el planeta Tierra, para explorar nuevos mundos.

A pesar de esto, los avances en la colonización del espacio se vieron sumamente truncados en las décadas posteriores. Sin embargo, en los últimos años, se ha reactivado el interés por la exploración espacial, especialmente de la Luna, que se sitúa como gran candidata para albergar la primera colonia humana en el espacio.

Este trabajo pretende mostrar diversas arquitecturas imaginadas en la Luna y analizar los aspectos y parámetros compositivos de las mismas. El objetivo es conocer qué marcos de diseño se han propuesto y de qué manera pueden favorecer el bienestar humano en las futuras colonias.

Palabras clave



Arquitectura espacial
Arquitectura ficción
Bienestar
Hábitat
Luna

Fuente: NASA

Resum

Des del naixement de l'espècie, l'home ha sentit una gran atracció per la bellesa i els misteris de l'univers. L'arribada a la Lluna va ser el cim rere dècades de gran esforç i intensa investigació. L'esdeveniment, a més, simbolitza el primer pas cap a una era en la qual la humanitat abandona el bressol del planeta Terra per a explorar nous i llunyans mons.

Malgrat açò, la colonització de l'espai ha estat summament paralitzada a les dècades posteriors. No obstant això, en els darrers anys, s'ha reactivat l'interés i les activitats d'investigació i exploració s'han vist accelerades de nou. Especialment s'ha posat el focus a la Lluna, que es posiciona com a la gran candidata per a acollir la primera colònia humana fora de la Terra.

Amb aquest treball es pretén recollir diverses arquitectures imaginades a la Lluna, i analitzar els aspectes i paràmetres compositius d'aquestes. L'objectiu és conèixer quins marcs de disseny han estat proposats i de quina manera es pot afavorir el benestar humà a les futures colònies.

Paraules clau

Arquitectura espacial
Arquitectura ficció
Benestar
Hàbitat
Lluna



Fuente: NASA

Abstract

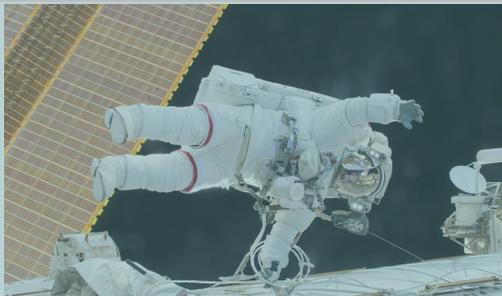
From the dawn of time, humanity has dreamt of reaching the stars. The Space Race of the mid twentieth century brought together the ideal conditions in which intellectual and technological effort could flourish. The landing on the moon's surface stretched the limits of human endeavour, requiring the development of new and fascinating technologies.

In the years since, however, the progress that has been made to conquer outer space has paled in comparison. Despite this, in recent years, the moon has once again sparked a renaissance in space exploration, being the most likely place where the first space colony could settle.

The aim of this project is to show potential moon architecture and analyse compositional aspects and parameters. Key goals are to identify which designs have been proposed and how they might improve inhabitants' comfort beyond the fundamental technologies needed to survive the extreme lunar environment.

Key words

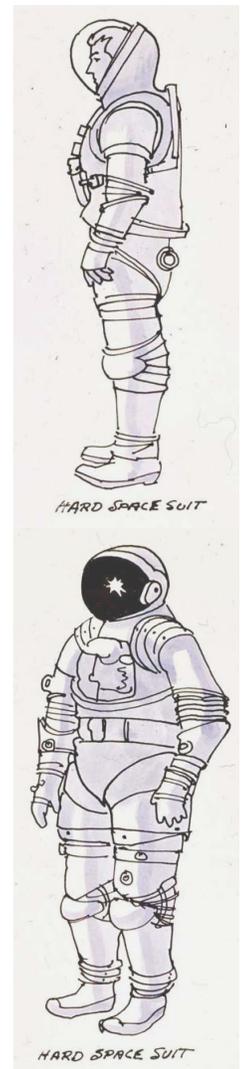
Space architecture
Architecture fiction
Welfare
Habitat
Moon



Fuente: NASA

Índice

1. Introducción	6
1.1. Objetivos	7
1.2. Metodología y Fuentes	8
1.3. Antecedentes y Estado de la cuestión	10
<i>El recorrido de la humanidad de la Tierra a la Luna</i>	10
<i>La carrera por habitar el espacio</i>	12
<i>Estado de la cuestión</i>	15
2. Análisis de las condiciones del entorno lunar	21
2.1. Parámetros físicos	22
2.2. Requisitos humanos para habitar el espacio	26
<i>Requisitos biológicos</i>	26
<i>Requisitos psicológicos</i>	27
<i>Requisitos socioculturales</i>	31
2.3. Actividades y economía Lunar	32
2.4. Análogos y simulaciones	36
3. Estudio de propuestas de hábitats en la Luna	43
3.1. Hábitats de Clase I	45
3.2. Hábitats de Clase II	57
3.3. Hábitats de Clase III	64
3.4. La ciudad en la Luna	68
4. Conclusiones	79
5. Bibliografía	85



[F2] Bocetos de astronautas portando un Traje Espacial Rígido.
Fuente: McCall Studios

1. Introducción

Este trabajo surge con la finalidad de estudiar y analizar diversas arquitecturas imaginadas en la Luna desde la perspectiva del diseño y la composición de los espacios que se han propuesto. La intención es conocer qué estrategias se pueden aplicar para favorecer el bienestar humano en futuras construcciones en el espacio. El satélite de la Tierra es el objeto cósmico más cercano al planeta y el entorno más sensato en el que establecer los cimientos de la exploración humana del espacio. La Luna constituye un excelente campo de pruebas en el que experimentar antes de emprender el viaje a nuevos y lejanos mundos ya que, a pesar de la hostilidad y escasez de recursos, se encuentra a tan “solo” tres días de viaje.

La experiencia ha demostrado que la investigación espacial ha aportado grandes beneficios para el bienestar y el desarrollo en la Tierra. Multitud de materiales y objetos cotidianos que hoy consideramos imprescindibles tienen su origen en el laboratorio de alguna agencia espacial. Por ello, es importante proseguir con este tipo de investigaciones porque, aunque los resultados parecen no ser aplicables a la vida terrestre, en realidad, tienen un alto índice de repercusión.

[F3]



[F4]



[F3] Cara visible de la Luna. Hemisferio orientado a la Tierra.
Fuente: NASA

[F4] Cara oculta de la Luna. Hemisferio no observable desde el planeta.
Fuente: NASA

En el caso que nos ocupa, el trabajo realizado aporta una perspectiva más humana al campo del diseño espacial. Esta disciplina, que enfatiza la eficiencia de la máquina sobre las necesidades de la tripulación, se enfrenta ahora al reto de mejorar la calidad de la vida a bordo. La investigación revaloriza y resalta el papel de la arquitectura como disciplina integradora y propone unas conclusiones que también pueden ser extrapoladas para mejorar el diseño de edificios en la Tierra.

De manera introductoria, se recorre el desarrollo de la construcción espacial, centrandolo en la descripción de los vehículos y estructuras lanzados a órbita. Como punto de partida se concretan los objetivos particulares que se persiguen y la metodología seguida para llegar a ellos, que destaca por el intenso trabajo de investigación previa.

El desarrollo del trabajo se centra primero en el análisis de las condiciones del entorno lunar. Tras ello, se lleva a cabo el estudio de las diferentes propuestas arquitectónicas y se trata de describir sus propiedades funcionales, espaciales y materiales. A su vez, también se pretende establecer una relación entre los proyectos lunares y la arquitectura terrestre.

A modo de conclusión, se proporciona una estrategia general para mejorar la habitabilidad en las futuras colonias humanas fuera de la Tierra.

1.1 Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en mostrar diversas propuestas de hábitats y colonias humanas en la Luna y analizar de qué manera los marcos de diseño pueden favorecer en el bienestar humano. A través de los objetivos específicos, se alcanza el propósito descrito.

- Se pretende presentar una evolución científica y tecnológica de la carrera hacia el espacio, así como su planteamiento futuro.
- Se persigue realizar un estudio del entorno lunar que permita subrayar las características del lugar y comprender cómo afectan al diseño de las construcciones que allí se pretendan instalar.
- Se procura describir las arquitecturas imaginadas a nivel funcional, espacial y material y resaltar su adecuación con el ambiente.
- Se aspira a establecer ejemplos de arquitecturas terrestres cuyas peculiaridades y metas casan con las requeridas en el marco lunar.
- Generar un testimonio gráfico y descriptivo que pueda ser útil en el futuro para la mejora de la habitabilidad de estos espacios.

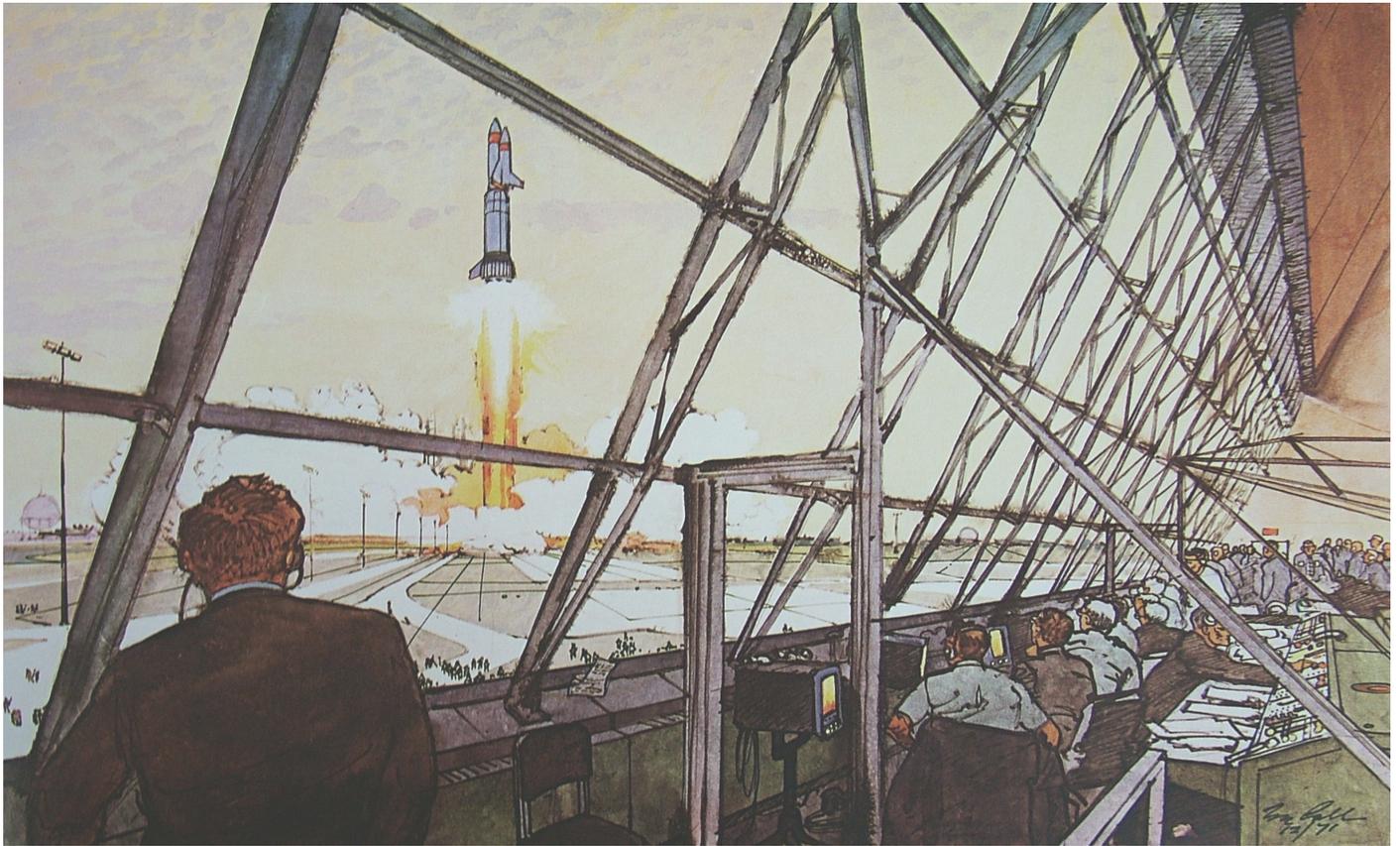
1.2 Metodología y fuentes

Fases

- Acotación. Recopilación y consulta de información de los aspectos más generales del tema propuesto: Arquitectura espacial. Vivir fuera de la Tierra. Debido a la gran extensión e inconcreción, se realiza una amplia búsqueda en distintas fuentes para la obtención de una visión globalizada.
- Investigación. Focalización en el desarrollo de una cuestión: Estudio compositivo y de diseño de colonias espaciales en la Luna. Tras la concreción del asunto, se realiza una consulta de datos acerca del entorno y las condiciones lunares, el diseño y la construcción espacial y de arquitecturas imaginadas en el satélite.
- Análisis. Desarrollo de los objetivos propuestos. Exposición y descripción de las características del diseño espacial a nivel funcional, espacial y material, y la relación con el entorno y la arquitectura terrestre. Elaboración de ilustraciones propias que acompañan el texto y complementan figuras y tablas.
- Resolución. Extracción de conclusiones y recomendaciones de diseño. Se pretende recopilar y aportar estrategias orientadas a incrementar la habitabilidad de las construcciones lunares apoyándose en el análisis anterior.

Fuentes

- Fuentes escritas y audiovisuales online extraídas de publicaciones de prensa digital, archivos fotográficos y plataformas de distribución de contenido en red, páginas web de agencias espaciales gubernamentales, compañías aeroespaciales, estudios de arquitectura y revistas especializadas.
- Fuentes escritas obtenidas a través de buscadores bibliográficos, artículos y trabajos científicos y de investigación; revistas, publicaciones y escritos especializados y de temática general; y trabajos de fin de grado, fin de carrera y tesis doctorales relacionadas con el tema de la arquitectura espacial.
- Fuentes escritas y visuales extraídas de enciclopedias, revistas arquitectónicas y obras literarias.



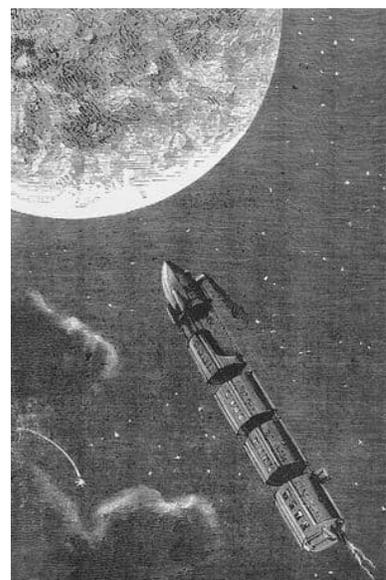
[F5] Equipo de control de lanzamiento en Cabo Kennedy observando el despegue de un transbordador espacial a principios de la década de 1980. Ilustración de Robert McCall.

Fuente: (McCall y Asimov 1974)



[F6] Ilustración de una edición de 1900 de *L'Histoire comique des États et Empires de la Lune*, de Cyrano de Bergerac. Esta obra del Siglo XVII propone diversas y extrañas máquinas tiradas por aves para llegar a la Luna.

Fuente: Enciclopedia Larousse



[F7] Tren de proyectiles para la Luna. Dibujo de Montaut para *De la Terre à la Lune* (1890).

Fuente: Enciclopedia Larousse

1.3 Antecedentes y Estado de la cuestión

“Traditionally, man is impatient of the immediate future. He tends to want, to hope, above all, to imagine, more than is humanly or technologically possible in his flicker of time. (...) As man develops the tools and capabilities to extend his reach farther and farther, there is no doubt he will feel compelled to go as far as he is capable of going”.¹

Con estas palabras de Buzz Aldrin se inicia y concluye el prólogo que precede a “Our world in Space”, título del reconocido escritor de ciencia ficción Isaac Asimov. La obra, relata el camino del hombre a la Luna y especula sobre lo que puede acontecer después. El estilo con el que Asimov presenta las fases de colonización y exploración de la Luna, Marte, el Sistema Solar exterior, y los planetas de estrellas distantes, logra disparar la imaginación del lector de tal modo que las aventuras espaciales que se relatan parecen ser una realidad situada a la vuelta de la esquina.

El atrevimiento de Asimov no hace sino corroborar las citas del artista Robert McCall² y el arquitecto Norman Foster³ que describen el insaciable apetito de conocimiento y superación de la empresa humana; un esfuerzo colosal escondido tras la escena de 1969, cuando un joven comandante a bordo del módulo lunar del Apolo 11, procede a inaugurar una nueva era. “Un pequeño paso para el hombre, un gran salto para la humanidad”.

El recorrido de la humanidad de la Tierra a la Luna

Tal vez, si la Luna nunca hubiese estado en el cielo nocturno, el hombre jamás hubiese experimentado la necesidad de llegar a ella. La cercanía del satélite y la posibilidad de observar en él relieves y topografías similares a las terrestres, ha favorecido una temprana aparición de relatos y representaciones que han cautivado la imaginación de diversas generaciones.

La primera obra de ciencia ficción de la que se tiene noticia, se remonta al siglo II antes de Cristo. Luciano de Samósata es autor de “Historia verdadera”, un relato interplanetario en el que un héroe se ve arrastrado por una tromba marina que lo lleva hasta la Luna. No obstante esto, la novela más relevante, destacada e inspiradora en este género, podría atribuirse a Julio Verne. “De la Tierra a la Luna” narra la aventura espacial de una tripulación a bordo de una nave que se desvía de su destino inicial, la Luna. La obra, no sólo destaca por la sorprendente capacidad de atrapar al lector, sino también por la delicadeza con la que el autor realiza la investigación y tiene en cuenta los parámetros y conocimientos científicos del momento.

El siglo XX vive una auténtica explosión del género de ciencia ficción y, en particular, del interés por la Luna. Los avances en ingeniería y otras disciplinas plantean por primera vez la posibilidad de desarrollar un medio capaz de vencer la gravitación terrestre y desplazarse a través del vacío cósmico.

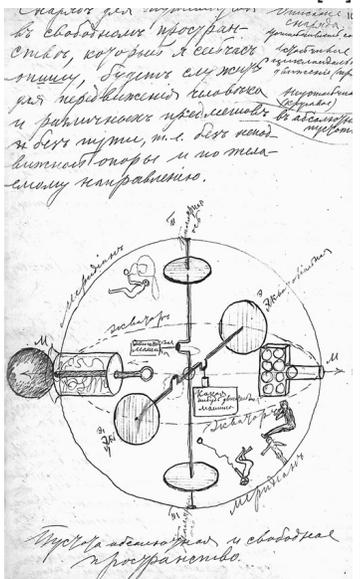
Las ideas del físico ruso Konstantin Tsiolkovsky⁴ (1857-1935) actuaron de catalizador para el desarrollo del vuelo espacial⁵. Comúnmente conocido como el padre de la astronáutica, Tsiolkovsky “tradujo la idea de los viajes interplanetarios del campo de los sueños y la ficción al suelo de la realidad”⁶. Estudió la posibilidad de escapar de la atracción de la Tierra mediante el uso de un cañón como el que proponía Verne. El físico, desarrolló la teoría de la propulsión a chorro de la dinámica de cohetes, y describió un impresionante programa de conquista del espacio en el que ya proponía estaciones espaciales, invernaderos extraterrestres y un sinfín de majestuosas estructuras aeronáuticas⁷.

Sin embargo, sus propuestas pasaron desapercibidas hasta que en 1926 el ingeniero estadounidense Robert Hutchings Goddard (1882-1945) construyera y probara con éxito el primer cohete con combustible líquido. Goddard se convirtió en el primer científico en llevar a la práctica las teorías desarrolladas por Tsiolkovsky⁸.

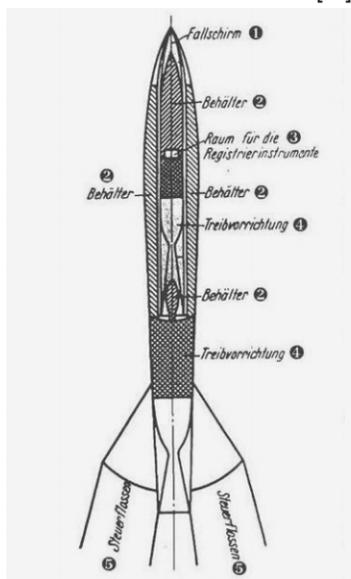
De forma paralela, el ingeniero de cohetes esloveno y pionero de la astronáutica, Herman Potocnik (1892-1929), publicaba en 1928 el libro “Das Problem der Befahrung des Weltraums - der Raketen-Motor” (El problema de los viajes espaciales - el motor del cohete). En él, Potocnik establece planes para una presencia humana permanente en el espacio e incorpora planos detallados para una estación espacial⁹.

Potocnik no sólo proporciona la primera visión de arquitectura espacial¹⁰ sino que se convierte en la base para que el ingeniero de cohetes y arquitecto espacial alemán Werner Von Braun desarrolle las estaciones espaciales S1 (1946) y S2 (1955)¹¹. Von Braun, además, trabajará en el desarrollo de misiles balísticos y cohetes que devendrán en el Saturno V, con el que el hombre llegó a la Luna.

[F8]



[F9]



[F10]



[F8] Fragmento del Manuscrito *Espacio libre*, Konstantin Tsiolkovsky, 1883. Boceto para una nave espacial.
Fuente: Academia Rusa de las Ciencias

[F9] Sección longitudinal de un cohete.
Fuente: Noordung, H. (1995). *The problem of space travel: The rocket motor*

[F10] Cohete Saturno V aproximándose a la plataforma de lanzamiento en la misión del Apollo 11. 20 de mayo de 1969.
Fuente: NASA

La carrera por habitar el espacio

El 12 de abril de 1961, un joven cosmonauta soviético llamado Yuri Gagarin, a bordo de la pequeña cápsula Vostok-1, se convirtió en el primer ser humano en viajar al espacio. Aunque su vuelo duró poco más de media hora, los 108 minutos de travesía marcaron un hito en la historia. Ese mismo año, la marca sería sobrepasada por su compatriota Gherman Stepanovich Titov, quien orbitó varias veces alrededor de la Tierra y sobrepasó la barrera de 24 horas de permanencia en el espacio exterior¹². En los sucesivos años, el tiempo en órbita se fue incrementando exponencialmente llegando hasta las 81 órbitas de duración en 1963.

En 1965, ocurrió otro gran hito en la historia espacial. Los 12 minutos en los que Alexey Leonov permaneció fuera de la nave Voshkod 2, se convirtieron en el primer paseo espacial o EVA (Extravehicular Activity)¹³.



[F11] Yuri Gagarin tras completar el primer vuelo espacial alrededor de la Tierra. 12 de abril de 1961.
Fuente: National Geographic



[F12] Fotograma del primer paseo espacial. Coronel Alexei Arkhipovich Leonov. 18 de marzo de 1965.
Fuente: Fédération Aéronautique Internationale

Hasta la fecha, los soviéticos estaban ganando la batalla de la carrera espacial. Tras los primeros “bip-bip” que transmitió en 1957 el Sputnik, el primer satélite artificial de la historia, otros muchos logros siguieron acumulándose en el medallero moscovita¹⁴. Sin embargo, el otro lado del Atlántico pronto empezaría a escalar posiciones cuando en 1965 la nave Gemini 7 permaneció dos semanas en el espacio con una tripulación de dos hombres para estudiar los efectos a largo plazo de los vuelos espaciales de larga duración¹⁵.

La década de 1970 quedó marcada por el esfuerzo que ambas potencias realizaron en el campo de la investigación y mejora de los diseños espaciales. El propósito era aumentar la comodidad humana a medida que las misiones espaciales se prolongaban en el tiempo.

El módulo ruso Salyut 1(1971) fue la primera estación orbital de todos los tiempos. Equipada desde el principio para alojar a una tripulación de tres hombres entre un periodo de dos a seis meses¹⁶, fue en el momento la nave con el mayor volumen interior y la que permitía el mayor movimiento de los cosmonautas¹⁷. Unos años más tarde se lanzó el Skylab (1973-1979). El equipo americano incorporó en su diseño pequeños compartimentos en los que los tripulantes podían contar con un espacio privado y resguardarse del grupo. También introdujeron mejoras en las instalaciones de iluminación, alimentación e higiene. Las cabinas individuales (llamadas Kayutas en las sondas soviéticas) fueron replicadas también en la Salyut 6 (1977-1982) que, además, incluyó una ventana individual para cada tripulante¹⁸.

[F13]



[F14]



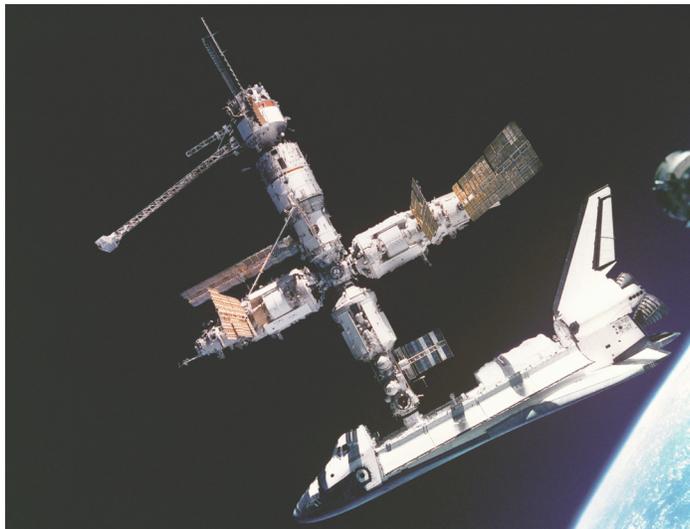
[F13] Salyut 7 (1982-1985), última nave de la primera generación de estaciones espacial soviéticas. Programa Salyut (1971-1991). Fuente: Encyclopædia Britannica

[F14] Estación Espacial Skylab. Fuente: NASA

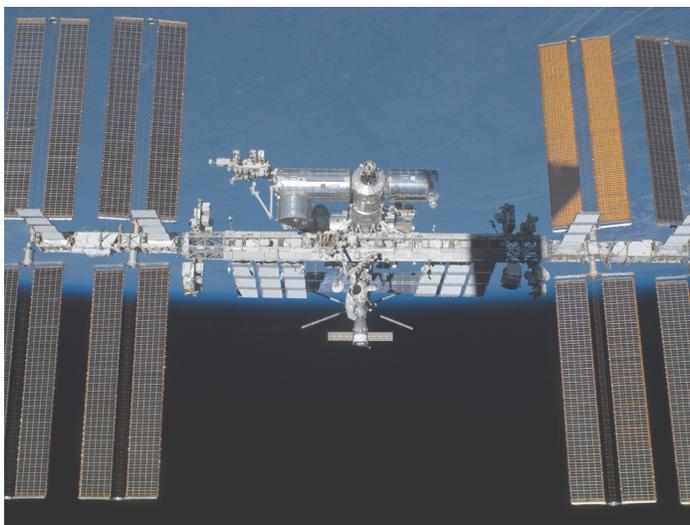
El reducido espacio interior que disponían las primeras estaciones hacía necesario la construcción de nuevas y mayores estructuras. Sin embargo, las limitaciones de tamaño para poder acoplarse a los cohetes y ser lanzadas al espacio, imposibilitaba su materialización. No obstante, los soviéticos resolvieron el inconveniente de forma ingeniosa con la nueva MIR (1986-2001). La estación consistía en un gran complejo espacial surgido a partir de distintos módulos que se ensamblaban y unían al módulo base. Este módulo contaba con 90 metros cúbicos de volumen útil para trabajo y vivienda, y estaba equipado con una cocina, una mesa, elementos de almacenamiento, diversos aparatos médicos y de ejercicio, y un equipo de video. Además, las áreas individuales privadas contaban con una ventana, una silla y un saco de dormir. El espacio interior se fue ampliando sucesivamente tras el acoplamiento de módulos especializados como el Kvant II o Spektr, que se destinaron exclusivamente a la investigación biológica y a la vigilancia y monitorización de la Tierra¹⁹.

La Estación Espacial Internacional (1998-Actualidad) o ISS por sus siglas en inglés, es actualmente la mayor estructura construida por el hombre en el espacio. Al igual que su predecesora, funciona como laboratorio versátil de investigación, plataforma de observación y centro de pruebas para nuevas tecnologías²⁰. En su diseño inicial, la estación contaba con un módulo cilíndrico de 8.8 por 4.4 metros destinado a albergar la residencia de los astronautas. Sin embargo, debido a problemas de diversa índole, el módulo nunca pudo ser lanzado²¹. Actualmente los miembros de la tripulación han establecido sus áreas personales en las áreas menos utilizadas de la estación. Estos fijan los sacos y bolsas de almacenamiento personal a las paredes, y utilizan los espacios flexibles para sus necesidades personales. La situación actual, refleja las desventajas y deficiencias de la falta de planificación de las necesidades humanas a largo plazo²². Es acuciante la limitación de las instalaciones de baño, los pocos compartimentos cómodos para dormir y las malas condiciones de iluminación ambiental que existen²³.

[F15]



[F16]



[F15] Transbordador Atlantis acoplado a la Estación MIR.

Fuente: Encyclopædia Britannica

[F16] Estación Espacial Internacional.

Fuente: NASA

Estado de la cuestión

Albert A.Harrison, profesor emérito del Departamento de Psicología de la Universidad de California, en Davis (EE.UU), define la Arquitectura como “la disciplina teórica y práctica de diseñar y construir espacios para el ser humano”²⁴. El educador, defiende que los arquitectos deben tratar de entender quién y cómo se va a habitar un espacio para poder moldear entornos que se adapten a las necesidades de los ocupantes. Además, plantea la siguiente pregunta: ¿Necesita el espacio arquitectos?

Dos son los enfoques que se valoran a la hora de diseñar una estructura para el espacio exterior²⁵. Por un lado, se busca la eficiencia de la tecnología y la ingeniería. Por otro, el incremento del bienestar y la comodidad de la tripulación. Sin embargo, ambas consideraciones se contraponen.



[F17]

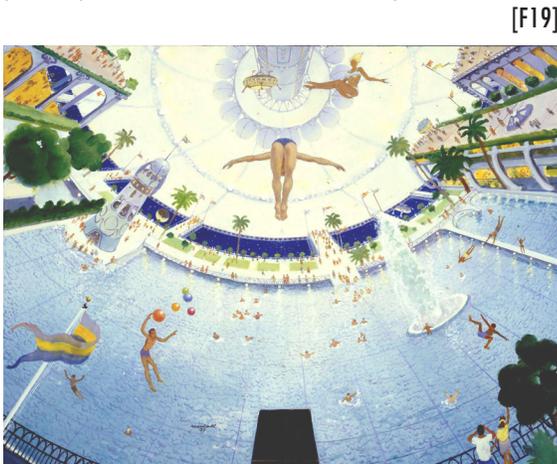


[F18]

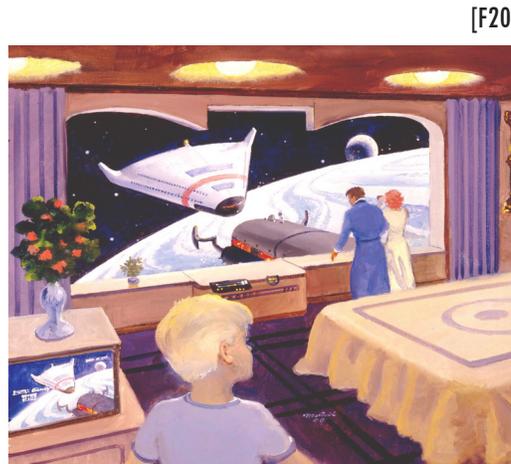
[F17] Astronautas realizando sus tareas en el interior de la Estación Skylab. Ilustración de Robert McCall. Fuente: (McCall y asimov 1974)

[F18] “The Space Bottle”. Concepto ideado por Wernher Von Braun para una cápsula de trabajo que permita realizar tareas en el entorno exterior sin necesidad de vestir un traje espacial. Ilustración de Robert McCall. Fuente: (McCall y asimov 1974)

En la primera de ellas, se considera que el hombre es un componente más de la máquina. Aunque es un elemento necesario, es la parte que más consume y, por tanto, donde se destinan la mayoría de los recursos en la nave. Por ello, desde un determinado punto de vista, se plantea que la comodidad del hombre requiere de poca atención más allá de la estrictamente necesaria para permanecer con vida y realizar sus funciones.



[F19]



[F20]

[F19] Interior de un complejo de ocio espacial. Sin título, Robert T. McCall, 1999. Fuente: McCall Studios

[F20] Escena en un hotel espacial. Los huéspedes contemplan el atraque de una nave desde su dormitorio. Sin título, Robert T.McCall, 1999. Fuente: McCall Studios

En la segunda, se plantea la relación entre el hombre y la máquina desde otro aspecto más humanista. En este caso, se prioriza al usuario humano como un elemento distinto y que requiere de especial atención. Con ello se consigue una mejora de la salud de la tripulación, que es uno de los factores que más influyen en el éxito de las misiones. Pero, para lograr esto, se deben crear unas condiciones de vida adecuadas²⁶.

La ingeniería de sistemas es la disciplina más completa e integradora en materia aeroespacial²⁷. Si bien es cierto que es capaz de asegurar que todos los requisitos, modelos, subsistemas y planes técnicos rindan y trabajen juntos para lograr un objetivo común, en materia de habitabilidad, los conjuntos son bastante primitivos. Aunque es evidente el gran esfuerzo tecnológico realizado para lograr ejecutar estructuras que sustenten la vida en el espacio, apenas se ha mejorado en comodidad y bienestar desde los primeros modelos²⁸. Como tónica general, predominan los espacios rígidos, estrechos y claustrofóbicos, claramente inapropiados para los menesteres del ser humano²⁹.

Las agencias espaciales y sus principales contratistas han apreciado, desde un primer momento, el valor aportado por la introducción de arquitectos en los equipos de desarrollo de proyectos aeroespaciales. Sin embargo, su participación es más bien escasa. Resulta irónico que los responsables de diseñar los lugares para la actividad humana en la Tierra no sean considerados en el los del espacio exterior. Más, teniendo en cuenta que a medida que la duración, distancia, y tamaño de la tripulación se vuelvan mayores, la ingeniería de sistemas no cuenta con los equipos suficientes para abordar todas las cuestiones³⁰.

[F21]



[F21] Constance Adams. Colaboró junto a su compañero de profesión, Kriss Kennedy, en el diseño del Transhab, un módulo inflable destinado a albergar la vivienda de los astronautas de la ISS.

Fuente: New York Times

[F22]



[F22] Galina Balashova. Arquitecta del programa espacial soviético. Encargada del diseño interior de la cápsula Soyuz (1963) y las estaciones espaciales Salyut 6 (1977-1982) y Mir (1986-2001).

Fuente: Revista Frontiere

En 2002, se celebró el primer Simposio Internacional de Arquitectura Espacial en Houston, EE.UU. En él, 42 profesionales y estudiantes adoptaron una definición para la arquitectura espacial. Esta se acordó como “la teoría y la práctica del diseño y construcción de entornos habitados en el espacio exterior”³¹. En palabras del profesor Harrison, la arquitectura espacial “combina ingeniería y estética y requiere conocimiento de los entornos espaciales, ingeniería de vuelo y psicología de entornos aislados y confinados”³².

El arquitecto espacial, al igual que sus homólogos terrestres, debe lidiar con las limitaciones volumétricas, la adecuación de usos, el diseño, la localización de espacios, y un largo etcétera. Además, “debe tener en cuenta la constante letalidad del entorno externo, los inmensos costes de poner materiales en órbita, las limitaciones impuestas por los materiales, los sistemas de soporte vital y las limitadas oportunidades de rescate y reabastecimiento en caso de emergencia”³³. Por eso, y en definitiva, las soluciones de diseño que funcionan en la Tierra no pueden darse por sentadas en el espacio y se necesita de profesionales capacitados que puedan responder a las cuestiones que plantea habitar en el espacio exterior. El espacio necesita arquitectos.

Anotaciones y Referencias

- 1 Edwin E. Aldrin, Jr, introducción a *Our World in Space*, de Robert McCall y Isaac Asimov (Stephens, 1974), 11.
- 2 Robert T. McCall sugiere que “El futuro es brillante y lleno de promesas para todos nosotros. El espíritu humano, como es, con un insaciable deseo de conocer, explorar y comprender, continuará por siempre para llegar al exterior”. «The Artist», McCall Studios, acceso el 15 de junio de 2020, <http://www.mccallstudios.com/>.

Robert T. McCall, en un artículo de recopilación sobre la trayectoria del artista, menciona que “Gracias a Dios hay gente en este mundo con un espíritu de aventura que no se dará por vencida. Gente que está dispuesta a tomar cualquier riesgo para alcanzar sus metas; normalmente son metas dignas, porque permite al resto de la humanidad seguirlas y da coraje a aquellos que siguen”. Bob Shane, «The Cosmic World of Space Artist Robert McCall», *Airport Journals*, 1 de agosto de 2006, acceso el 6 de agosto de 2020, <http://airportjournals.com/the-cosmic-world-of-space-artist-robert-mccall/>.
- 3 “Quizás, para ver el futuro, primero tenemos que viajar a un pasado muy remoto. Y si volvemos la mirada muy atrás entonces veremos continuidad, veremos que los temas se repiten y que ahora podamos materializar cosas que antaño eran sueños”. Espacio Fundación Telefónica, “Norman Foster. Futuros comunes”, entrevista en el Espacio Fundación Telefónica, publicado el 6 de octubre de 2017, video (24:59), <https://espacio.fundaciontelefonica.com/evento/norman-foster-futuros-comunes/>.
- 4 Tsiolkovsky estudió la posibilidad de escapar de la atracción planetaria mediante el uso de un cañón. Sus cálculos demostraron que la aceleración provocaría el fallecimiento de los valientes pioneros. Decidido a encontrar una solución, el físico desarrolló la idea de un propulsor multifase de queroseno, muy similar a los actuales cohetes, capaz de abandonar la influencia gravitacional sin generar fuerzas letales para los viajeros.
- 5 Para una mayor aproximación a Tsiolkovsky, véase Academia Rusa de Ciencias, <http://www.ras.ru/>.

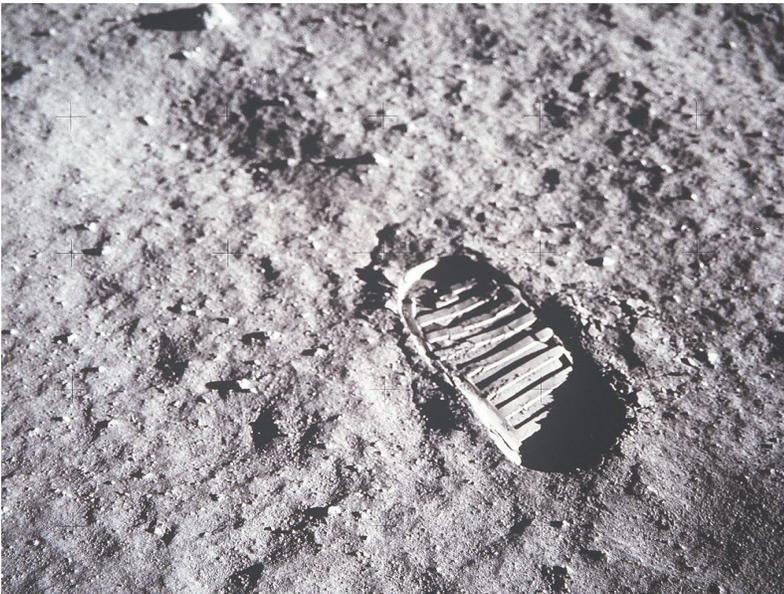
- 6** Glushko V.P y Sokolova S.A, «Readings by K.E. Tsiolkovsky. Tsiolkovsky and astronautics», *From the history of domestic science*, nº3 (1976): 105.
- 7** Javier Yanes, «Konstantin Tsiolkovsky, de campesino sin estudios a padre de la aeronáutica», *OpenMind BBVA*, 13 de septiembre de 2018, acceso el 7 de agosto de 2020, <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/konstantin-tsiolkovsky-de-campesino-sin-estudios-a-padre-de-la-astronautica/>.
- 8** «Dr.Robert H.Goddard, American Rocketry Pioneer», Goddard Space Flight Center, acceso el 16 de junio de 2020, https://www.nasa.gov/centers/goddard/about/history/dr_goddard.html.
- 9** «Slovenia becomes sixth ESA European Cooperating State», The European Space Agency, acceso el 7 de agosto de 2020, https://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/Slovenia_becomes_sixth_ESA_European_Cooperating_State.
- 10** Ondrej Doule, «Ground Control: Space Architecture as Defined by Variable Gravity», *Architectural Design* 84, nº6 (2014): 92.
- 11** Ibid.
- 12** «Gherman Stepanovich Titov», Encyclopaedia Britannica, acceso el 16 de junio de 2020, <https://www.britannica.com/>.
- 13** «Alexei Leonov: The artistic spaceman», The European Space Agency, 4 de octubre de 2007, https://www.esa.int/About_Us/ESA_history/Alexei_Leonov_The_artistic_spaceman.

- 14 Para más información, véase In Space We Trust, <http://inspacewetrust.org/en/> ,y Roscosmos, <http://en.roscosmos.ru/>.
- 15 «Gemini VI Views Gemini VII», NASA, 23 de marzo de 2008, https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_709.html.
- 16 David M. Harland, «Space Station», *Encyclopaedia Britannica*, acceso el 16 de junio de 2020, <https://www.britannica.com/technology/space-station>.
- 17 Jeffrey R. Badger, «Designing for Space, on Earth: Creating More Livable Extraterrestrial Habitats Through Architectural Design» (Trabajo fin de master, Universidad de Cincinnati, 2012), 8.
- 18 *Ibíd.*
- 19 «Mir Space Station », NASA, acceso el 16 de junio de 2020, <https://history.nasa.gov/SP-4225/mir/mir.html>.
- 20 «ISS: International Space Station», The European Space Agency, acceso el 16 de junio de 2020, https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/ISS_International_Space_Station.
- 21 Tariq Malik, «NASA Recycles Former ISS Module for Life Support Research», *Space.com*, 14 de febrero de 2006, acceso el 7 de agosto de 2020, <https://www.space.com/2050-nasa-recycles-iss-module-life-support-research.html>.
- 22 Badger, «Designing for Space», 10.
- 23 Para más información sobre la evolución y el futuro de las construcciones espaciales, véase Harland, Catchpole, y Catchpole, *Creating the international space station*.
- 24 Albert A. Harrison, «Humanizing outer space: architecture, habitability, and behavioral health», *Acta Astronautica* 66, n.o 5-6 (2010): 890.
- 25 Badger, «Designing for Space», 15.
- 26 Klaudiusz Fross, y Maria Bielak-Zasadzka, «Space Architecture», en *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, (Springer, 2018), 345.
- 27 Brent Sherwood, «What is Space Architecture?», en *Out of This World: the New Field of Space Architecture*, Howe, A. Scott, and Brent Sherwood, Reston (VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 4.
- 28 Javier-Chan Porrás-Rhee, «Colonias Espaciales: Estudio Paramétrico de Espacios Habitables En Microgravedad», (Trabajo fin de grado. Universidad Politécnica de Madrid, 2019), 12.
- 29 *Ibíd.*
- 30 Sherwood, «What is Space Architecture?», 4.
- 31 Harrison, «Humanizing outer space», 891.
- 32 *Ibíd.*
- 33 *Ibíd.*

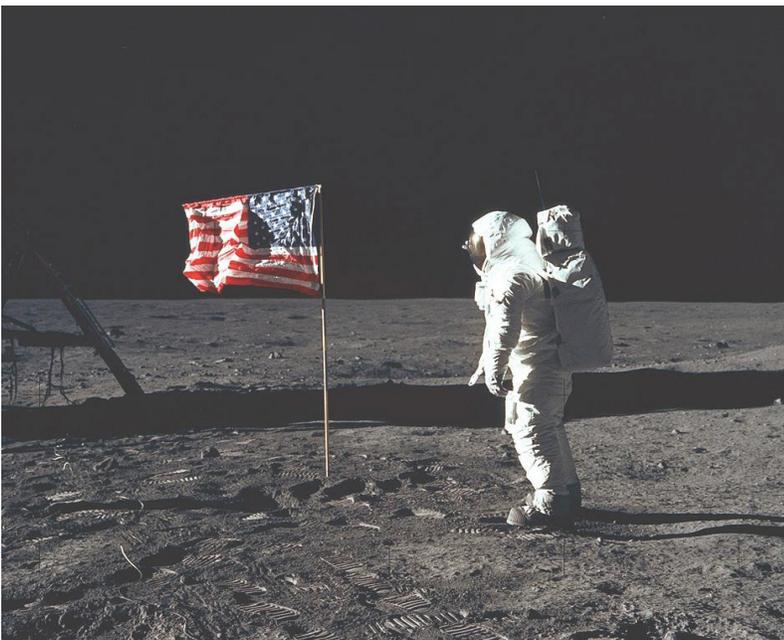
2. Análisis de las condiciones del entorno lunar

Conocer las propiedades del lugar, es un ejercicio que asegura el éxito de cualquier diseño arquitectónico. En general, las características del entorno influyen en gran medida en la manera en la que se trazan las construcciones. Sin embargo, el espacio exterior es un ambiente letal e implacable; un lugar radicalmente diferente al que se puede encontrar en la Tierra, donde la hostilidad de las características del cosmos toman un papel muy importante. No solo resulta imprescindible preservar la vida en el interior de los elementos, sino también, se necesita atender las necesidades humanas básicas, psicológicas y sociales.

[F23]



[F24]



[F23] [F24] Fotografías tomadas por la tripulación de la misión Apollo 11. Debido a las condiciones del entorno, las huellas de los astronautas permanecerán en la superficie de la Luna durante millones de años.

Fuente: NASA

2.1 Parámetros físicos

Las propiedades de un lugar condicionan los diseños de las construcciones. En la Luna, los objetos que albergan a la tripulación se encuentran severamente restringidos por las peculiaridades del entorno.

Vacío

Aunque los datos más recientes indican que la atmósfera terrestre se extiende más allá de la órbita lunar¹, la concentración de gases en la superficie es minúscula e insuficiente para permitir la respiración. A nivel del mar, se registra la máxima densidad de aire, que va disminuyendo rápidamente con la altura de tal modo que el 75 % de los gases están contenidos en los primeros kilómetros (troposfera). En la mesosfera, a una altitud de 90 kilómetros, queda el 0,1%²; por lo que la superficie lunar se encuentra, en la práctica, en una situación de vacío.

Para habitar en la Luna, se necesita contar con una cámara presurizada que contenga la concentración de gases necesaria para la respiración. Además, es importante mantener una presión determinada para que exista agua líquida. Hay que tener presente que, al introducir aire y presión en el interior de una cámara, se genera una fuerza que empuja la estructura hacia el exterior. Esto se debe a la diferencia de presión entre el interior y el exterior. Como puede darse lugar a que se produzcan fisuras, para reducir el riesgo, es conveniente realizar un diseño con forma capsular³. Esta geometría permite que la presión se distribuya uniformemente en todos los puntos de la estructura y evita que los esfuerzos se concentren en esquinas y bordes.

Radiación

La atmósfera y el campo magnético terrestre protegen la superficie de la Tierra de las partículas radiactivas y nocivas provenientes del cosmos y el viento solar. La Luna, por el contrario, carece de cualquier protección. Al ser un cuerpo geológicamente inactivo, en su interior no se genera el efecto dinamo que origina el campo magnético terrestre. Igualmente, las moléculas gaseosas que pueden atenuar en parte el efecto de dicha radiación, escapan fácilmente al espacio debido a la reducida gravedad.

Los seres vivos tienen un límite de exposición a la radiación. Sobrepasar esta cifra causa daños en la salud, incluso llega a ser letal. Por eso, ante la falta de protección natural en la superficie lunar, es fundamental la utilización de un material que recubra la envolvente del hábitat y sea capaz de detener a la mayor parte de partículas que puedan penetrar hacia el interior del hábitat⁴.

Algunos autores, entre los que se encuentran Isaac Asimov y Norman Foster⁵, han teorizado sobre la construcción de hábitats que aprovechen la protección que ofrece la capa de suelo lunar sobre ellos⁶. No obstante, según

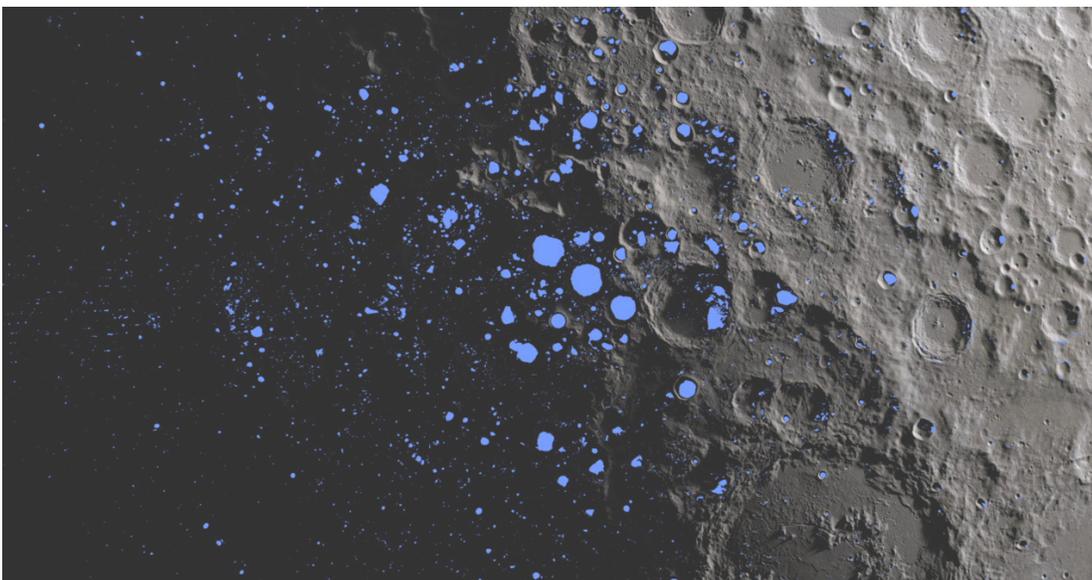
investigaciones realizadas por el Doctor Ondrej Doule, profesor de la Facultad de Ingeniería y Ciencia del Instituto de Tecnología de Florida, se requieren muros de al menos 2 metros de espesor contra la radiación ionizante y los proyectiles de meteoritos⁷.

Temperatura

En los entornos vacíos, sin atmósfera, el intercambio de calor entre objetos se produce de forma distinta a la que se experimenta en la superficie de la Tierra. Al no existir en el medio un material que redistribuya la temperatura, el efecto disuasorio de la convección toma un valor despreciable, y la incidencia de la radiación adquiere una gran importancia. Dicho esto, en el espacio, aquellos objetos que reciben luz del Sol acumulan energía de forma continuada que solamente ceden al entorno, cuando atraviesan una zona de umbría y hasta que se equilibran con él.

Sin la existencia de aire, o cualquier otro material capaz de distribuir y homogeneizar el calor, el rango de temperatura que pueden alcanzar dichos objetos, se sitúa entre los 120°C y los -180°C⁸. Estos son valores completamente hostiles para la vida humana. No obstante, un material envolvente con un coeficiente de reflexión alto disminuye la radiación de forma considerable. Esto es especialmente oportuno dado que la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior conviene que sea suave y fácil de controlar⁹.

Diversos estudios y observaciones llevadas a cabo por las agencias espaciales han sugerido que los polos podrían ser la mejor localización para establecer un asentamiento humano en la Luna. En estas latitudes, el rango de temperaturas es más moderado, incluso llega a ser constante en aquellos cráteres en los que su interior permanece en sombra perpetua¹⁰.



[F25] Polo Sur de la Luna. Las zonas coloreadas corresponden a las regiones de sombra permanente, donde la temperatura puede alcanzar los -247°C.

Fuente: NASA

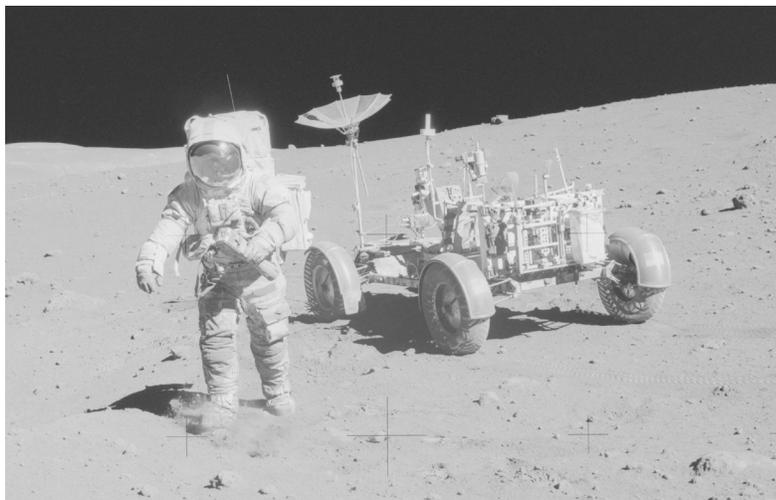
Gravedad reducida

La gravedad de la Luna es aproximadamente un sexto de la terrestre. Esto significa que una persona media de setenta y cinco kilogramos pesaría unos doce kilos y medio en su superficie. El cuerpo humano, adaptado a la fuerza de atracción de la Tierra, tras largos periodos de tiempo sometido a una menor gravedad, sufre patologías debido a la reducción de carga en el esqueleto y los músculos¹¹. Los problemas más destacados (atrofia, pérdida de masa muscular y ósea, desmineralización, aumento del riesgo de fracturas, pérdida de tensión y arritmia cardíaca)¹² se producen en el sistema muscular, óseo y circulatorio¹³.

Actualmente, existen dos soluciones para mitigar tales efectos. Por un lado, se limita la duración de las misiones espaciales a un periodo corto de tiempo. Y, por otro, se obliga a realizar ejercicio a bordo de las naves¹⁴. De esta forma, se fuerza el uso de músculos y huesos, y se logra una mayor y más rápida recuperación cuando se regresa a la Tierra.

En el caso de una colonia permanente, debido a la imposibilidad de reducir el periodo de estancia en la Luna, se debe tener presente la necesidad de ejercitarse dentro del habitáculo. Por ello, es conveniente idear un diseño que cuente con espacio suficiente para incorporar los requisitos necesarios para ejercitarse a bordo.

Los entornos con una gravedad inferior a la terrestre, además, plantean un interesante reto en el diseño del hábitat. El movimiento y el rendimiento en gravedad reducida difieren del que se obtiene bajo la atracción terrestre. Aunque los rígidos y voluminosos trajes de los astronautas confunden la experiencia del paseo sobre la luna, la altura de un pequeño salto es entre tres y cuatro veces superior a la altura que se obtendría en gravedad terrestre¹⁵. Además, acciones como correr, escalar o subir escaleras requiere de mayores volúmenes y espacios verticales y horizontales, por lo que se espera que los diseños se adapten a las necesidades de la locomoción lunar.



[F26] Fotografía tomada por el comandante David R. Scott durante la tercera actividad EVA de la misión Apollo 15 (1971). Los trajes espaciales distorsionan la locomoción humana bajo los efectos de una gravedad cinco sextos inferior a la terrestre.
Fuente: NASA

Impactos de micrometeoritos

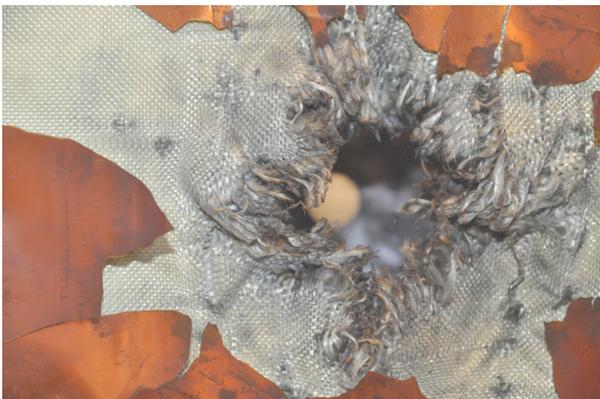
El espacio exterior es un entorno en el que orbitan abundantes partículas y fragmentos de roca, en su mayoría de pequeñas dimensiones. Cuando estos objetos se acercan a la Tierra y se precipitan hacia ella atraídos por su fuerza de la gravedad, el rozamiento con la atmósfera provoca una fricción que los volatiliza e impide que lleguen a su superficie. En la Luna, sin embargo, la tenue atmósfera no brinda protección¹⁶ y el impacto de las más minúsculas de las rocas, debido a la elevada velocidad a la que se desplazan, es suficiente para causar daños de respetable calibre¹⁷.

Aunque ya existen materiales protectores que actúan como parachoques, se ha propuesto también la utilización tanto de regolito como de rocas lunares para elaborar densos escudos contra los impactos¹⁸.

[F27]



[F28]



[F27] [F28] Daños provocados por el impacto de una esfera de aluminio de 7'5 mm de diámetro sobre distintos materiales. A pesar de su reducido tamaño, la alta velocidad con la que impactan los fragmentos de roca espacial (7km/h) generan daños importantes.

Fuente: ESA

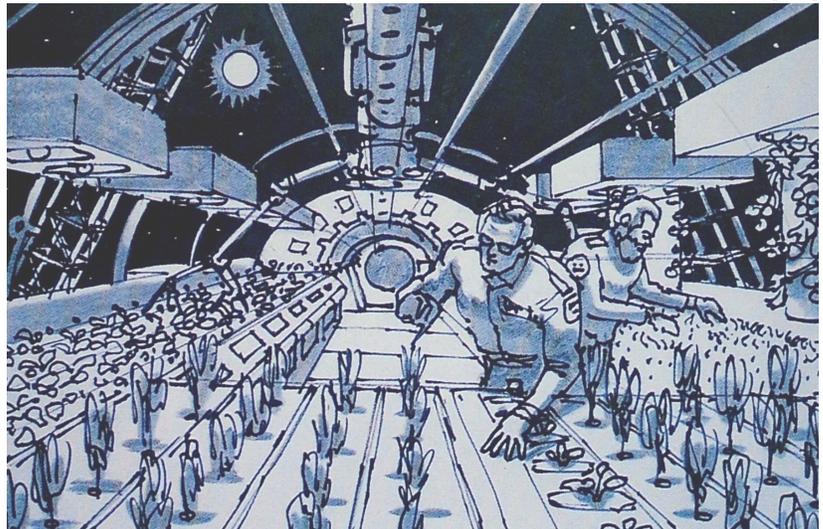
2.2 Requisitos humanos para habitar en el espacio

Requisitos biológicos

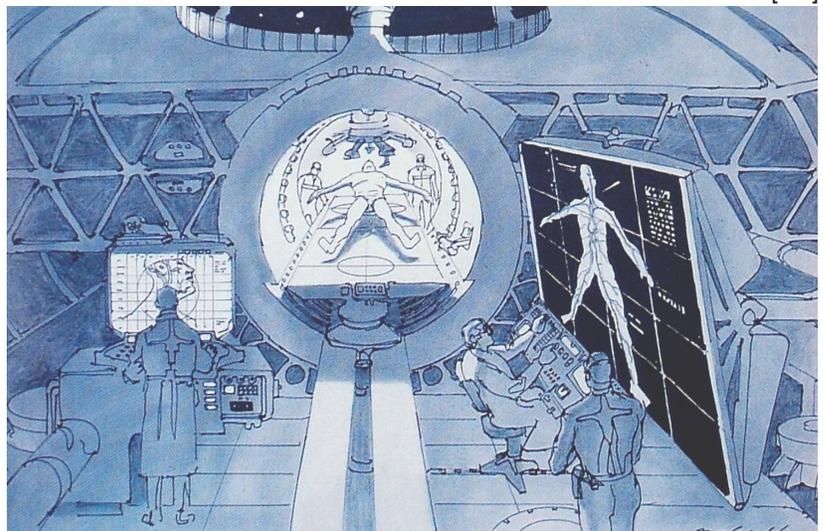
Aire, agua y alimentación son recursos elementales que los humanos necesitan tomar para sobrevivir. En el espacio, además, el control de la temperatura, la ventilación, la higiene personal y la gestión de desechos, también se vuelven importantes.

Los arquitectos lunares deben tener presente que los diseños deben atender las necesidades humanas básicas e incorporar sistemas, maquinaria e instrumentos que suministran y garantizan estos elementos vitales. Por nombrar algunos de ellos, se podrían destacar aquellos que mantienen un equilibrio de temperatura y humedad adecuado, suministran aire fresco de forma continuada, tratan los desechos, almacenan el agua, y permiten el cultivo y la preparación de alimentos¹⁹.

[F29]



[F30]



[F29] [F30] Bocetos del artista Robert McCall (1980). Dos científicos cultivan vegetales en el laboratorio mientras un grupo de cirujanos realiza un chequeo a un malherido explorador.

Fuente: McCall Studios

Requisitos psicológicos

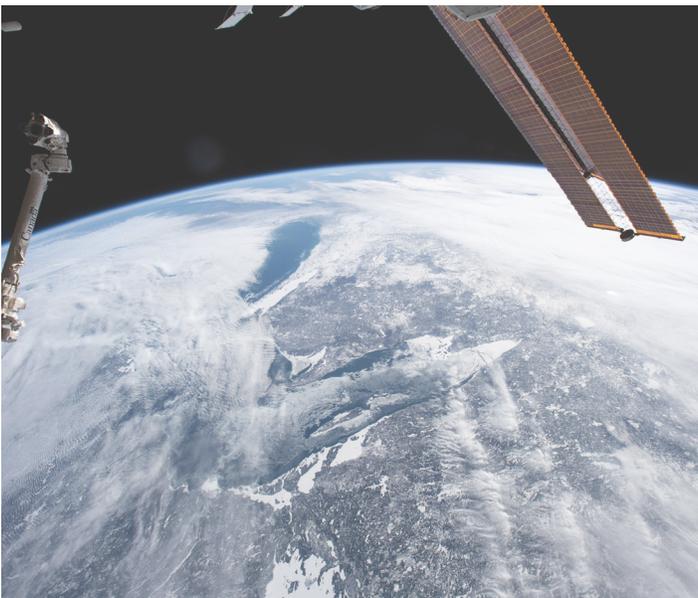
Además de atender las necesidades humanas básicas, es muy importante garantizar la salud y la estabilidad a nivel emocional y mental. El aislamiento y el confinamiento son considerados como los principales desafíos de la vida en el espacio²⁰. Los viajeros espaciales están aislados de sus contactos sociales habituales y confinados en un recinto usualmente de reducidas dimensiones.

Varios grupos de trabajo han propuesto algunas consideraciones deseables de incorporar en el diseño de los habitáculos para reducir los efectos que la situación pueda provocar:

- Dotar a las estructuras de suficiente espacio y volumen para permitir trabajar de forma cómoda y eficaz. Contar con amplias áreas de almacenamiento y múltiples compartimentos que posibiliten una ordenación variada y segregada por categorías²¹.

- Diseñar espacios flexibles y adaptables que faciliten la realización de diferentes actividades en un mismo lugar. Incorporar lugares para el ocio, el entretenimiento, la actividad deportiva y la relación social²².

- Lograr una buena iluminación. La necesidad de diseñar una estructura cerrada y con pocas aberturas al exterior puede provocar que los residentes experimenten claustrofobia. El entrenamiento y la preparación que se suele realizar para que los residentes se adapten a este tipo de entornos opresivos, no es garantía suficiente para afirmar que la sensación de agobio, ansiedad y estrés no va a ser sufrida en mayor o menor medida. Por eso, se deben evitar los diseños que crean espacios oscuros, pues son más proclives a provocar estrés y ansiedad²³.



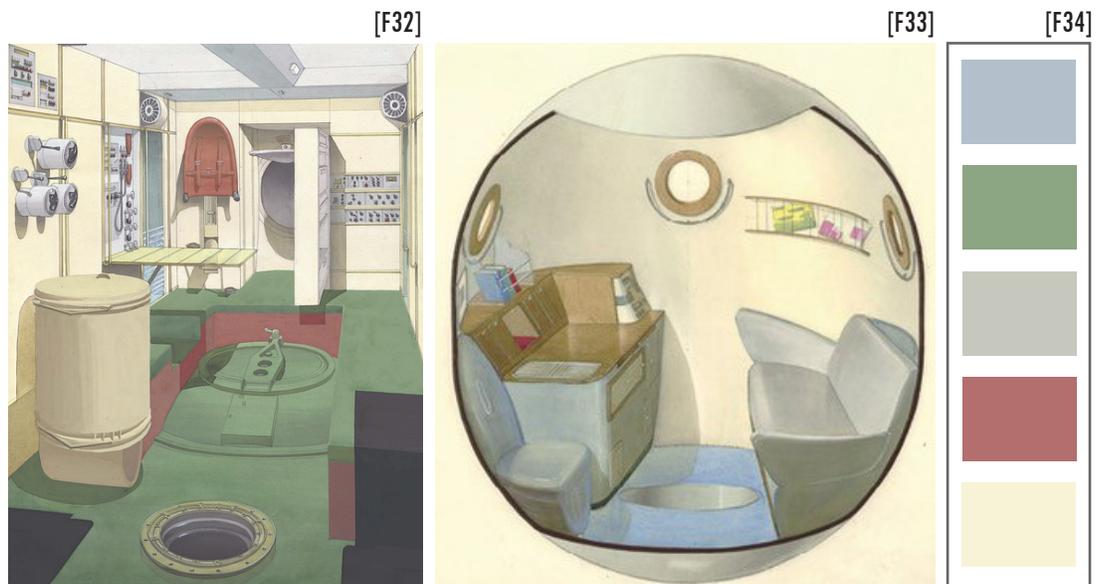
[F31] La Tierra vista desde el interior de la ISS. Mirar por la ventana es uno de los pasatiempos favoritos en los viajes espaciales. En las futuras colonias se sospecha que la “emoción del momento” se desgastará a medida que los colonos se acostumbren al nuevo entorno. Por ello, es necesario contar con múltiples espacios y alternativas de ocio.

Fuente: NASA

- Uso del color. Se ha detectado que los colores generan un gran impacto emocional en la mente y evocan sensaciones en el observador. El color ayuda a mejorar el estado de ánimo y a reducir la sensación provocada por un hacinamiento prolongado²⁴. Eva Heller, psicóloga alemana autora de “Psicología del color. Cómo actúan los colores sobre los sentimientos y la razón” realiza una extensa disertación sobre el color y su influencia en la psique humana.

Se recomienda la utilización de los colores suaves, claros y cálidos en espacios interiores, ya que resultan muy eficaces para prevenir la depresión que provoca la soledad de la vida en el espacio²⁵. No obstante, en condiciones de gravedad reducida, el ojo humano percibe los colores con menor intensidad debido a la mayor dificultad para oxigenar los tejidos²⁶; por eso se recomienda también emplear colores más fuertes²⁷.

El color también se puede utilizar para mejorar la orientación dentro del habitáculo. Aunque en menor medida en condiciones de ingravidez, la visión es el sentido por el que más se guían los humanos. El uso de los colores para delimitar los planos del suelo y techo es una medida para configurar de manera inmediata la direccionalidad arriba-abajo²⁸. Además, los espacios pueden contar con diferentes tonalidades según su uso.



[F32] Boceto para el diseño interior de la Estación Espacial Mir. Galina Balashova (1980).

Fuente: Galina Balashova Archives

[F33] Diseño interior de la cápsula Soyuz. Ilustración de Galina Balashova (1963).

Fuente: Galina Balashova Archives

[F34] Paleta de colores utilizada por Galina Balashova. El azul, el verde, el rojo, el negro y el amarillo son los colores más fácilmente apreciables por la vista humana. Las distintas combinaciones de estos pigmentos generan confianza, entornos acogedores, e invitan a sociabilizar.

Fuente: Elaboración Propia

- Proteger los dormitorios frente a la luz y al sonido para facilitar la calidad del sueño así como para mantener un ciclo de 24 horas regulando la iluminación y programando actividades.

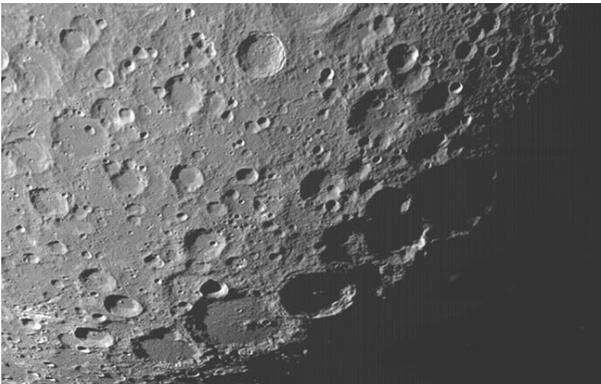
En la Luna la transición entre el día y la noche se produce de forma brusca, no existe una transición como en la Tierra. Además, la duración del periodo de luz y sombra es radicalmente diferente a la de la Tierra. La Luna, al igual que muchos otros satélites naturales, sufre acoplamiento de marea, es decir, siempre presenta la misma cara hacia su planeta. Esto se traduce en que el tiempo que se tarda en realizar una órbita alrededor de la Tierra equivale a lo que tarda en rotar en sí misma, es decir, un día; por lo que en la Luna un día dura 29,53 días. Por ello es muy importante que los diseños garanticen una buena calidad de sueño, ya que los profesionales y habitantes de la colonia deben poder hacer su trabajo correctamente, reaccionar adecuadamente ante las emergencias y conservar las capacidades de rendimiento intactas²⁹.

La iluminación se puede combinar con la coloración para crear espacios que varíen de tonalidad a lo largo de la jornada o en los momentos en los que se requiera. De esta forma se ayuda a percibir más claramente el paso del tiempo o ajustar las condiciones de las salas a las necesidades de trabajo o gusto estético personal (particularmente en las áreas más privadas como los dormitorios de la tripulación)³⁰.

[F35]



[F36]



[F35] [F36] Límite de los hemisferios iluminados y no iluminados de la Tierra y la Luna. En el planeta no se produce una brusca transición entre el día y la noche. La coloración azulada característica de la atmósfera, va adoptando progresivamente una tonalidad rosácea y rojiza a medida que el Sol se aproxima al horizonte. Sin embargo, en la Luna se crea un cambio instantáneo. Nótese el límite en la superficie, sólomente distorsionado por la irregularidad de los cráteres y de las cadenas montañosas.

Fuente: ESA y la Indian Space Research Organization.

- Incorporar la naturaleza al diseño del habitáculo. En un entorno artificial como el de la colonia espacial, los estímulos naturales de la vida en la Tierra como la brisa, la lluvia, las estaciones y los aromas no pueden ser disfrutados. Además, la dificultad de contar con grandes y numerosas ventanas para contemplar el paisaje exterior dificulta el contacto de los humanos con los elementos naturales. Existen estudios de demuestran que crear una conexión artificial con el medio ambiente es muy beneficioso en condiciones de aislamiento.

El uso de pantallas digitales y diferentes elementos artísticos pueden ayudar a contrarrestar la monotonía sensorial³¹. El empleo de madera, telas y otras fibras naturales en muebles, menaje y los elementos decorativos también puede resultar eficaces. No obstante, el único contacto directo se produce en los invernaderos, donde la producción de alimento se puede combinar con la práctica de la jardinería y la contemplación y disfrute de la vegetación.

[F37]

[F37] Detalle del panel de control del módulo orbital Soyuz.

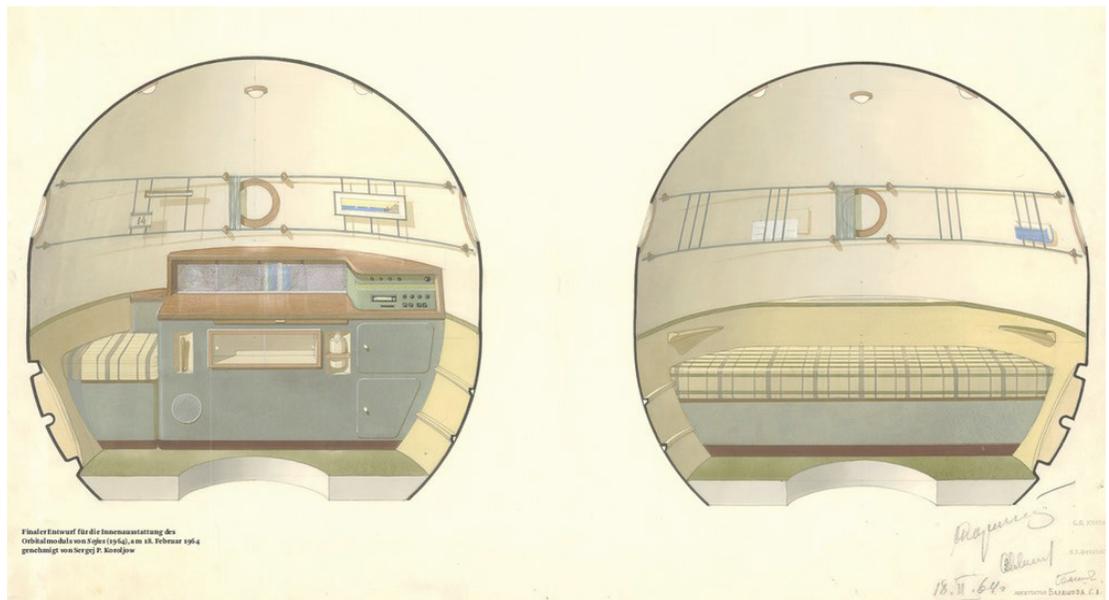
Fuente: Galina Balashova Archives



[F38] Boceto para el diseño interior del módulo espacial Soyuz. Galina Balashova (1963). Se puede apreciar la incorporación de estrategias para facilitar la estancia a los intrépidos astronautas, como el uso de madera, la coloración y los elementos de almacenaje, entre otros.

Fuente: Galina Balashova Archives

[F38]



Finaler Entwurf für die Inneneinrichtung des
Orbitalmoduls von Soyuz (1964), am 18. Februar 1964
genehmigt von Sergej P. Koroljow

18.11.64
Galina Balashova
Soyuz-2
Soyuz-2
Soyuz-2

Requisitos socioculturales

El aislamiento prolongado y el confinamiento están asociados con el aumento de las tensiones interpersonales. Las más que probables diferencias socioculturales que pueden existir entre los habitantes de la colonia aumentan los desafíos de los diseñadores. Los problemas interpersonales surgen cuando no todos a bordo comparten un lenguaje común y/o presentan diferentes estándares en áreas como la higiene personal, la distancia social, las preferencias por la comida y el entretenimiento³². Por ello, para minimizar los conflictos, los diseñadores y arquitectos deben tener presente el uso de varios mecanismos:

- Crear entornos que apoyen la privacidad. Los astronautas necesitan de un lugar propio para el descanso y la recuperación, así como de pequeñas áreas en las que mantener conversaciones confidenciales o actividades con un grupo reducido de personas. No obstante, de forma contraria, también se necesitan grandes salas donde organizar diversos eventos con el resto de los residentes. El profesor Albert Harrison, de la universidad de California, propone diseños que eviten los sesgos etnocéntricos, reconozcan las diferencias culturales, apoyen la intimidad y disuadan de aislarse del grupo durante periodos prolongados. Al mismo tiempo, añade que “la arquitectura debe ayudar a las personas a tolerar las diferencias culturales, pero sin forzarles a participar en celebraciones que no les interesan”³³.

- Diseños vernáculos. Con el paso del tiempo, especialmente si se reduce el contacto entre los habitantes de la colonia y los de la Tierra, las tradiciones, creencias y costumbres del asentamiento pueden diferenciarse cada vez más de la cultura terrestre. El profesor Harrison, de nuevo, propone que los arquitectos espaciales proporcionen a los colonos diseños que incorporen elementos que ayuden a llevar adelante la cultura terrestre, pero que también fortalezcan e identifiquen la cultura emergente en el espacio³⁴.



[F39] Fotografía tomada durante la misión STS-131 en la Estación Espacial (2010). Como ya ocurre en la actualidad, la distinta procedencia y diversidad cultural de los tripulantes va a ser un hecho. Los posibles conflictos interpersonales deben ser minimizados con ayuda del diseño.

Fuente: NASA

2.3 Actividades y economía lunar

La Luna juega un papel muy importante en la exploración espacial humana. Varias razones la convierten en un entorno ideal para la instalación de una pequeña estación en la que aprender a vivir en un mundo extraterrestre.

La primera de ellas es la accesibilidad. Las tecnologías actuales de lanzamiento y transporte permiten que tanto misiones comerciales como gubernamentales puedan alcanzar su órbita tras tres días de viaje. Por otro lado, la baja gravedad proporciona una excelente ventaja para convertirse en el principal punto de reabastecimiento y mantenimiento de las misiones espaciales, pues se requiere mucha menos energía para volver de nuevo al espacio que desde la Tierra. Por último, su entorno hostil posibilita testear las tecnologías, procedimientos y protocolos de gestión de riesgos de futuras misiones con total realidad³⁵.

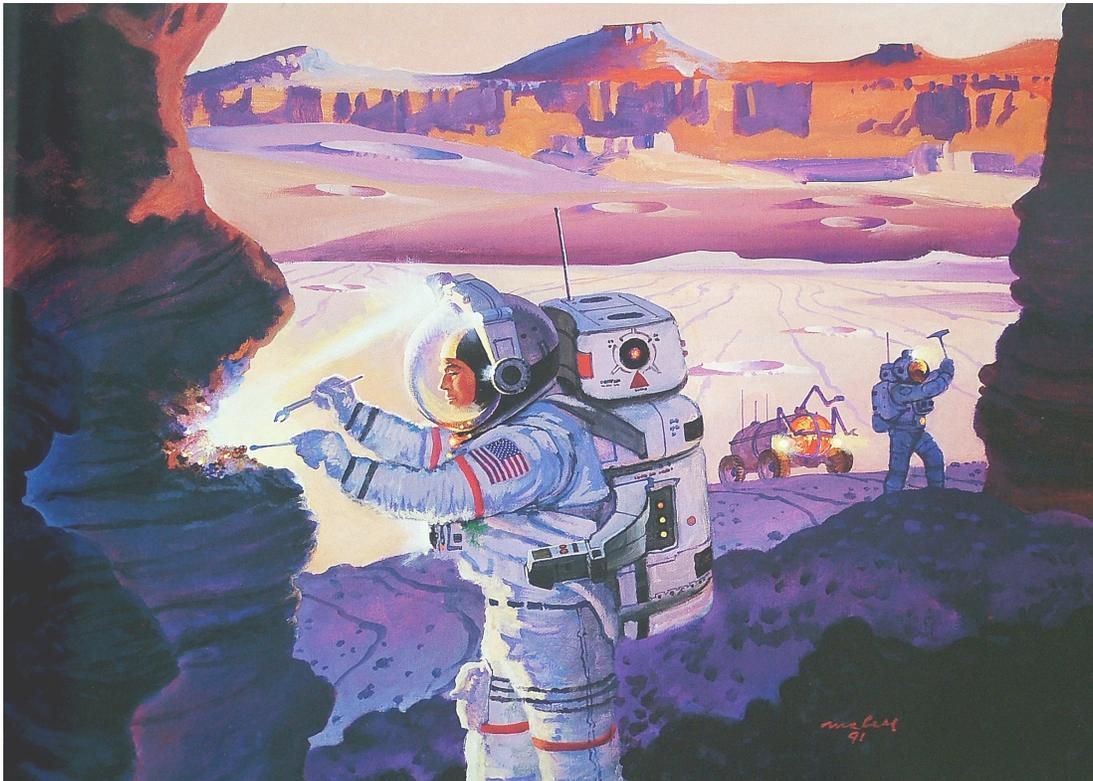
Johann-Dietrich Woerner, Director General de la Esa en una entrevista para la BBC dijo: “Un pueblo en la Luna no debe significar sólo algunas casas, una iglesia y un ayuntamiento”³⁶. Desde los primeros visionarios, el concepto de colonia lunar ha tendido hacia uno de los tres tipos generales³⁷: una base científica, un asentamiento minero, o una ciudad³⁸. Aunque son técnicamente posibles, para el desarrollo a gran escala y a largo plazo de las actividades resultan poco prácticos los propósitos únicos (como ya se ha demostrado en los intentos de reconversión de estaciones espaciales como la MIR). El modelo alternativo es una estructura de uso mixto, en la que se facilite la instalación y el crecimiento de diversas actividades espaciales, pues se ahorra en costos de infraestructura y se aprovechan los beneficios de la coubicación, los servicios compartidos y las economías de escala³⁹.



[F40] “Construcción de Lunogrado”, Alexei Leonov y Andrei Sokolov, 1967. Ilustración para el libro “Stars are awaiting for us”. La imagen muestra una ciudad lunar en construcción. Unas vagonetas se adentran hacia el interior de una mina subterránea, pues todos los edificios se están excavando bajo tierra para aprovechar la protección que brinda la capa de regolito lunar.

Fuente: scifiart.narod.ru

Aunque el único negocio comercial potencialmente viable de forma independiente sea la minería⁴⁰, como se ha comentado anteriormente, es necesario incluir diversas actividades. La ciencia, es un pilar fundamental para el éxito del desarrollo de la colonia. La exploración científica es necesaria para conocer el potencial de la Luna⁴¹, y la investigación permite un desarrollo tecnológico no solamente útil para la colonia, también para la Tierra.



[F41] "Searching for life", Robert McCall, 1991.

Fuente: McCall Studios

Como dijo Isaac Asimov: "La Luna puede convertirse en una industria de alta especialización para producir instrumentos y componentes que no pueden hacerse en la Tierra de una manera tan barata y eficiente y a veces imposible"⁴². Un ejemplo de ello es la imposibilidad de realizar diseños de forma eficaz, pues sólo operando en el ambiente lunar se puede experimentar y testear de forma continua. Como se muestra en la Tabla 1, el nivel tecnológico de los componentes de la colonia es directamente proporcional al estado de consolidación de esta. Cuanto más avanzada se encuentre la tecnología que se testea, mayor será la expansión alcanzada por la colonia. Además, con el crecimiento de la colonia, la complejidad de la industria lunar irá en aumento. Muchas de las actividades, descubrimientos y manufacturas podrían fabricarse in-situ y ser vendidos a la Tierra, lo que crearía una economía saludable y duradera⁴³.

[T1] Desarrollo tecnológico e industrial para cada nivel de colonización.

Fuente: Elaboración propia

DESARROLLO TECNOLÓGICO	TIPO DE MANUFACTURA	NIVEL DE COLONIZACIÓN
BAJO	INTEGRADO	ACTUAL
MEDIO	PREFABRICADO	INICIAL
ALTO	IN-SITU	AVANZADO

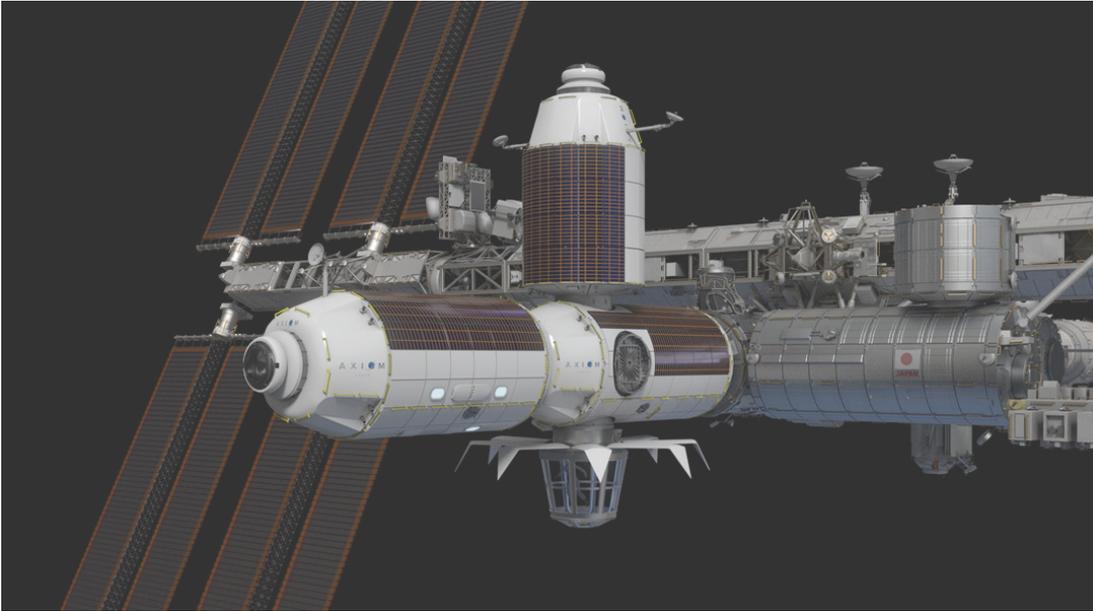
El estudio y la monitorización de la Tierra y el Espacio también puede resultar muy beneficioso para la colonia. Johann-Dietrich Woerner, Director General de la Esa, propone construir un telescopio en el lado oculto de la Luna⁴⁴. Sin atmósfera que perturbe, altere o disminuya la observación y casi 2000km de protección frente a radiaciones, luces e interferencias provenientes de la actividad humana en la Tierra, se pueden alcanzar grandes avances en poco tiempo⁴⁵.



[F42] Radiotelescopio de Arecibo. Infraestructura similar a la que se plantea construir en un cráter de la cara oculta de la Luna.

Fuente: The Arecibo Observatory

Por último, el turismo también sería una gran fuente de ingresos. Como dice Arthur C. Clarke en Saturno Naciente: “Dondequiera que haya algo extraño, algo bello, o nuevo, la gente querrá verlo”⁴⁶. En 2020, la NASA espera abrir al turismo la Estación Espacial Internacional⁴⁷ y se espera que la medida tenga un gran éxito tras el interés de grandes empresas por seguir sus pasos⁴⁸.



[F43] Representación de los módulos de la compañía Axiom acoplados a la ISS. La compañía prevé operar en la Estación Espacial cuando las agencias espaciales gubernamentales se retiren. Se pretende ampliar el volumen destinado a vivienda, investigación y manufactura para crear un gran complejo espacial.

Fuente: Axiom Space



[F44] Cápsula Olympus, prototipo de módulo inflexible para vivienda de la compañía Bigelow para la ISS. Las agencias espaciales están empezando a colaborar con diversas empresas aeroespaciales para el desarrollo de una industria potente de construcción e investigación aeroespacial.

Fuente: Bigelow

2.4 Análogos y simulaciones

La vida humana es una actividad extremadamente compleja que requiere mucho más que un alojamiento para protegerse de los elementos. El diseño es una pieza clave para lograr que los humanos desarrollen una excelente calidad de vida en el interior de las construcciones. Cómo lograr un diseño adecuado para vivir es una cuestión que no puede ser resuelta por un modelo matemático. A lo largo de los siglos, la interacción entre la arquitectura y el hombre se ha ido perfeccionando y adaptando a medida que las sociedades y sus necesidades evolucionaban.

En el espacio, esto será un hecho tan cierto como lo ha sido en la Tierra. No obstante, las oportunidades de investigación y experimentación en el espacio exterior son extremadamente limitadas y costosas.⁴⁹ La escasa información in situ con la que se cuenta, se obtiene a través de las diversas misiones espaciales lanzadas a lo largo de las décadas. Por esa razón, la mayor parte de la investigación se realiza en la Tierra recurriendo a simulaciones y estudios en espacios análogos para observar cómo es la respuesta humana y mejorar los diseños, logrando un equilibrio entre la minimización de recursos y la maximización de los resultados⁵⁰.

Análogos

Los análogos son aquellos lugares de la superficie terrestre con aspectos ambientales comparables a los del espacio u otros planetas. Estos entornos, comparten cualidades comunes como el aislamiento, los entornos duros y las situaciones estresantes.

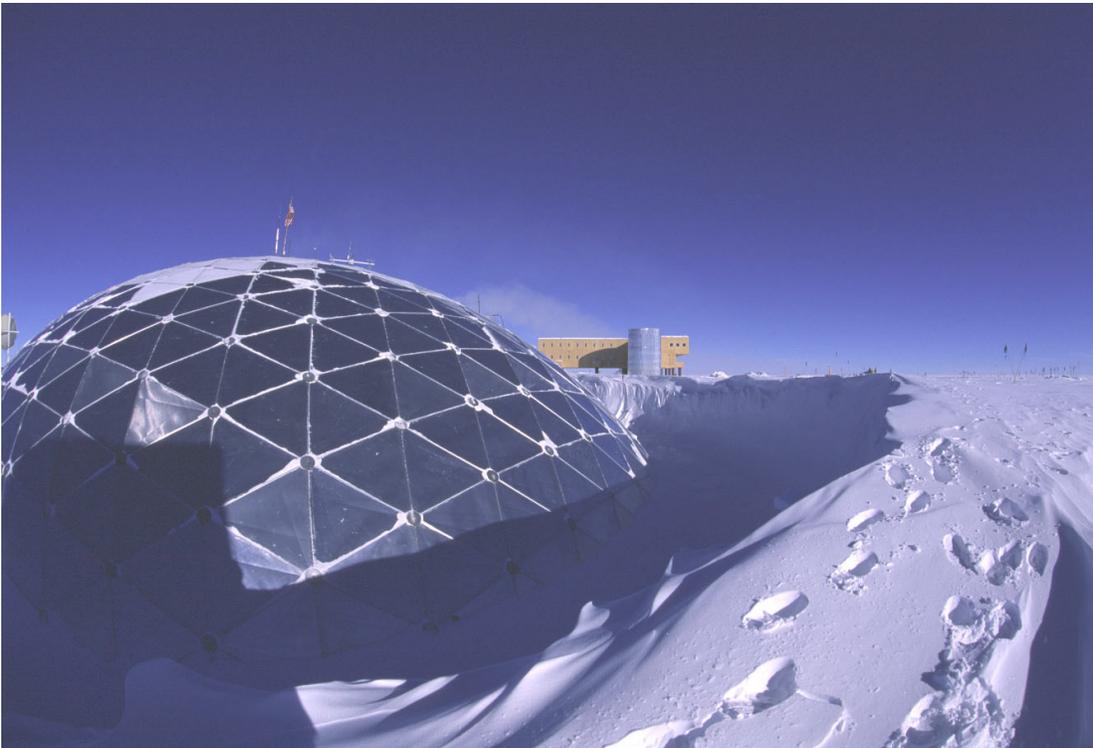
La única zona terrestre en el que se producen condiciones muy similares a las de la Luna es la Antártida. El continente helado registra las temperaturas más bajas de la Tierra, largos periodos de sol y umbría (día y noche polar) y se encuentra prácticamente deshabitado (a excepción de los residentes de las bases científicas, que operan en verano).

Uno de los lugares más aislados es la Estación del Polo Sur de Amundsen-Scott. Se trata de una estructura hinchable desplegada por la NASA con el objetivo de estudiar, entre otros elementos, el efecto de las condiciones extremas sobre las construcciones ligeras y de fácil montaje y despliegue. Las bases antárticas, que se asemejan a los puestos de avanzada lunares y marcianos, pueden servir para obtener una visión previa de cómo pueden funcionar.



[F45] Observatorio de Investigación Atmosférica (ARO) en la base científica del Polo Sur: Amundsen-Scott.

Fuente: NOAA



[F46] Cúpula geodésica del Observatorio del Polo Sur. Es la estructura más destacada y reconocida de la Base Amundsen-Scott. Fue desmantelada debido a los problemas ocasionados por la acumulación constante de nieve a su alrededor.

Fuente: NOAA

Simulaciones

Las simulaciones abarcan un extenso rango que puede ir desde la realización de pruebas muy específicas hasta experimentos de aislamiento completo a largo plazo. Badger las define como las “instalaciones y estudios construidos con el propósito explícito de reproducir las condiciones extraterrestres”

Aunque no son percibidos como tal, ya existen en la Tierra gran cantidad de lugares y situaciones en los que involuntariamente se reproducen condiciones similares a las que enfrentarían los habitantes de las colonias espaciales. Por ejemplo, la tripulación de los submarinos y los petroleros y aquellos que se aventuran a permanecer durante estancias prolongadas en refugios o cuevas, ya experimentan el aislamiento y la convivencia forzosa durante largos periodos de tiempo⁵¹. Sin embargo, estos no pueden ser estudiados más que como experiencias complementarias a las que se reproducen en otros recintos que sí simulan de manera más fehaciente las características de los entornos extraterrestres⁵².

Entre los que mejor reproducen estas condiciones, se podría nombrar las estaciones de investigación Mars Artic Research Station (MARS) y Mars Desert research Station (MDRS) situadas respectivamente en Nunavut (Canadá) y Utah (EE. UU.) y que sirven para apoyar estudios, tecnologías, estrategias y diseños propuestos para futuras misiones a Marte. El método de funcionamiento de estas simulaciones consiste en recrear las restricciones a las que se prevé que se verá sometida una misión en Marte. Estas simulaciones, poseen una ventaja relativa respecto a otras en la medida en que se sitúan en paisajes análogos a los de Marte (a nivel geológico en Utah⁵³ y a nivel climático en Nuvanut).⁵⁴



[F47] Fotografía tomada durante una simulación. Dos tripulantes realizan actividades EVA en el exterior. Al fondo se observa un prototipo de hábitat para una futura misión de colonización.

Fuente: Mars Artic Research Station

Biosphere 2 es otra simulación que destaca. Situada en Arizona, la estructura se construyó en 1986 para investigar y desarrollar una colonia espacial autosuficiente⁵⁵. La instalación es conocida porque entre 1991 y 1994 un grupo de investigadores demostraron la viabilidad de los biomas naturales cerrados para la futura colonización del espacio. Cultivaron su propio alimento, respiraron el oxígeno producido por las plantas de los diversos biomas, y se mantuvieron en completo aislamiento, ofreciendo una valiosa información sobre la dinámica de grupos en ambientes cerrados⁵⁶.



[F48] Exterior del complejo de edificios, propiedad de la Universidad de Arizona, en la que se desarrolló el proyecto Biosphere-2. Actualmente se continúa investigando sobre el desarrollo y evolución de los ecosistemas en entornos cerrados.

Fuente: The University of Arizona

Anotaciones y Referencias

- 1 «La atmósfera terrestre llega hasta la Luna...y más allá», The European Space Agency, acceso el 15 de agosto de 2020, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/La_atmosfera_terrestre_llega_hasta_la_Luna_y_mas_alla.
- 2 Antonio, Santana Santana, Carmen Ginés de la Nuez y Pablo Lucas Máyer Suárez, «El Clima», en *Geografía*, Servicio de Publicaciones y Difusión Científica (Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 2014), 76.
- 3 Javier Gómez Sánchez, «Arquitectura Espacial: Características y diseño de los hábitats en el espacio exterior» (Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2018), 13.
- 4 Jon Rask et al., «Space Faring: The Radiation Challenge», *Nasa, Module 3*, nº 8 (2008): 49.
- 5 «Lunar Habitation», Foster and Partners, acceso el 22 de junio de 2020, <https://www.fosterandpartners.com/projects/lunar-habitation/>.
- 6 Robert McCall e Isaac Asimov, *Our World in Space*, (Stephens, 1974), 80.
- 7 Ondrej Doule, «Ground Control: Space Architecture as Defined by Variable Gravity», *Architectural Design* 84, nº6 (2014): 92.

- 8** Angela Libal, «The Temperatures of Outer Space Around the Earth», *Sciencing*, 13 de abril de 2018, acceso el 15 de agosto de 2020, <https://sciencing.com/temperatures-outer-space-around-earth-20254.html>.
- 9** Javier-Chan, Porras Rhee, «Colonias Espaciales : Estudio Paramétrico de Espacios Habitables En Microgravedad» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2019), 19.
- 10** «El polo Sur lunar salpicado de cráteres», The European Space Agency, acceso el 15 de agosto de 2020, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/El_polo_Sur_lunar_salpicado_de_crateres.
- 11** Albert A. Harrison, «Humanizing outer space: architecture, habitability, and behavioral health», *Acta Astronautica* 66, n° 5-6 (2010): 892.
- 12** R. Binot et al., *The International Space Station. Microgravity: A Tool for Industrial Research* (Noordwijk: European Space Agency, 1998), 22.
- 13** Porras Rhee, «Colonias Espaciales», 22.
- 14** Elena, López Negro, «La Casa Del Espacio: Habitar Fuera de La Tierra» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2017), 68.
- 15** Dava J. Newman y Harold L. Alexander, «Human locomotion and workload for simulated lunar and martian environments», *Acta Astronautica* 29, n°8 (1993): 618.



- 16** «About space debris», The European Space Agency, acceso el 22 de junio de 2020, https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/About_space_debris.
- 17** Marc M. Cohen y Haym Benaroya, «Lunar-Based Structures», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009). 186.
- 18** «Lunar Habitation», Foster and Partners.
- 19** Para más información, véase Harrison, «Humanizing outer space».
- 20** Harrison, «Humanizing outer space», 892.
- 21** Sheryl L. Bishop, «Here to Stay: Designing for Psychological Well-Being for Long Duration Stays on Moon and Mars», en *Lunar settlements*, Haym Benaroya (CRC Press, 2010), 262.
- 22** Harrison, «Humanizing outer space», 894.
- 23** Porras Rhee, «Colonias Espaciales», 23.
- 24** Bishop, «Here to Stay», 268.
- 25** Porras Rhee, «Colonias Espaciales», 24.
- 26** Irene Lia Schlacht y Henrik Birke, «Visual Design: Color and Light for Well Being in Outer Space», en *Lunar settlements*, Haym Benaroya (CRC Press, 2010), 182.
- 27** *Ibíd.*
- 28** *Ibíd.*, 187.
- 29** Harrison, «Humanizing outer space», 892.
- 30** Schlacht y Birke, «Visual Design», 189.
- 31** Bishop, «Here to Stay», 273.
- 32** Harrison, «Humanizing outer space» 891.
- 33** *Ibíd.*, 894.
- 34** *Ibíd.*
- 35** «The Global Exploration Roadmap», International Space Exploration Coordination Group, acceso el 15 de Agosto de 2020, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ger_2018_small_mobile.pdf.
- 36** Richard Hollingham, «Should We Build a Village on the Moon?», *BBC*, 13 de julio de 2015, acceso el 15 de Agosto de 2020, <https://www.bbc.com/future/article/20150712-should-we-build-a-village-on-the-moon>.
- 37** K. Kennedy, «urbanism of space architecture», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 8.

- 38** M.M. Cohen y H. Benaroya, « Lunar-base structures», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 188.
- 39** Brent Sherwood, «Space architecture for MoonVillage», *Acta Astronautica* 139 (2017): 397.
- 40** *Ibíd.*, 405.
- 41** *Ibíd.*, 399.
- 42** McCall e Isaac Asimov, *Our World in Space*, 85.
- 43** Sherwood, «Space architecture for MoonVillage», 404.
- 44** Hollingham, «Should We Build a Village on the Moon?».
- 45** McCall e Isaac Asimov, *Our World in Space*, 84.
- 46** Arthur C. Clarke, «Saturno naciente», en *Cuentos del planeta Tierra*. (Ediciones B, 1992).
- 47** Sandro Pozzi, «La NASA abrirá la Estación Espacial Internacional a turistas en 2020», *El País*, 7 de junio de 2019, acceso el 15 de agosto de 2020, https://elpais.com/elpais/2019/06/07/ciencia/1559923576_755546.html.
- 48** Antonio Martín, «La loca carrera por el turismo espacial», *El Confidencial*, 13 de julio 2019, acceso el 15 de agosto de 2020, https://www.elconfidencial.com/empresas/2019-07-13/carrera-turismo-espacial-200-000-euros-orbita_2122091/.
- 49** Jeffrey R. Badger, «Designing for Space, on Earth: Creating More Livable Extraterrestrial Habitats Through Architectural Design» (Trabajo fin de máster, Universidad de Cincinnati, 2012), 17.
- 50** *Ibíd.*
- 51** *Ibíd.*, 20.
- 52** *Ibíd.*, 18.
- 53** «About the MDRS», Mars Desert Research Station, acceso el 23 de junio de 2020, <https://mdrs.marssociety.org/about-the-mdrs/>.
- 54** «About the FMARS», Mars Artic Research Station, acceso el 23 de junio de 2020, <http://fmars.marssociety.org/about-the-fmars/>.
- 55** «Biosphere 2», The University of Arizona., acceso el 23 de junio de 2020. <https://biosphere2.org/>.
- 56** Badger, «Designing for Space», 20.

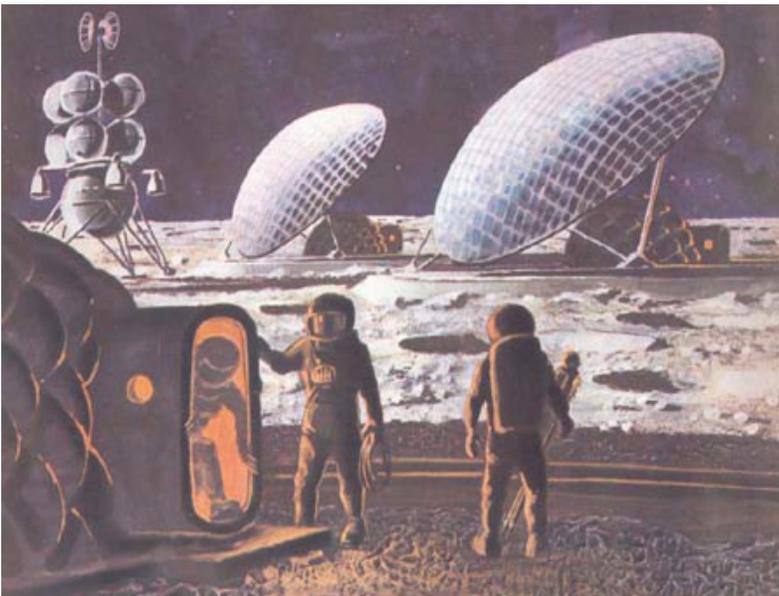
3. Estudio de propuestas de hábitats en la Luna

Una gran variedad de entidades gubernamentales, empresariales y académicas han presentado diversos y numerosos conceptos de diseño para hábitats en la Luna. Todas las propuestas han intentado resolver de la mejor manera posible los desafíos relativos a la vida en el espacio y se ha adaptado para que retos como el transporte, la movilidad o la protección de la tripulación puedan ser satisfechos de la mejor manera posible¹.

El arquitecto Marc M. Cohen y el profesor de mecánica e ingeniería aeroespacial Haym Benarroja, vislumbran la combinación de tres tipos de construcciones durante el desarrollo de una base en la Luna².

El primer paso que contemplan consiste en la construcción de entornos artificiales que fomenten el correcto desarrollo de la salud, el bienestar y la productividad de los habitantes. Los residentes deben de tener la posibilidad de permanecer durante un prolongado periodo de tiempo en un entorno en el que las condiciones de vida son radicalmente opuestas a las de la Tierra.

Este tipo de construcciones, conocidas como hábitats o módulos de Clase I, son estructuras que derivan de la tecnología desarrollada para las estaciones espaciales. Se trata de objetos fabricados y contruidos en la Tierra, totalmente equipados, y listos para ser habitados de forma inmediata tras asentarse en el lugar de destino³. A pesar de ser básicos y sencillos, su volumen, forma y tamaño se encuentra fijados por los límites de tolerancia de los transbordadores que los lanzan a órbita. Por esa razón, aunque existe la posibilidad de ensamblarlos para construir estructuras de mayor dimensión, continúan siendo pequeños, incómodos y claustrofóbicos para habitar en ellos de forma indefinida⁴.



[F49] "Lunar Village". Andrei Sokolov, 1972. Ilustración publicada en el álbum "Space Expanses". El artista imagina un asentamiento lunar compuesto por diferentes edificios que se protegen de la radiación y el calor solar mediante grandes estructuras que albergan paneles solares. Se espera que el número de especialistas y colonos aumente con el tiempo a medida que el asentamiento crezca.
Fuente: Scifiart.narod.ru

El siguiente paso se basa en realizar una mejora del ambiente lo suficientemente importante como para que los miembros de la tripulación estén dispuestos a residir de forma permanente. Los hábitats de clase II, son construcciones que tratan de solventar los inconvenientes de los primeros modelos. Son estructuras que aunque también se encuentran limitadas por las tolerancias de los transbordadores, disponen de una envolvente flexible que les permite variar la geometría y el volumen una vez asentados. Esto crea la posibilidad de manufacturarlos en la Tierra, ser lanzados a órbita y que, tras llegar al lugar de destino y desplegarse por medios humanos, mecánicos o robóticos, se obtengan espacios más amplios y flexibles que en los de sus predecesores.

Por último, se aboga por lograr un asentamiento autosuficiente en el que se utilicen los recursos disponibles in situ. Los módulos de Clase III son estructuras fabricadas con los recursos que se encuentran en la Luna. Estas construcciones no cuentan con ninguna limitación en cuanto a tamaño, volumen y masa, por lo que se pueden materializar espacios imposibles de realizar con cualquiera de las clases anteriores⁵.



[F50] Cartelería promocional para “2001: Una Odissea en el Espacio” Stanley Kubrick (1968). Ilustración de Robert McCall. La imagen parece reflejar una colonia lunar en avanzado estado de desarrollo. Nótese el puerto espacial escavado bajo la superficie y las múltiples construcciones que conforman el conglomerado urbano. La ciudad se ordena de forma radial, adaptándose a la geometría circular del cráter en la que se sitúa.

Fuente: McCall Studios

3.1 Hábitats de Clase I

Hasta la fecha, la arquitectura espacial ha sido de tipo vehicular⁶. Las construcciones del espacio se han ido adaptando y optimizando para cumplir con los requisitos y limitaciones que demandan los aviones y cohetes que los lanzan a órbita. Las reducidas dimensiones de las unidades se han paliado, en parte, acoplando y uniendo varias de ellas para formar conjuntos de mayores dimensiones, con lo que se ha conseguido aumentar el volumen habitable de las estructuras.

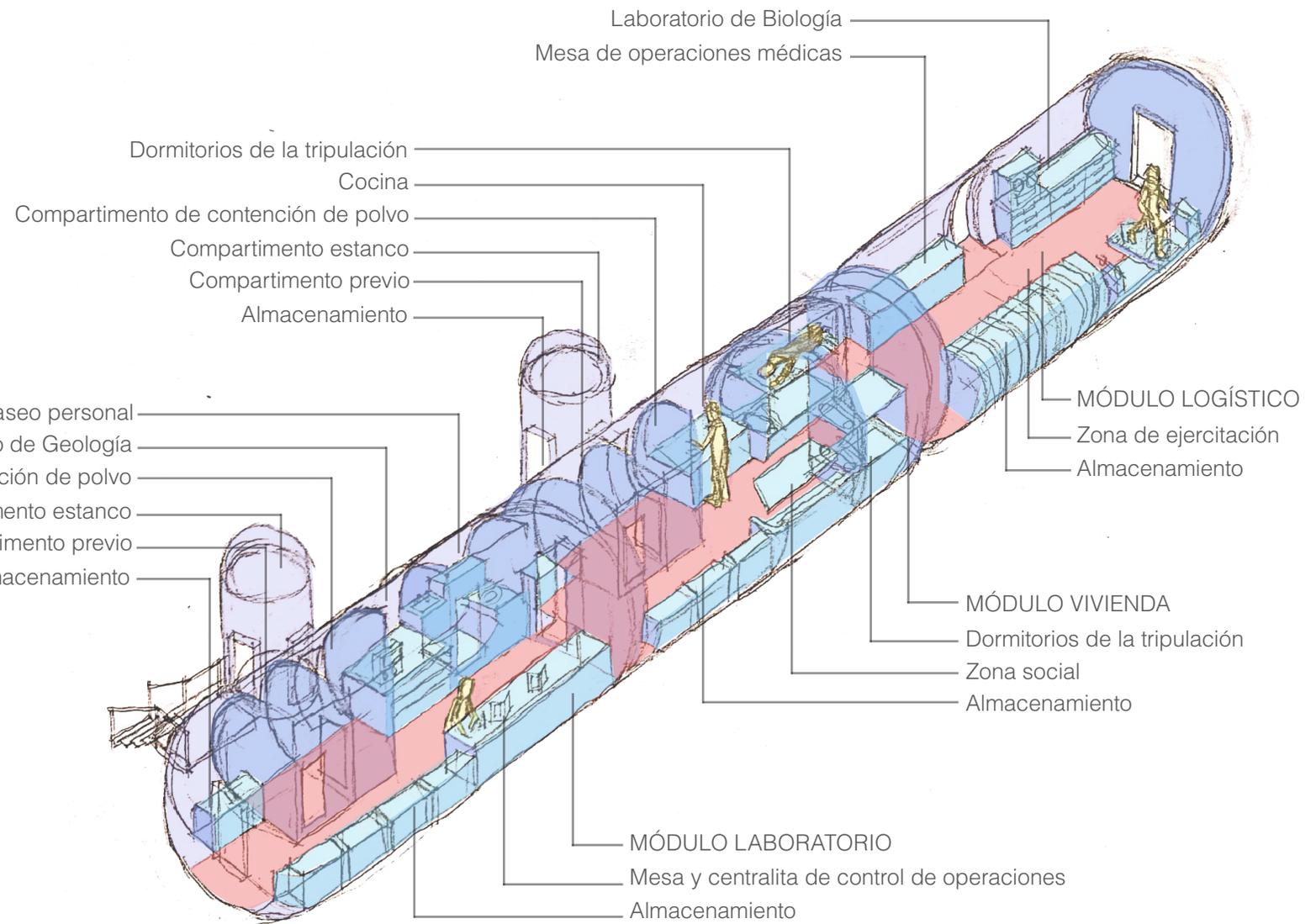
Los hábitats lunares de este tipo se componen de módulos cilíndricos de aluminio y litio. Estos se pueden disponer de dos modos diferentes⁷. Por un lado, se pueden colocar horizontalmente, con la superficie cilíndrica recostada sobre el suelo. Y, por otro lado, se pueden orientar verticalmente de forma que una de las bases circulares sirva de apoyo con la superficie.

En la primera configuración, el hábitat cuenta con un diámetro de 3,5 metros y una longitud de 8,2 metros. La base lunar más elemental de este tipo puede funcionar con sólo tres de estos módulos (uno destinado a laboratorio, uno a residencia de la tripulación, y otro para cargamento)⁸. Estas estructuras se prevén que sean habitadas por cuatro personas durante un máximo de 180 días. Como resultado, la tripulación debe convivir en un volumen de aproximadamente 240 m³ y una superficie de 64m² (la superficie de suelo útil para cada módulo se estima en 21m²)⁹.

Los módulos se disponen realizando un esfuerzo por separar las zonas de trabajo (más ruidosas y sucias) de las zonas de viviendas (más tranquilas y limpias). De este modo, el primer módulo y por el que previsiblemente se realiza el acceso desde el exterior, corresponde al laboratorio. En él se dispone la esclusa de entrada, un compartimento para depositar los trajes espaciales o EVA (para las actividades extravehiculares), un laboratorio para estudios geológicos, y los lavabos. A continuación, el siguiente módulo, corresponde a la vivienda. En este espacio se encuentran las literas de la tripulación y las zonas de cocina y socialización. Por último, el módulo más alejado es el de actividades logísticas. En él se encuentra la sala de operaciones médicas, un laboratorio de ciencia biológica, y la zona de ejercitación y deporte.

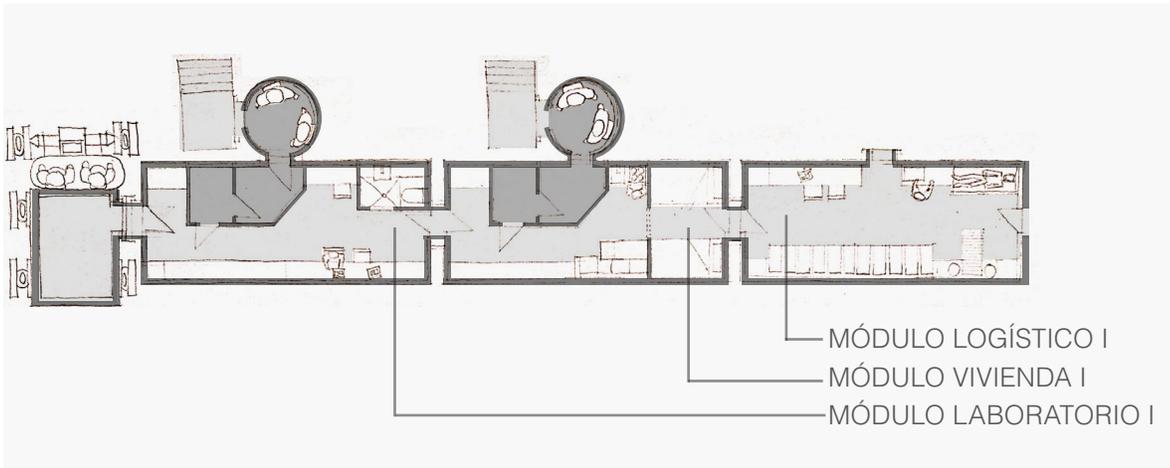
Es muy probable que la base no sea instalada de una sola pieza y siga un programa de construcción similar al de otras grandes estructuras espaciales como la ISS. Es posible que se parta de un solo módulo polivalente, que actúe como el núcleo inicial del hábitat, y a medida que se realizan las restantes entregas de material (suministros y nuevos módulos), éste se transforme y adapte¹⁰. De esta forma, pueden existir varias tipos de distribución interior para un mismo tipo de módulo.

Zona de baño y a
Laboratorio
Compartimento de conten
Compartim
Compart
Alm

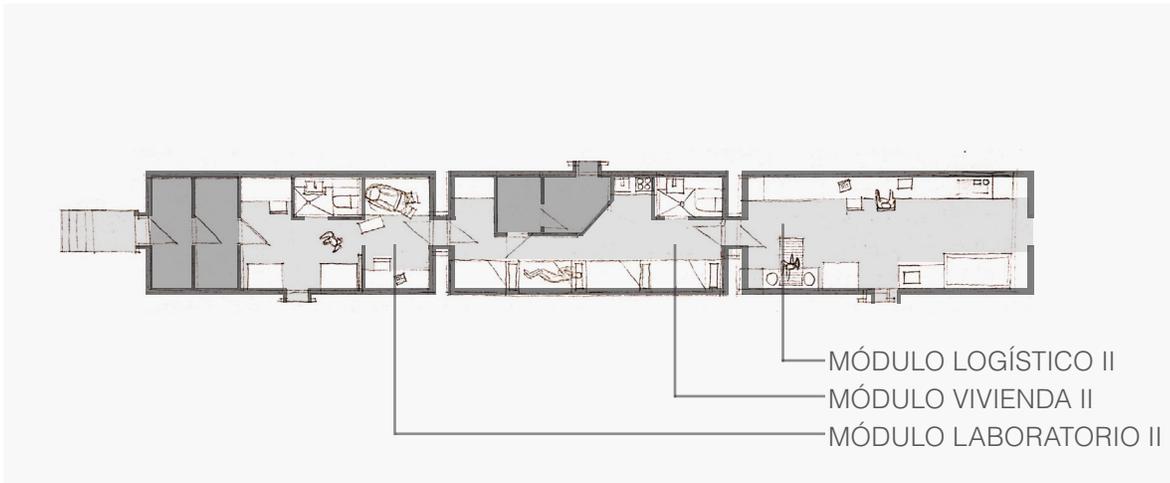


[F51] Axonometría de un hábitat de Clase I. Propuesta del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA).

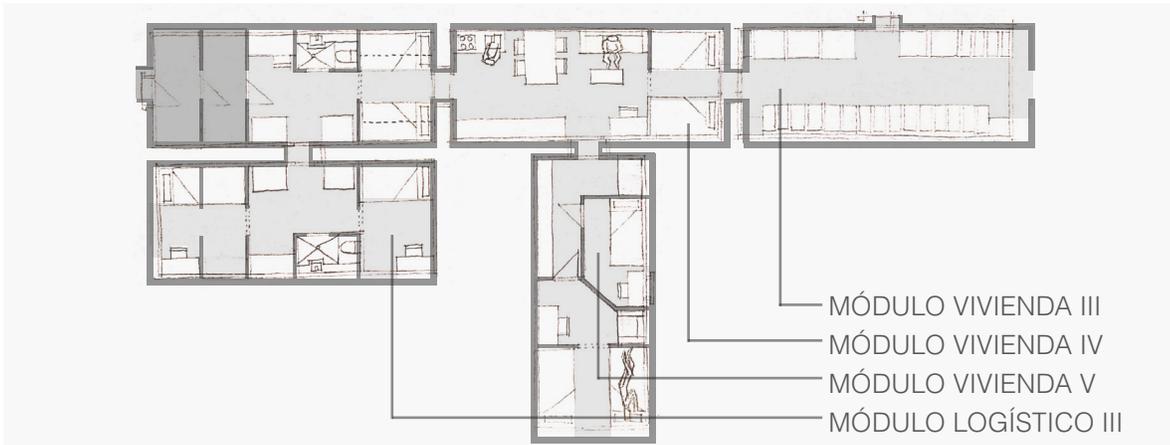
Fuente: Elaboración propia



[F52] Planta de un hábitat de Clase I. Propuesta del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA).
Fuente: Elaboración propia



[F53] Planta con una distribución interna alternativa. Propuesta del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA).
Fuente: Elaboración propia



[F54] Planta con otra distribución interna alternativa. La mayor idoneidad y conveniencia de cada una de las propuestas se debe estudiar previamente. Sin embargo, serán los colonos los que verdaderamente acabarán configurando el espacio que mejor se adapte a sus necesidades.
Fuente: Elaboración propia

En la segunda configuración, el hábitat cuenta con un diámetro de 5,5 metros y una altura de 7,0 metros. Estas medidas están ajustadas a las tolerancias dimensionales máximas del compartimento de carga del cohete Ares V, un nuevo vehículo de lanzamiento que la NASA estaba desarrollando como parte del proyecto Constellation¹¹. La base lunar está formada por un único módulo (destinado a la residencia de la tripulación) que se divide en tres plantas con una altura libre de 2,1 metros. El volumen interior, de aproximadamente 599m³ y una superficie de 285m² (unos 95m² por planta), debe ser compartido entre las cuatro personas que también se prevé que habiten en él.

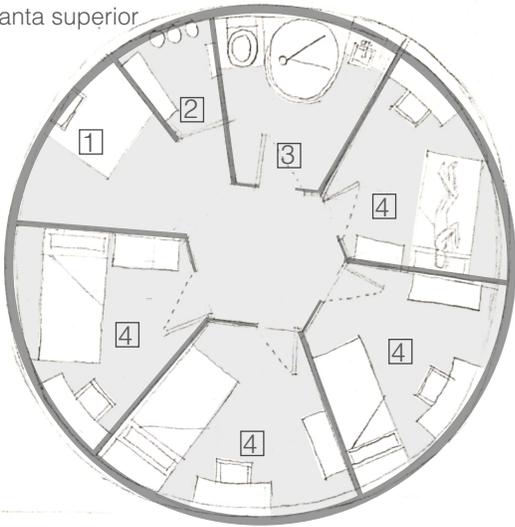
El interior del hábitat se ordena funcionalmente en altura para separar las zonas de trabajo de las zonas de vivienda y descanso. El acceso se realiza a través de la planta inferior. En ella se localiza la esclusa de entrada, un compartimento para depositar los trajes espaciales o EVA, el área de aseo personal, un laboratorio general, el área médica y de primeros auxilios, y un armario de servicio y mantenimiento. La planta intermedia corresponde a la zona de socialización y convivencia. El área reúne la cocina, el comedor y un espacio con butacas. Cuenta, además, con un lavabo, una mesa de trabajo grupal, y las máquinas para el entrenamiento físico. En último lugar, en la planta superior, se localizan los dormitorios de la tripulación, otra área de aseo personal, y un armario de servicio.

El hábitat en altura resuelve conveniente dentro de un mismo espacio las necesidades iniciales de una base humana en el Luna. Sin embargo, no facilita una futura expansión. Se vuelve necesario la instalación de módulos y estructuras auxiliares con geometrías distintas a la original, para albergar nuevas funciones (como el invernadero, los talleres de mantenimiento o los envíos de suministros) y que se deben conectar con el módulo de vivienda. No obstante, se ha propuesto una alternativa como solución a este inconveniente

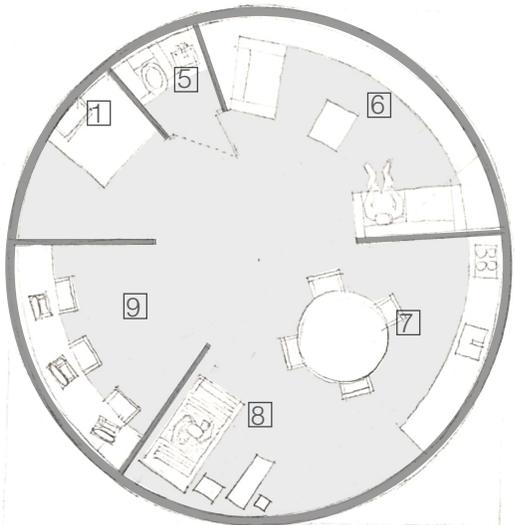
La segunda versión para un hábitat cilíndrico vertical consiste en un mínimo de tres módulos de también 5,5 metros de diámetro (uno destinado a laboratorio, uno a vivienda, y otro para logística y suministros). La configuración interior para cada módulo es similar al del concepto de cilindro horizontal, aunque presenta diferencias. No obstante, con el crecimiento de la colonia, cada módulo se puede reconfigurar y adaptar para albergar funciones más específicas y relacionadas. El acceso se realiza por cualquier módulo, pero es previsible que se produzca a través del laboratorio. Esta área contiene la esclusa de entrada, un compartimento para depositar los trajes espaciales o EVA, una zona de trabajo y mantenimiento, un laboratorio para estudios geológicos y una mesa de operaciones y primeros auxilios. A continuación, se encuentra el módulo de vivienda, que actúa como centro del hábitat. En él se instala la zona de preparación de alimentos, una mesa para la socialización, el área de entrenamiento y el laboratorio biológico. El último módulo corresponde

[F55]

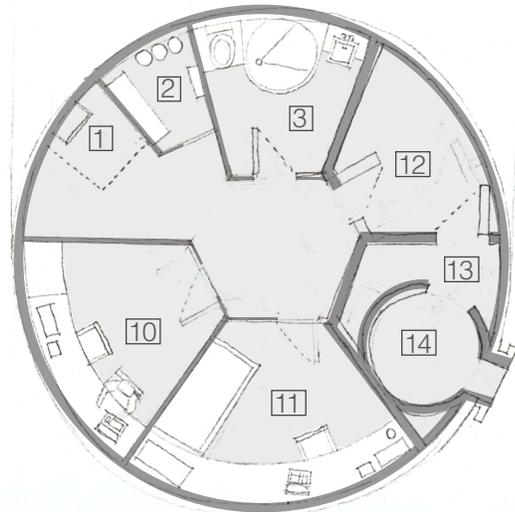
Planta superior



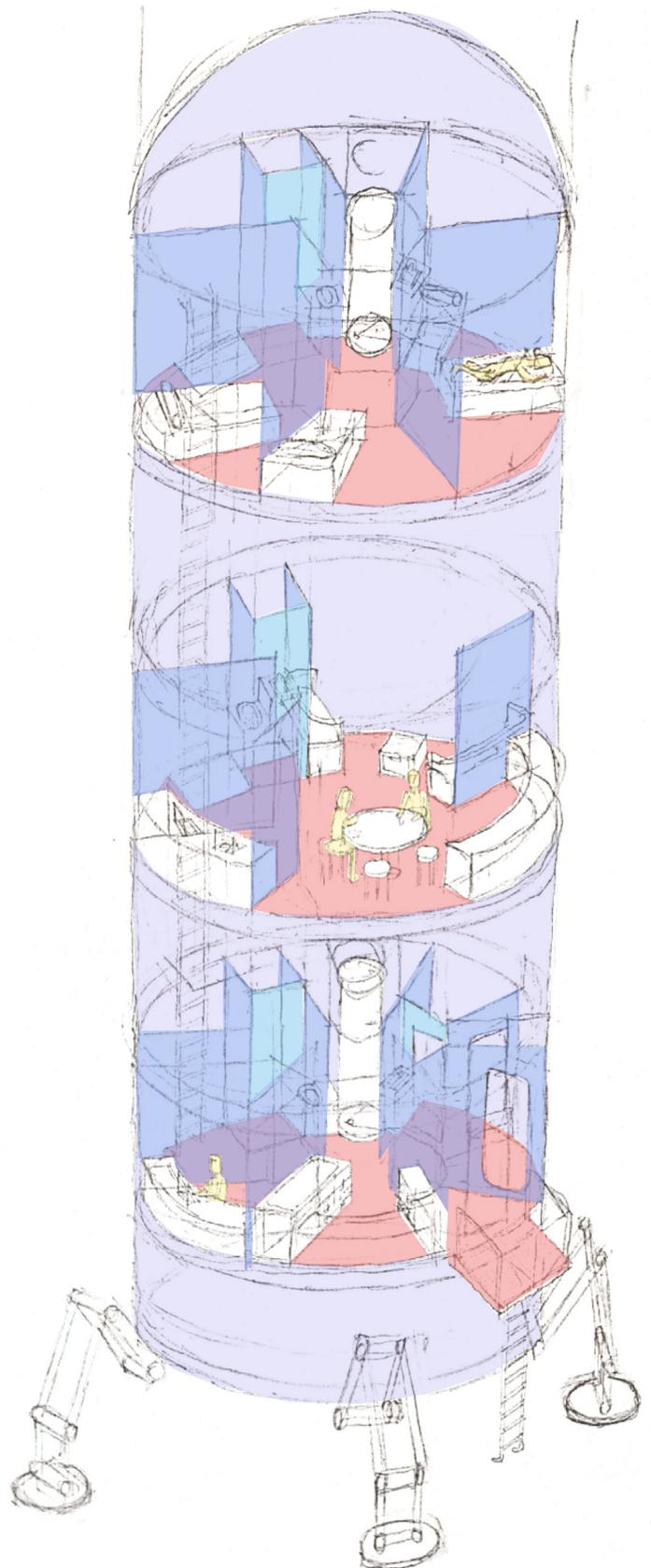
Planta intermedia



Planta inferior



[F56]



[F57]

[F55] Planos de planta de un hábitat de Clase I. Propuesta del arquitecto Giorgio Gaviraghi para la NASA.

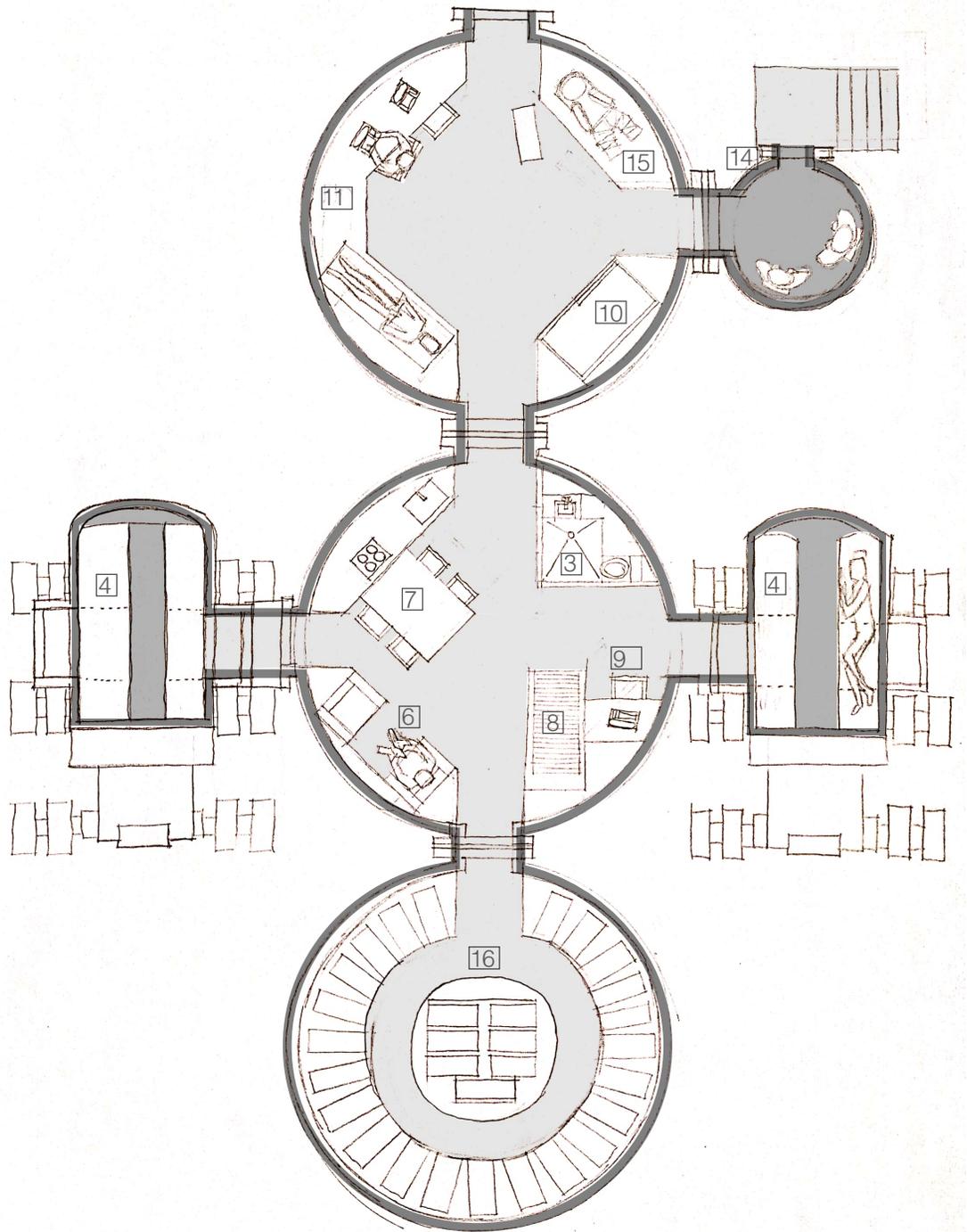
Fuente: Elaboración propia

[F56] Axonometría de un Hábitat de Clase I. Propuesta de Giorgio Gaviraghi para la NASA.

Fuente: Elaboración propia

[F57] Diseño alternativo para un hábitat de Clase I. Plano de planta. Propuesta del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA).

Fuente: Elaboración propia



Leyenda

- | | | |
|----------------------------------|---|-----------------------------|
| 1 Comunicación vertical | 7 Cocina y comedor | 13 Compartimento anti-polvo |
| 2 Instalaciones y mantenimiento | 8 Zona de ejercitación física | 14 Compartimento estanco |
| 3 Limpieza y aseo personal | 9 Centralita de control de las misiones | 15 Mesa de reparaciones |
| 4 Dormitorio individual | 10 Laboratorio | 16 Suministros |
| 5 Aseo | 11 Puesto médico | |
| 6 Zona de ocio y entretenimiento | 12 Compartimento previo | |

al de actividades logísticas. Este alberga suministros y materiales para garantizar la supervivencia y la expansión de la colonia. Cabe destacar que, en esta propuesta, la tripulación no cuenta inicialmente con un espacio privado para el descanso. De forma transitoria, son los vehículos de exploración espacial o LER (Lunar Electric Rover) los que adoptan esta función.

Aunque la arquitectura lunar debe acomodarse para la mayor escala de movimiento que se requiere en los entornos de gravedad reducida, en el estado inicial de la colonia, las restricciones volumétricas y dimensionales se encuentran fuertemente establecidas por los límites de tolerancia de los transbordadores y por la necesidad de optimización de los recursos. Además, la imposibilidad de disfrutar del ambiente exterior desvanece el diálogo entre el interior y el exterior de los que la arquitectura siempre ha disfrutado¹². A todo esto, es necesario sumar la posibilidad de que, inicialmente, una parte de la colonia (si no toda) se asiente sobre una base móvil que permita el traslado de las estructuras. Esto se enmarca en una probable necesidad de trasladar equipos e instrumentos si se realizan actividades de exploración o investigación alejadas del punto de aterrizaje original.

Existen varios ejemplos de construcciones terrestres en las que los arquitectos y diseñadores pueden verse reflejados a la hora de adaptar las necesidades y exigencias de la vida humana en estos espacios iniciales, en los que las dimensiones reducidas, el hermetismo y la privacidad son los primeros retos por abordar.

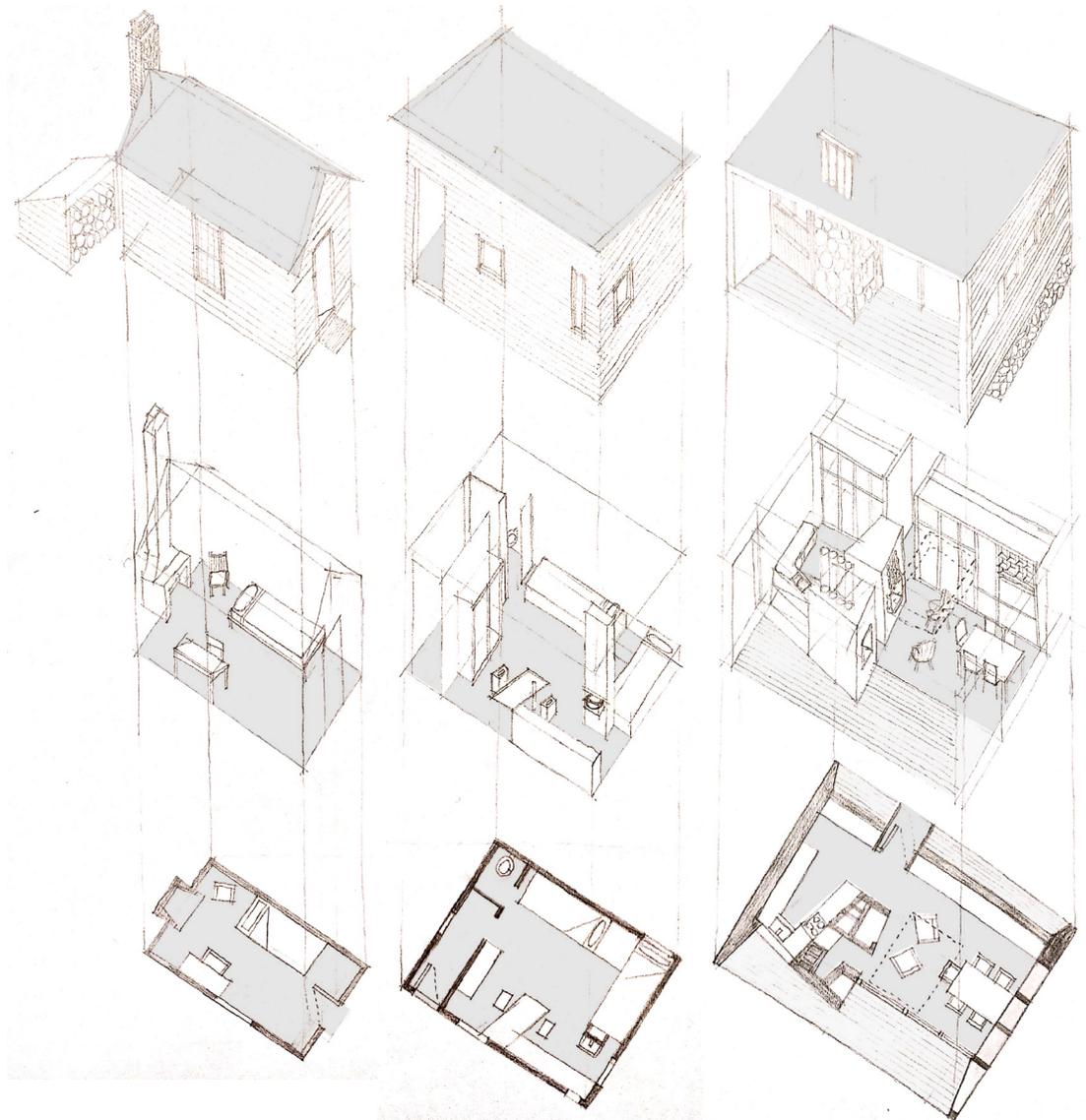
La Cabaña

La cabaña es la edificación más sencilla de la arquitectura. Es el refugio en el que protegerse y poder desarrollar las actividades de la vida. Aunque se trata de un espacio de reducidas dimensiones, logra construir un lugar¹³.

Monteys considera que es una construcción con una fuerte componente individual capaz de proyectar el carácter y la personalidad de la persona que habita en ella¹⁴. Algunas de las cabañas más célebres de la historia de la arquitectura a penas difieren dimensionalmente. Como se puede observar en la figura 58, la Cabaña de Thoreau (de 3,5 x 3'5 metros) y "Le Cabanon" de Le Corbusier (de 3,66 x 3,66 metros) presentan casi idénticas superficies. Solamente "The Box" de Erskine (6 x 3,36 metros) se aleja. No obstante, todas ellas se encuentran dentro del área máxima disponible en el interior de un hábitat de Clase I.

Un diseño de los hábitats espaciales basado en la filosofía de la cabaña puede ser capaz de crear un ambiente apto para habitar cómodamente en un espacio mínimo. La manera de organizar el espacio de Le Corbusier es muy interesante. El arquitecto, ordena la cabaña a través del mobiliario, que separa y define las zonas de aseo, trabajo y descanso. Resulta curioso, además, cómo una misma pieza puede adoptar distintas funciones. Los taburetes, por ejemplo, sirven de mesitas auxiliares o de espacios de almacenaje¹⁵.

The Box, muestra una organización en torno al fuego. La chimenea distribuye los espacios. La zona común, la cocina y el porche rodean y reciben el calor del elemento primigenio. El arquitecto diseña un mobiliario flexible, del que se destaca el sistema de poleas para ascender y descender la cama, y convertir la zona común en un dormitorio¹⁶.

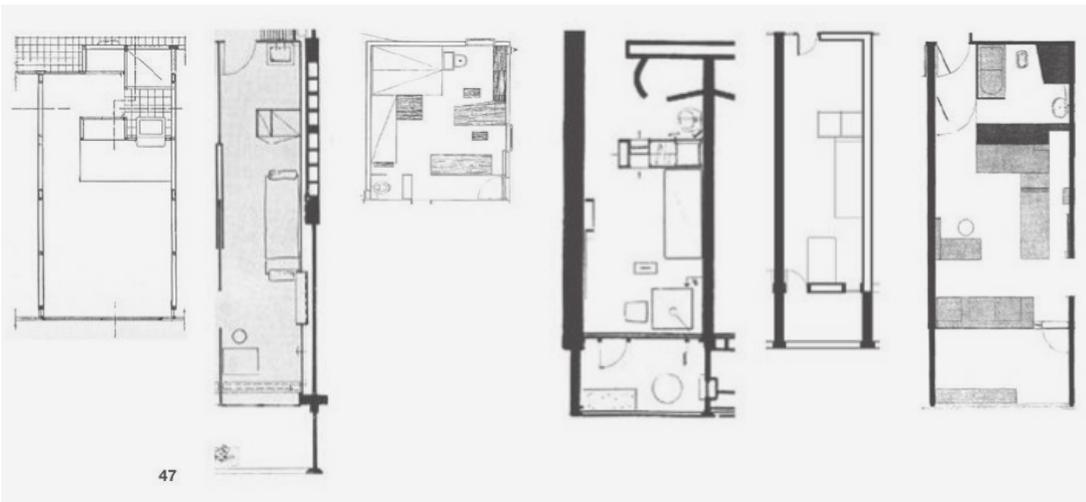


[F58] Axonometrías de tres cabañas distintas. De izquierda a derecha: La Cabaña de Thoreau (1845), Le Cabanon de le Corbusier(1952) y The Box de Ralf Erskine (1942).

Fuente: Elaboración propia

Las habitaciones

Se podría considerar que las habitaciones son pequeñas cabañas dentro de una vivienda; incluso decir que son pequeñas casas¹⁷. Algunas de las obras de Le Corbusier ilustran este concepto. En la década de 1950, el arquitecto ultima un diseño de dormitorio que se caracteriza por ser profundo y estrecho. Espacialmente organizado desde la penumbra hasta la claridad, primeramente dispone de un aseo (o lavamanos) y un vestidor, continúa con un armario, una cama, una mesa de trabajo y un estante, y llega hasta una galería o balconada exterior. Dimensionalmente varían entre los 1:3 en los casos más anchos y los 1:4 y 1:4,5 en los más estrechos. Le Corbusier utilizó estos diseños para crear espacios íntimos y de relajación dentro de los edificios (especialmente para los estudiantes del Pabellon Suizo y los monjes de la Tourette).



[F59] Planos de las distintas habitaciones presentes en las obras de Le Corbusier. De izquierda a derecha: Dormitorio del Pabellón Suizo (1930), La Unité d'Habitation de Marsella (1945), Le Cabanon (1951), Estudio de la Maison Du Brasil (1953), Celda del Convento de la Tourette (1953), y Habitación del Hotel d'Orsay (1961).

Fuente: Xavier Monteys, 2014. La habitación : más allá de la sala de estar.

Para Monteys, los dormitorios representan la conquista de un espacio propio dentro de la vivienda, donde la cama es el mueble esencial de la privacidad. Las ventanas también son elementos que definen los dormitorios. Según el autor, la presencia de una ventana simboliza que se vive en el interior y, a la vez, permitir contemplar la vida del exterior. Este concepto se ilustra excelentemente en las pinturas del artista estadounidense Edward Hopper. No obstante, aunque estos dos objetos sean los más característicos, probablemente sean las personas las que mejor definan las habitaciones. Interpretando el dibujo *The Room* de Louis Khan, ellas son las que eligen qué y cómo quieren habitar su hogar.

Por tanto, se podría decir que los arquitectos espaciales deberían de dar libertad para que la tripulación ocupe el espacio según sus necesidades y gustos.



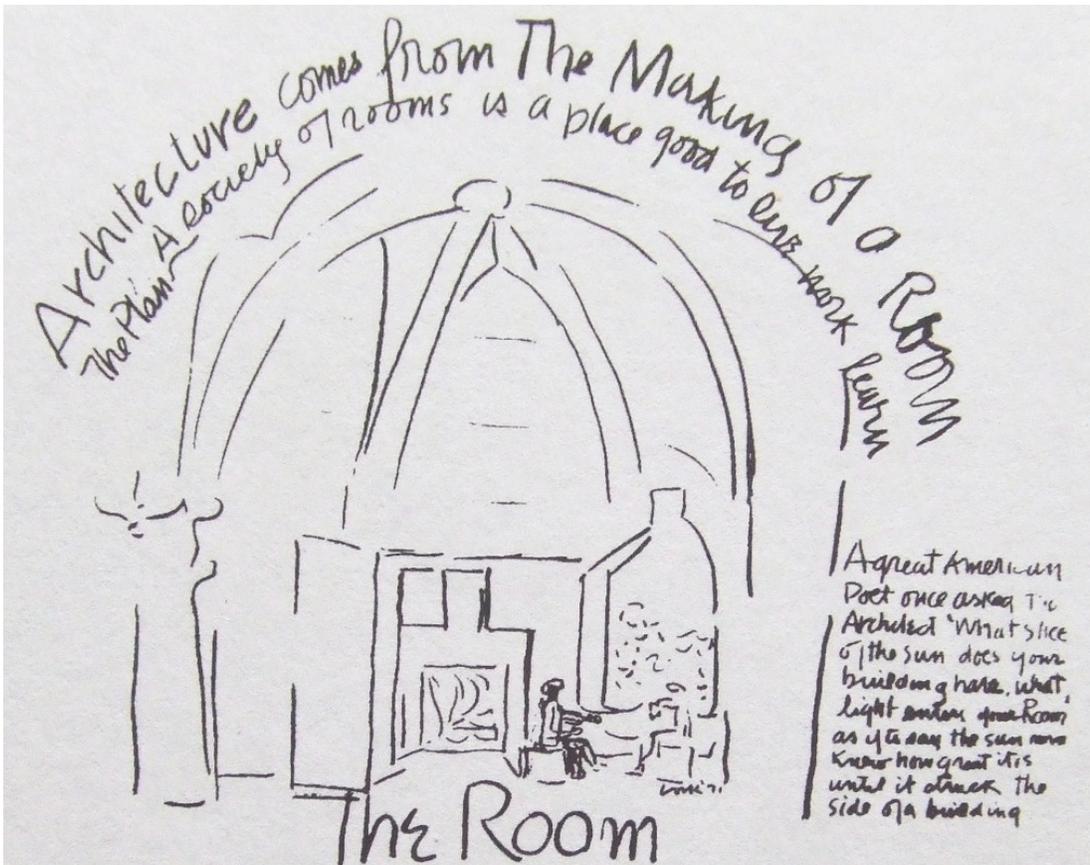
[F60] "The Stitch Room", Ronan y Erwan Bouroullec, 2007. Habitación experimental para la exposición "My Home" del Vitra Design Museum en Weil am Rhein (Alemania).

Fuente: Ronan y Erwan Bouroullec.



[F61] Fragmento de "Cape Cod Morning", Edward Hopper, 1950. La pintura refleja la capacidad de las ventanas para observar lo que ocurre en el exterior. A su vez, también permite conocer que la vida también se desarrolla en el interior del hogar.

Fuente: Smithsonian American Art Museum



[F62] Fragmento de "Architecture comes from the making of a room", Louis I. Kahn, 1971. Fuente: Wiley Online Library

Los estuches habitables

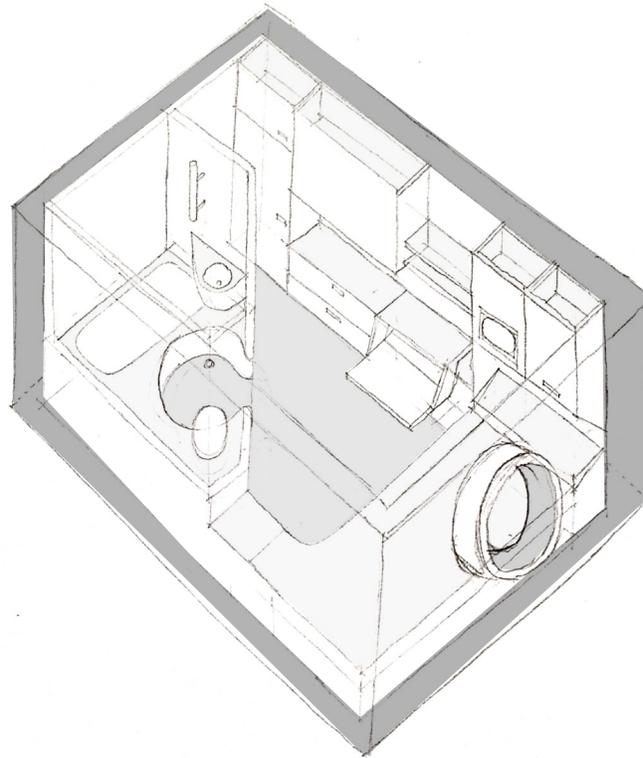
Algunas viviendas mínimas han sido denominadas por los arquitectos como cápsulas¹⁸. Este tipo de hogares se conciben como estuches en los que las paredes interiores adoptan la forma del mobiliario¹⁹. Tal vez, una de las cápsulas más reconocidas sea la cápsula de Kisho Kurokawa y en particular las que se encuentran en la Torre Nakagin (Tokio, 1972). Esta obra se enmarca en el Metabolismo japonés, una corriente que defiende incorporar los ciclos de cambio, destrucción y regeneración característicos de la naturaleza a los edificios y ciudades²⁰. Los arquitectos, de esta manera, abogaban por facilitar a los seres humanos el control de su hábitat, y poder adaptarlo a sus deseos y circunstancias personales.

Las cápsulas de la Torre Nakagin integran en un espacio mínimo (9m²) las necesidades humanas que el arquitecto pensó que se requerían en el futuro. Kurokawa imagina una vida en la que el hombre está rodeado y asistido por las máquinas. Por eso el espacio de las cápsulas se encuentra ajustado al máximo, ya que el arquitecto piensa hasta en los más mínimos detalles. No obstante, supone que habitar es una operación mecánica más, y da poco o ningún margen para que la vivienda pueda ser customizada por los residentes. Además, limita la posibilidad de disfrutar de cualquier tipo de ocio social en su interior.

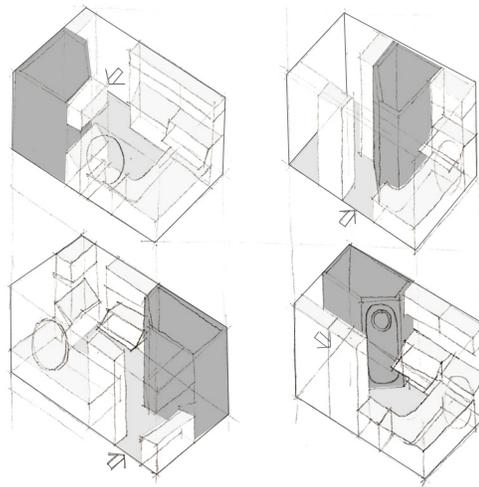
[F63]

[F63] [F64] Axonometrías de la cápsula de la Torre Nakagin. La imagen superior muestra la distribución estándar, sin embargo, ésta puede variar. Algunas de las posibles combinaciones pueden verse en la imagen inferior.

Fuente: Elaboración propia



[F64]

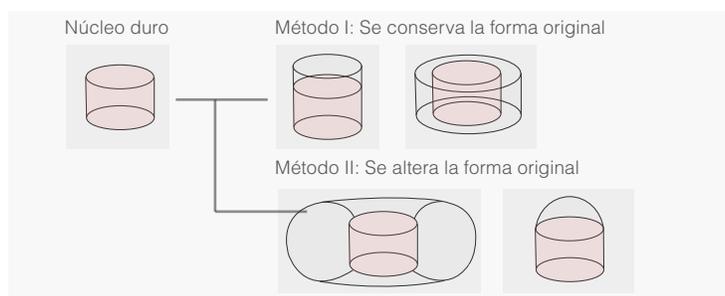


Las caravanas son otro tipo de estuches habitables. Comúnmente olvidadas, son la versión moderna de las tiendas de los nómadas, los espacios por excelencia de la arquitectura mínima²¹. Algunos de los primeros modelos, con un espacio habitable de también 9m², ya eran capaces de incorporar todas las comodidades de una habitación de hotel. Aunque la arquitectura del espacio interior se encuentra delimitada por las leyes de la aerodinámica y las normas de circulación, los espacios de cocina y baño presentan un diseño consensuado, mientras que el resto de la caravana queda a merced de cada fabricante, que puede disponer los muebles de distintas maneras y otorgar diferentes opciones de diseño.

3.2 Hábitats de Clase II

El despegue y aterrizaje son las situaciones en la que la estructura se encuentra sometida a las mayores presiones²². Los cuerpos rígidos son los que superan este inconveniente con mayor satisfacción. Por ello, la siguiente generación de módulos debe contar con un núcleo duro que se adapte a las tolerancias dimensionales de los vehículos de lanzamiento pero que a su vez permita incorporar los sistemas que hagan posible ensanchar la estructura primitiva.

Dos son los posibles métodos para agrandar los hábitats una vez se encuentren en el lugar de destino. Por una parte, cabe aumentar el volumen total de la construcción conservando su forma original. Por otra, se puede desplegar una parte de su superficie dando paso a un volumen diferente (normalmente un toroide o un cilindro con un casquete semiesférico). Se ha comprobado que estas últimas formas son las más adecuadas para la adopción del próximo modelo de hábitat²³.



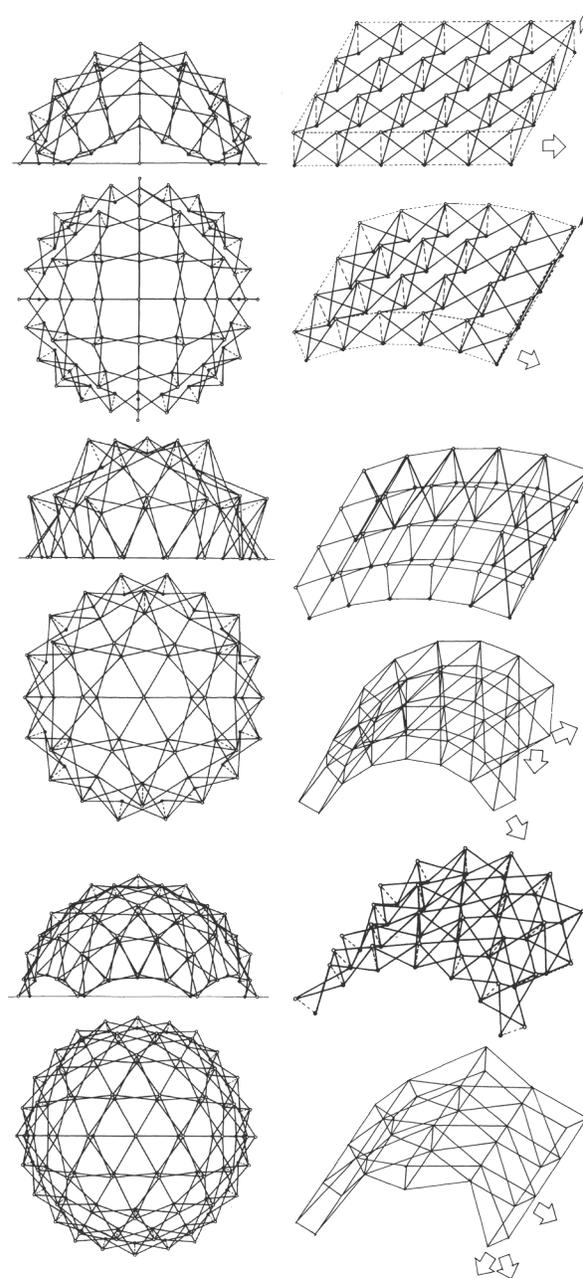
[F65] Axonometrías con algunas de las diferentes volumetrías que puede adoptar un hábitat de Clase II tras su despliegue.

Fuente: Elaboración propia

Existen tres propuestas para llevar a cabo el despliegue de la estructura²⁴. En primer lugar, se encuentran los módulos inflables. Su desarrollo está muy avanzado, ya que son los más investigados y cuentan con varios prototipos testados en la Tierra y el espacio (Módulo Transhab y Cápsula Bigelow) y otros en proceso de ideación (Cámara mínima de ILD Rover y los Módulos de la Goodyear Aerospace Corporation). Esta solución se encuentra entre la más convenientes, ya que el sistema de extensión consiste en el inflado del material flexible a partir del aire contenido en el sistema de ventilación que incorpora el habitáculo.

Los siguientes son los módulos desplegados con sistemas mecánicos. Aunque menos desarrollados que los anteriores, se basan en las estructuras desplegables concebidas en la década de los 60 del siglo XX. Consisten en mecanismos sencillos de barras unidas por articulaciones, comúnmente aspas en X, que pueden variar su geometría, plegar y desplegarse. Estas soluciones permiten crear complejas estructuras que aportan gran riqueza visual.

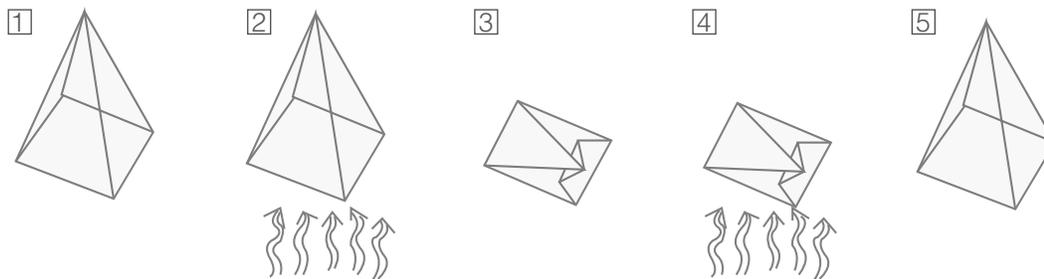
Existe un inconveniente en cuanto al plegado de dichos mecanismos en los módulos toroidales. Por ello, se proponen los volúmenes con casquetes semiesféricos como los más adecuados. Otra desventaja orbita en torno a la fiabilidad de la activación remota del mecanismo. Se anima a que el sistema de ventilación actúe como solución a dicho problema, introduciendo aire de modo que la presión ejercida desestabilice la estructura plegada.



[F66] Estructuras desplegadas. La columna de la izquierda corresponde a ejemplos de mallas esféricas. Las columnas de la derecha, a mallas cónicas.

Fuente: Estructuras espaciales desplegadas curvas. Félix Escrig y J.P. Valcárcel.

En último lugar, se encuentran los módulos autodesplegables. Estos son los de más reciente ideación y se encuentran en fases muy tempranas de desarrollo. Se caracterizan por el uso de materiales tecnológicos, especialmente el CHEM (Cold Hibernated Elastic Material), que se trata de un polímero sintético con memoria. El producto puede calentarse y plegarse para ocupar un pequeño espacio en la bodega de la nave. Una vez en su destino, el material se calienta de nuevo y recupera su forma original, que corresponde a la del volumen del habitáculo que se pretende establecer. Acto seguido, se cubre con un protector para evitar que el material reciba más temperatura y continúe su expansión. Esta clase de módulos tienen la propiedad de poder emplear la energía solar para calentar el material, lo cual constituye una gran ventaja ya que, al no necesitar de ninguna maquinaria, las probabilidades de que ocurran fallos se reducen de forma drástica.



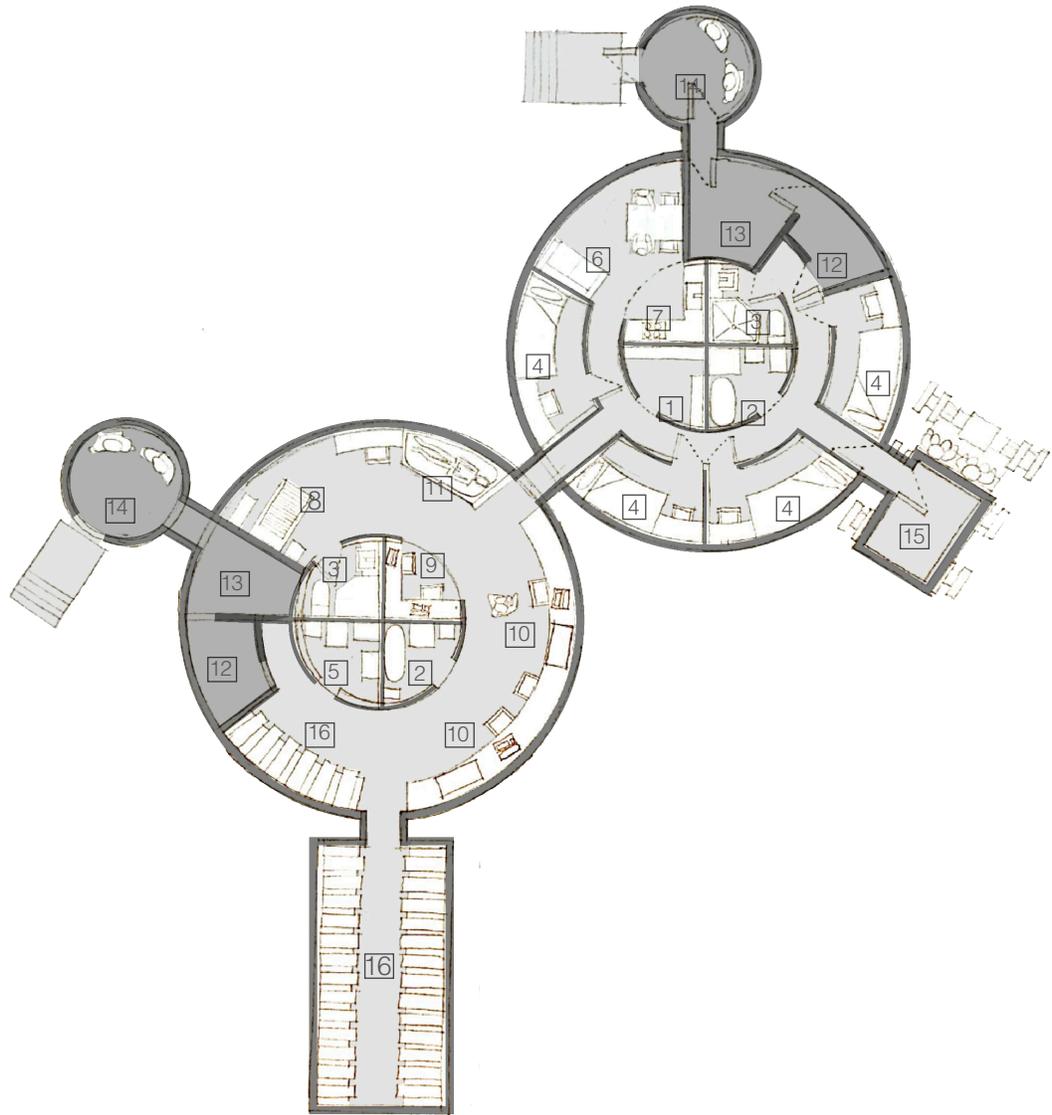
[F67] Dibujo explicativo del funcionamiento de los materiales CHEM (Cold Hibernated Elastic Material).
Fuente: Elaboración propia

Los modelos más avanzados para hábitats de Clase II los está desarrollando el equipo NASA Constellation Lunar Architecture Team, o CxAT-Lunar²⁵. El toroide inflable que proponen, proporciona mayor volumen habitable que el módulo cilíndrico de primera generación. En particular 348m³ frente a 240m³. La colonia que se plantea está formada por dos toroides de 8,5 metros de diámetro y 3,6 metros de altura y un módulo PLM o Multipurpose Logistic Module para cargamento u otros posibles usos. Cada módulo cuenta con una superficie pisable de 56,74m², tres puertos de acoplamiento y un cuerpo rígido central, en el que previsiblemente se instalan los servicios y la maquinaria necesaria para el funcionamiento de la colonia.

Las posibilidades compositivas y espaciales que pueden surgir de la unión de varios módulos son muy extensas. No obstante, es recomendable que se dispongan de forma que las zonas de trabajo se encuentren separadas de las zonas de vivienda. Por ello, el acceso se debe realizar a través del laboratorio, donde se localiza la esclusa de entrada, un compartimento para depositar los trajes espaciales o EVA (para las actividades extravehiculares), el laboratorio de geociencia y biotecnología y la sala de operaciones médicas y de ejercicio. Seguidamente se enlaza con el módulo de la vivienda. En este espacio se disponen los habitáculos de la tripulación, el aseo y las zonas de cocina y socialización.

Leyenda

- 1 Despensa
- 2 Instalaciones
- 3 Baño
- 4 Cabinas de dormitorio
- 5 Almacén
- 6 Salón-comedor
- 7 Cocina
- 8 Zona de ejercitación
- 9 Centralita de control
- 10 Laboratorio
- 11 Puesto médico
- 12 Compartimento previo
- 13 Cabina anti-polvo
- 14 Compartimento estanco
- 15 Vehículo LER
- 16 Suministros



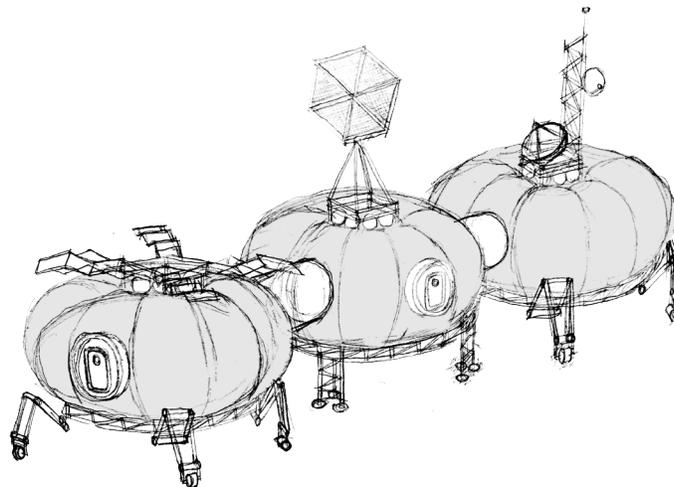
[F68]

[F68] Planta para un hábitat toroidal de Clase II. Propuesta del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA).

Fuente: Elaboración propia

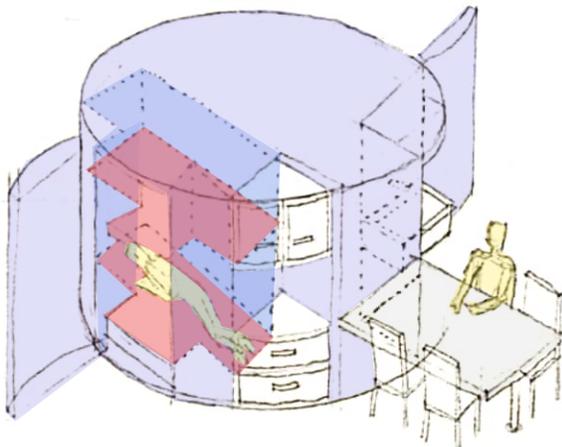
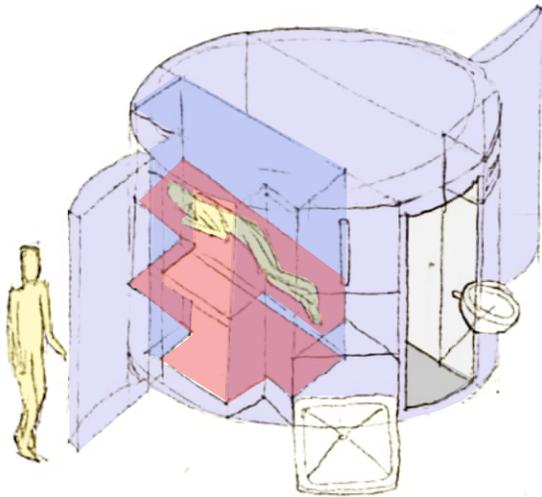
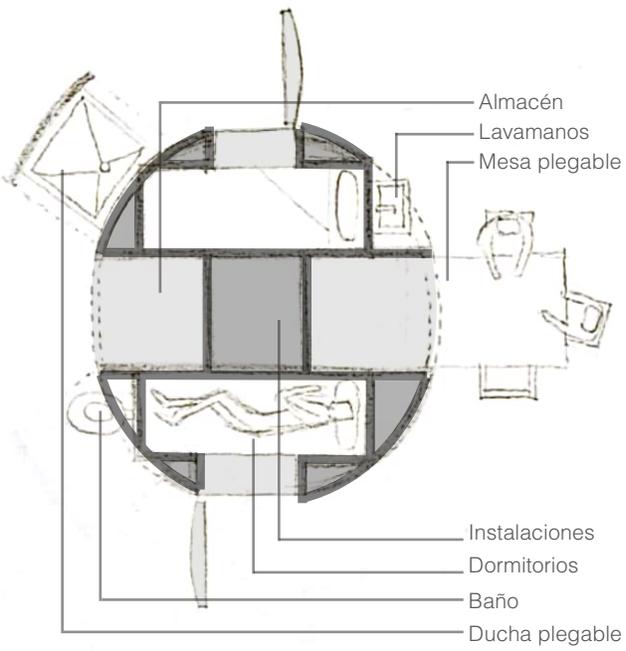
[F69] Axonometría de un hábitat toroidal. El tercer módulo, para actividades logísticas, puede transformarse más adelante para ampliar las instalaciones. Los aparatos y elementos de comunicación y de suministro de energía se localizan en la parte superior y pueden adoptar distintas formas.

Fuente: Elaboración propia

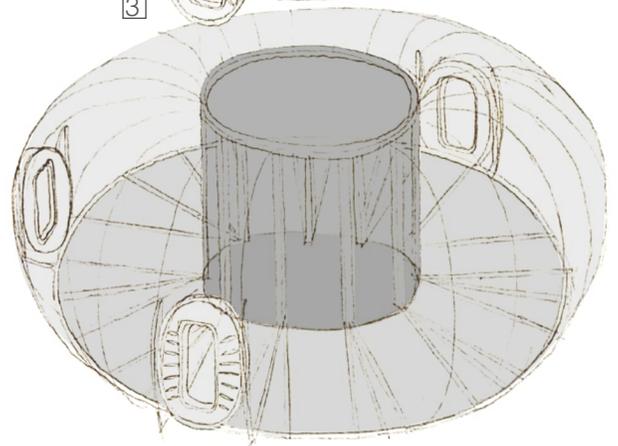


[F69]

[F70]



[F71]



[F70] Propuesta del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (AIAA) para aprovechar el núcleo rígido de un hábitat de Clase II. Los compartimentos dormitorio están rodeados en su totalidad por un depósito de agua para aumentar la protección contra la radiación, especialmente adecuado para estos espacios de los que se espera que la tripulación pase largas horas descansando y disfrutando de su intimidad. El agua también se aprovecha como depósito de reserva para las labores de higiene.

Fuente: Elaboración propia

[F71] Esquema de despliegue de una estructura inflable toroidal.

Fuente: Elaboración propia

[F72] Esquema de construcción de la Casa Dymaxion. El proceso, si se adapta y mecaniza, puede ser muy útil para desplegar hábitats.

Fuente: Elaboración propia

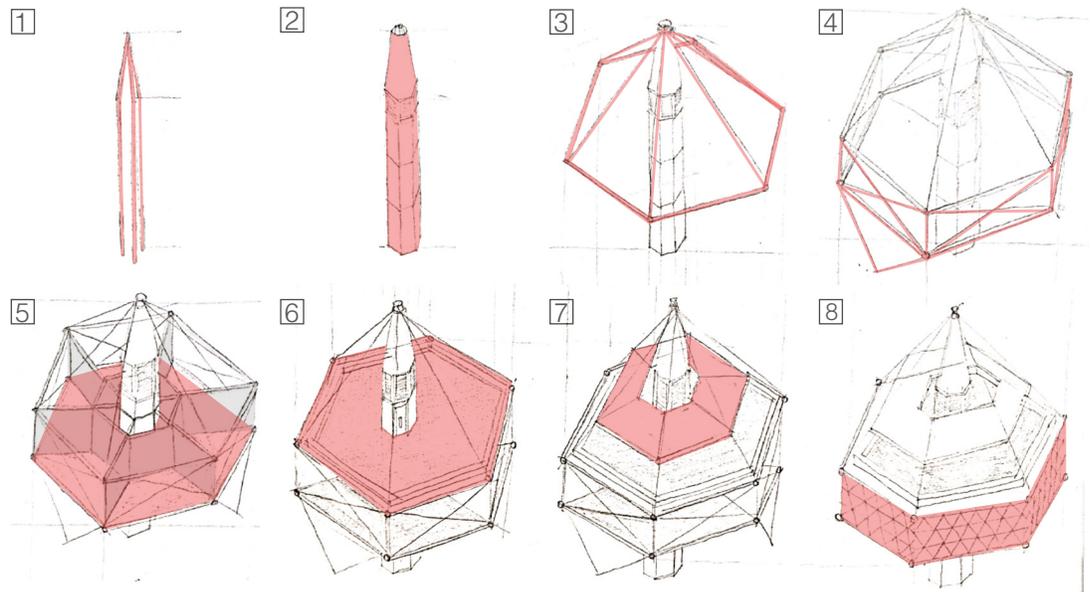
La Casa Dymaxion

La propuesta para un hábitat toroidal desarrollada por la NASA guarda grandes similitudes con el trabajo realizado por el arquitecto R. Buckminster Fuller (1895-1983) en el campo de la vivienda.

Inspirada en el diseño de los buques y las torres de control, la Casa Dymaxion (1929) es un arquetipo de edificio independiente, autónomo, barato, ligero, portátil y energéticamente eficiente, diseñado para ser habitado por cinco personas. El edificio se caracteriza por un sistema estructural de tensegridad compuesto por un mástil fuertemente anclado al suelo en cuyo extremo superior cuelgan unos cables. Estos soportan unos elementos que conforman un sistema hexagonal en los que se construyen los forjados inferior y superior²⁶.

El cuerpo del edificio se encuentra separado del terreno, que sólo se ve alterado por la presencia del mástil, por donde se accede a la planta superior. La zona de vivienda está rodeada por un cerramiento que combina paneles opacos, translúcidos y transparentes. Estos, al igual que todos los demás elementos, son móviles y cuelgan de la estructura. Fuller trata de que todos los elementos de la vivienda actúen como electrodomésticos que pueden ser fácilmente desplazados o reemplazados.

[F72]



Proceso constructivo

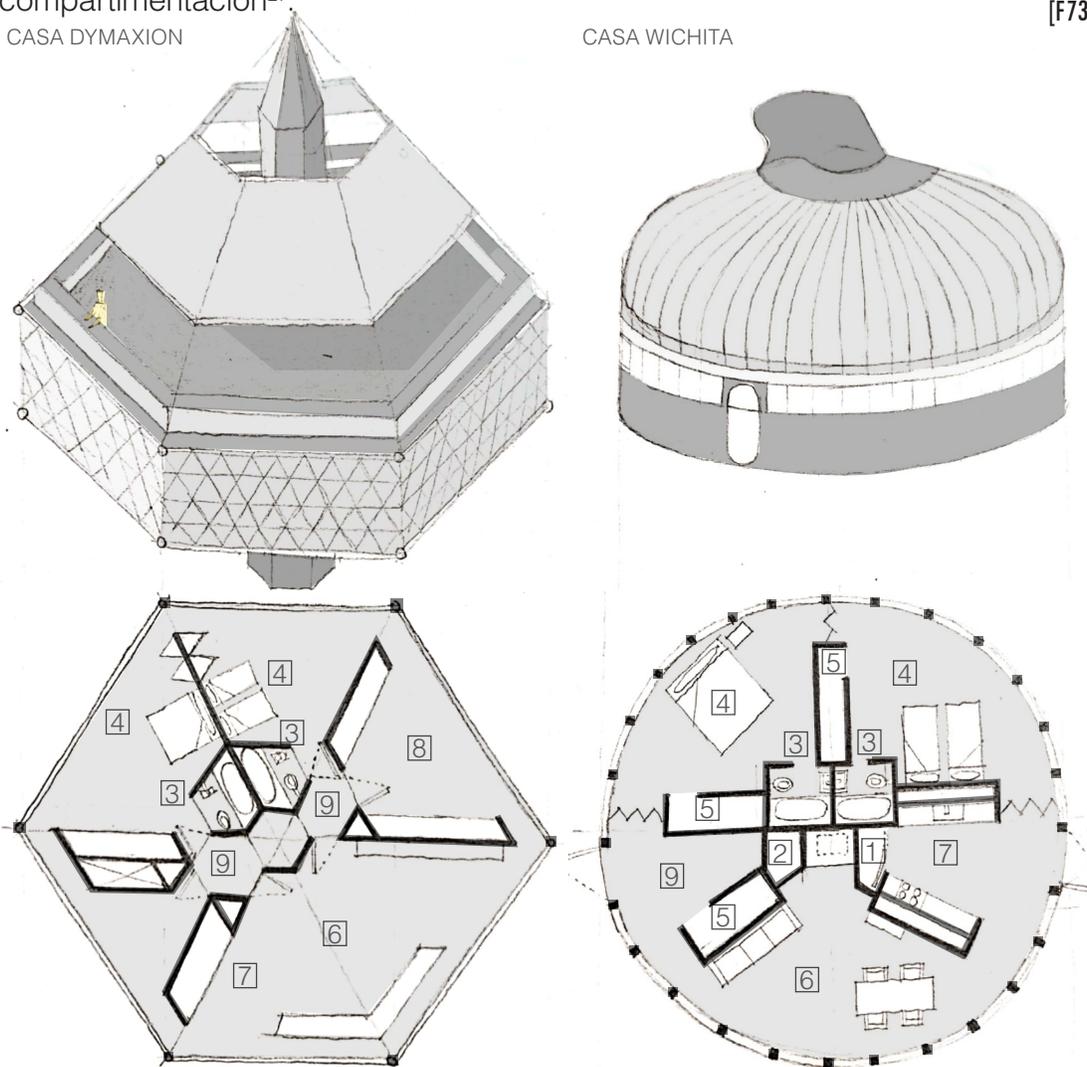
- | | |
|------------------------------------|---|
| 1 Instalación de los mástiles | 5 Forjado inferior y compartimentación interior |
| 2 Construcción del núcleo | 6 Forjado superior y cubierta |
| 3 Anillo superior de la estructura | 7 Parasol |
| 4 Anillo inferior de la estructura | 8 Fachada |

La Casa Wichita es una versión construida tras la Segunda Guerra Mundial para continuar el desarrollo del proyecto iniciado en la Casa Dymaxion. En ella se incorporan los nuevos materiales y avances desarrollados durante la contienda. Esto permite que el edificio encubra los elementos estructuras y pueda liberar completamente la fachada. Fuller, además, logra substituir la planta hexagonal por una circunferencia de 11 metros de diámetro, con la que obtiene la máxima eficiencia de ocupación del espacio. La vivienda incorpora dos dormitorios, dos baños, una cocina y un amplio salón de estar, separados todos ellos por armarios giratorios que actúan de elemento de compartimentación²⁷

[F73]

CASA DYMAXION

CASA WICHITA



[F73] Planta y axonometría de las casas Dymaxion (1920) y Wichita (1948). Richard Buckminster Fuller.

Fuente: Elaboración propia

Leyenda

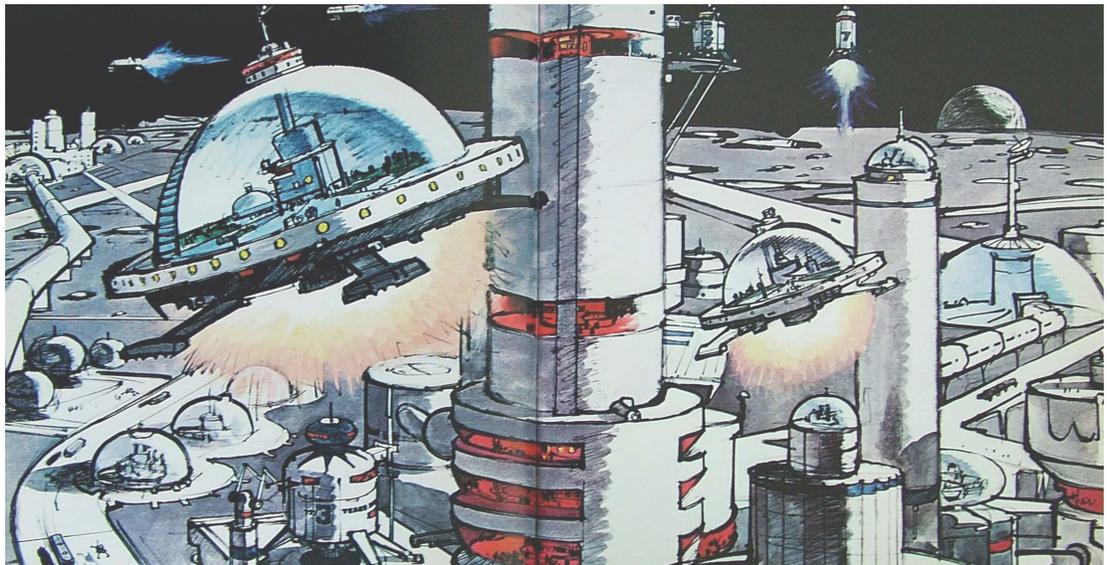
- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| 1 Despensa | 6 Salón-comedor |
| 2 Instalaciones y mantenimiento | 7 Cocina |
| 3 Baño | 8 Biblioteca |
| 4 Dormitorio | 9 Distribuidor |
| 5 Armario | |

3.3 Hábitats de Clase III

La última generación de hábitats es la que más rasgos guarda con la arquitectura terrestre. Liberados de las restricciones impuestas por los vehículos de lanzamiento, las construcciones lunares se abren a un gran abanico de diseños, formas, volúmenes y materiales.

Se espera que muros, vigas, revestimientos y pilares sean elementos arquitectónicos comunes. Debido a la reducida gravedad, estructuras delgadas y poco masivas, de apariencia ligera y expansiva, dominarán el paisaje y generarán un fuerte contraste con el hermetismo y la interioridad que caracterizará la vida en la Luna. Las construcciones de las colonias necesariamente se fabricarán a partir de los materiales presentes en el satélite, especialmente, de regolito²⁸. Los productos derivados como el hormigón, el vidrio, el hierro y las aleaciones de titanio y aluminio serán distintivos de las construcciones lunares²⁹.

Aunque todavía en fases muy tempranas, las agencias espaciales ya están interesadas en el desarrollo de estas ideas más avanzadas. Las colaboraciones con arquitectos como Foster y el interés por convocar concursos como Moontopia o Marstopia, son prueba de ello. No obstante, las primeras propuestas están encaminadas hacia la investigación de hábitats que se podrían enmarcar en una categoría que reúne características conjuntas propias de la Clase II y III.



[F74] Boceto del artista Robert McCall en el que se ilustra una futura ciudad en la Luna. La gravedad reducida posibilita una construcción en la que se alcanzan magnitudes y composiciones difíciles de realizar en la Tierra. Las conexiones entre los distintos edificios urbanos, como puede observarse, se realizan mediante pasarelas cubiertas o pasos subterráneos.

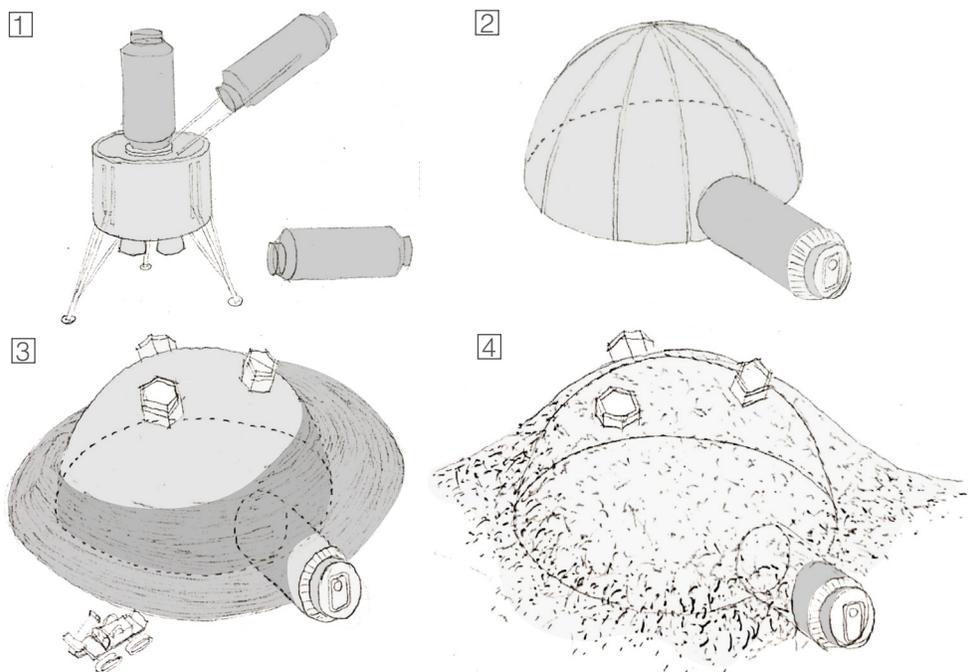
Fuente: McCall Studios

Lunar Habitation

El estudio de Norman Foster se ha sumado a una iniciativa de la Agencia Espacial Europea para explorar las posibilidades de la impresión en 3D como método de construcción de colonias en la Luna. El proyecto aborda el reto de transportar los materiales e investigar el uso del regolito como material constructivo.

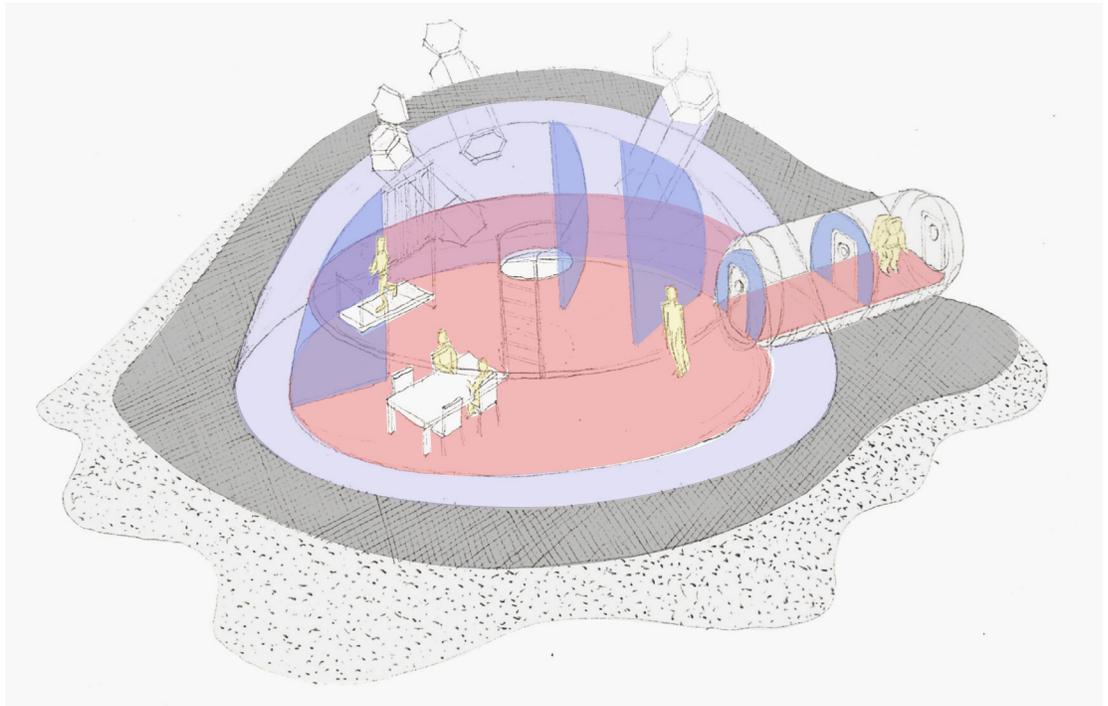
El proceso de construcción se inicia de un modo similar al de los hábitats de segunda generación. El módulo de aterrizaje transporta un cilindro rígido que contiene una cúpula inflable. Tras la entrega, la membrana inflable se despliega de uno de los extremos del módulo tubular y se convierte en la estructura de apoyo para la construcción sólida de la cúpula. Un robot con impresora 3D crea un armazón protector depositando capas de regolito que se separan por una lámina imprimida con estructura celular de huecos cerrados para que actúe como armazón. La estructura es extremadamente ligera y resistente, y protege a los cuatro tripulantes que ocupan el hábitat de los peligros de la radiación, las temperaturas extremas y el impacto de micrometeoritos.

Una vez completada la construcción, la cápsula cilíndrica se convierte en el lugar por el que se realiza el acceso. Esta contiene la esclusa de entrada, un compartimento para depositar los trajes espaciales, y el módulo de soporte técnico. El interior de la cúpula alberga los lugares de trabajo y vivienda, que se encuentran divididos en dos niveles conectados a través de un hueco central. Unos espejos rotativos instalados en el exterior reflejan la luz solar y la canalizan al interior a través de unos conductos, consiguiendo iluminar naturalmente el interior del habitáculo³⁰.



[F75] Esquema del proceso de inflado e impresión 3D del proyecto Lunar Habitation. Norman Foster.

Fuente: Elaboración propia



[F76] Axonometría de la distribución interior del proyecto.
Fuente: Elaboración propia



[F77] Vista exterior del proyecto.
Fuente: Foster and Partners

Lunar Test Lab

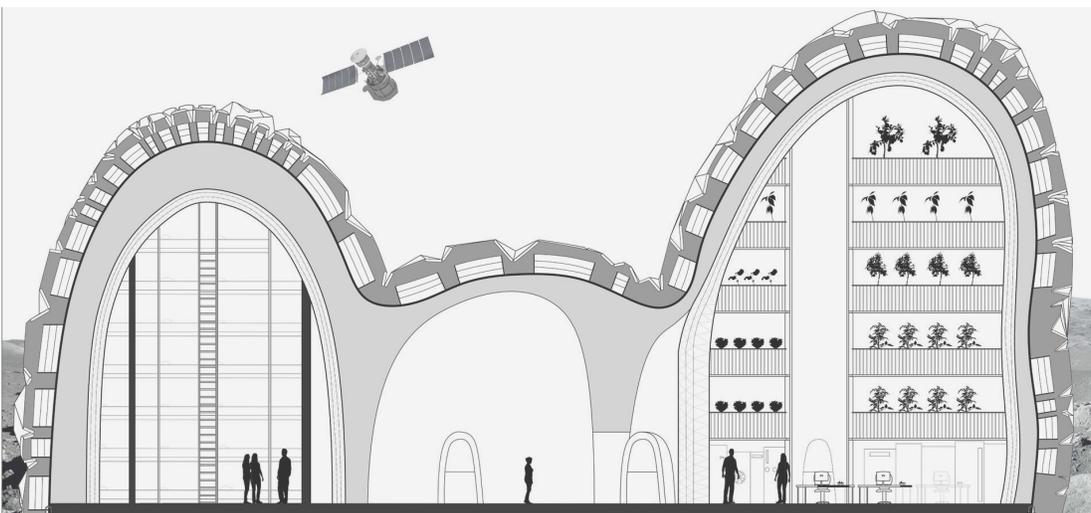
La revista Eleven es la responsable de organizar entre los años 2016 y 2017 el concurso Moontopia, una competición en la que se presentan diseños innovadores para la construcción de colonias espaciales autosuficientes en la Luna.

El proyecto ganador “Lunar Test Lab” del equipo formado por las jóvenes arquitectas Monika Lipinska, Laura Nadine Olivier e Inci Lize Ogun, propone una estructura que puede crecer con el paso del tiempo utilizando impresoras 3D. Inspirado en las muñecas Matrioshka, consta de una gran capa exterior de fibra de carbono que protege las burbujas habitables, las cuales albergan los distintos compartimentos de la colonia. La membrana exterior, además de proteger de los elementos nocivos, también es capaz de generar agua y oxígeno a través de una reacción química en la que se combinan los átomos de hidrógeno provenientes del viento solar y los elementos que la componen.



[F78] Vista exterior del proyecto.

Fuente: Monika Lipinska

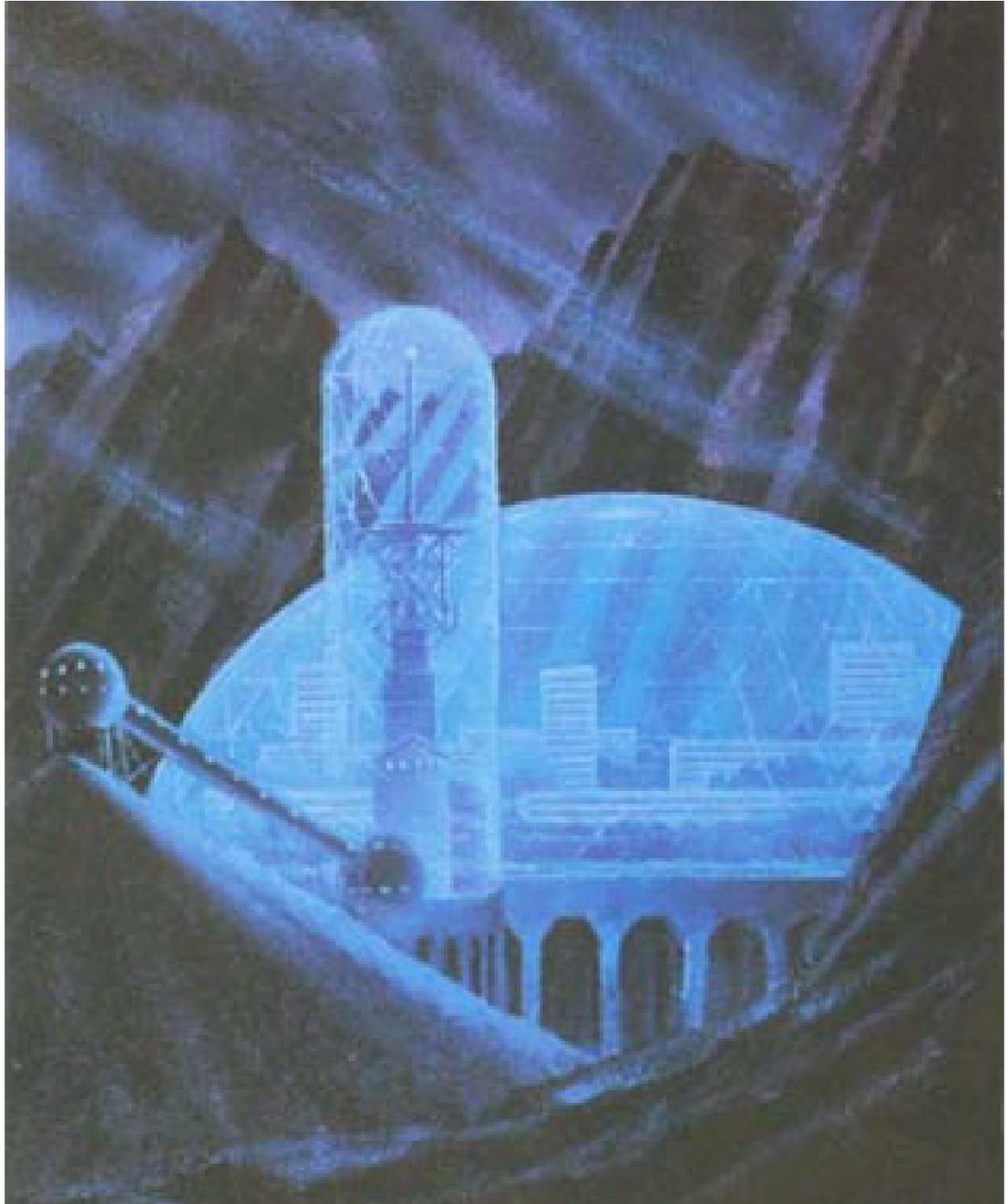


[F79] Sección longitudinal.

Fuente: Monika Lipinska

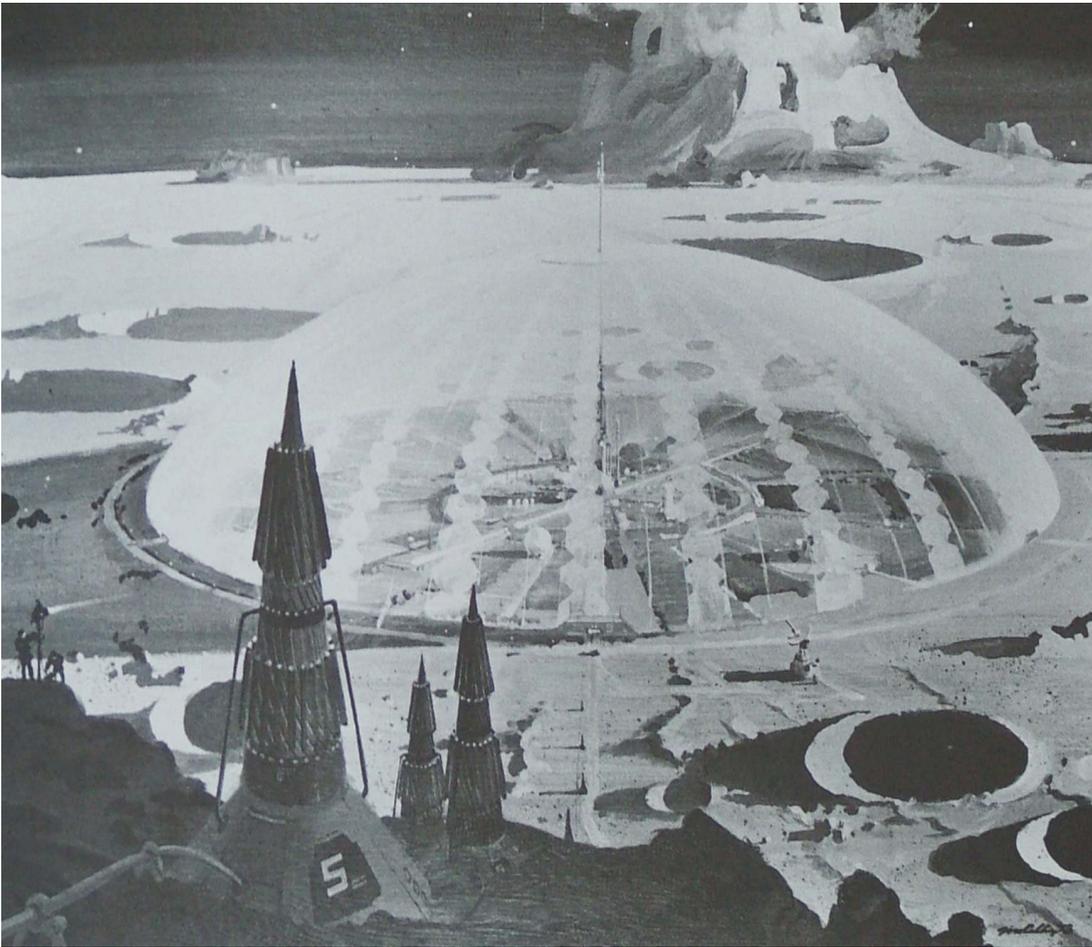
3.4 La ciudad en la Luna

Las ciudades espaciales tienden a ser concebidas como grandes estructuras envolventes que resguardan una población en su interior. La visión más común es la de una voluptuosa cúpula de vidrio³¹ bajo de la cual brillan las luces de una urbe de futurista arquitectura. Tal vez, este icono visual haya sido tantas veces imaginado debido a que es una solución que resulta estéticamente agradable a la vista³².



[F80] "Ciudad en Venus". Ilustración de A. Leonov, A. Sokolov. para "Starways", 1971.

Fuente: Scifiart.narod.ru



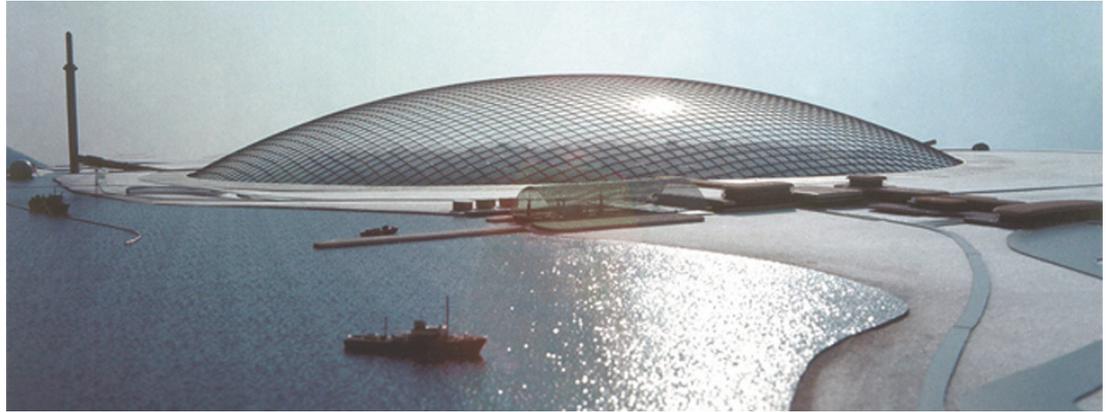
[F81] Boceto del artista Robert McCall en el que se ilustra una futura ciudad en la Luna bajo un gran domo transparente. La propuesta recuerda a proyectos como “Cúpula sobre Manhattan” (1960) o “Ciudad en el Artic” (1971), ideados respectivamente por los arquitectos Richar Fuller y Frei Otto.

Fuente: McCall Studios



[F82] Imagen con la propuesta de Fuller para cubrir parte de Manhattan bajo una cupula transparente.

Fuente: The Estate of R. Buckminster Fuller.

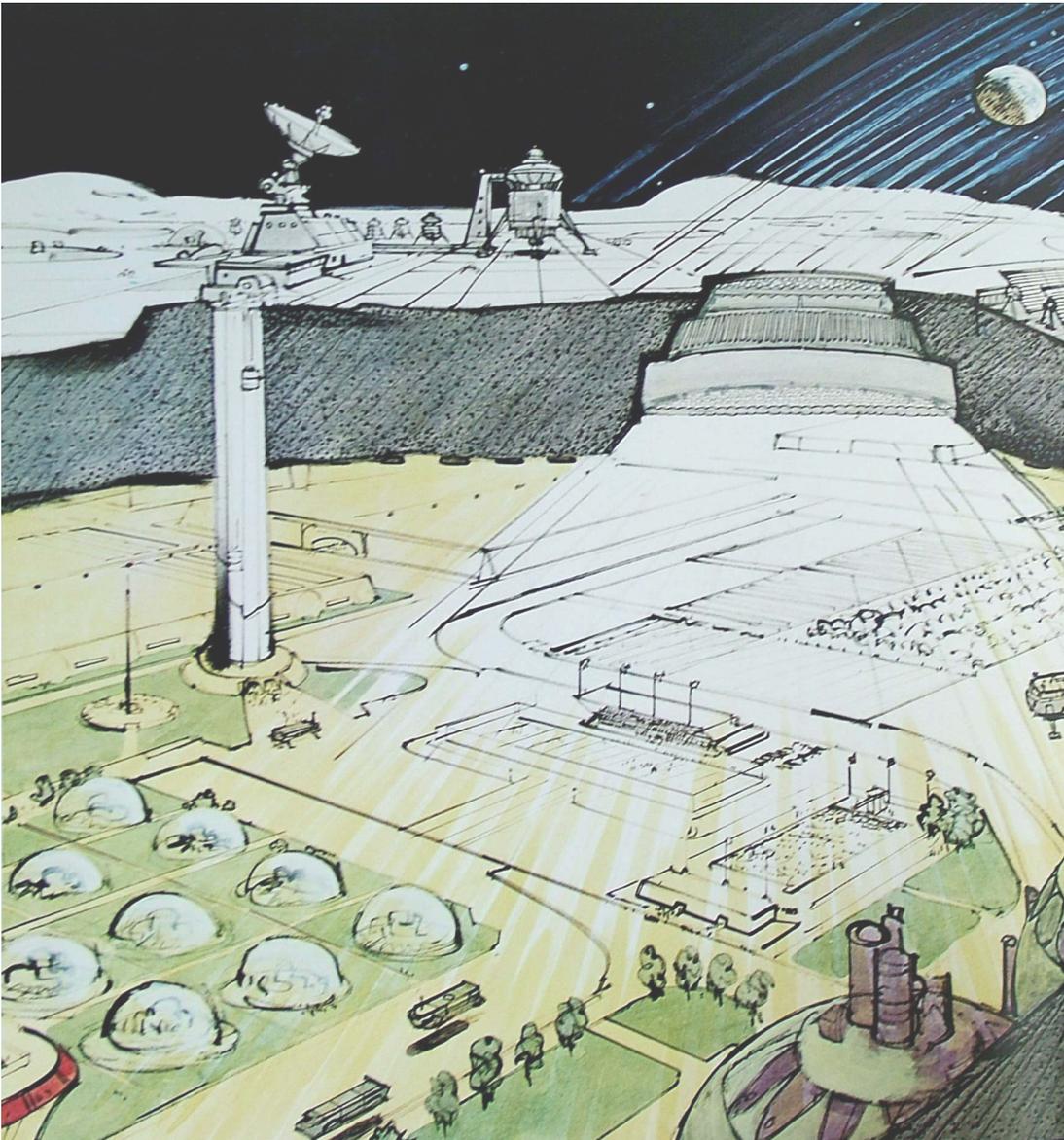


[F83] Maqueta de "City in the Arctic" (Ciudad en el Ártico) de Frei Otto, 1970.
Fuente: Atelier Frei Otto Warmbronn

Debido a la necesidad de protegerse de los eventos solares, los rayos cósmicos y los micrometeoritos, los domos transparentes son imposibles de desarrollar con los materiales que actualmente se conocen, ya que la fuerte y constante radiación proveniente del espacio cocería y envenenaría a los habitantes³³. No obstante, existen indicios de la existencia de gigantescos túneles y domos de lava bajo la superficie lunar³⁴. Estos se plantean como una posible alternativa a las colonias bajo las cúpulas de vidrio, ya que el espesor del terreno sobre las cavidades brinda una excelente protección. Aunque los últimos estudios indican que algunas de estas estructuras son increíblemente estables, pese a su magnitud dimensional y volumétrica³⁵, es probable que al menos las primeras ciudades lunares sólo los aprovechen en parte.



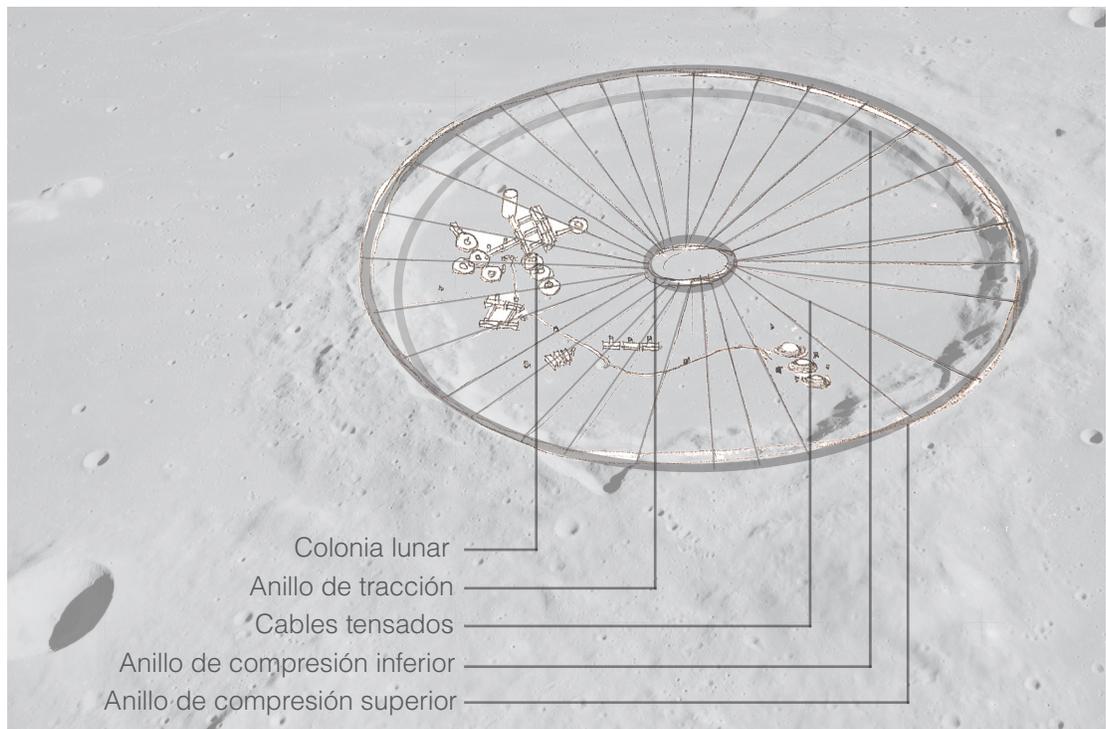
[F84] Imagen de la superficie lunar tomada durante la misión Apollo 15 (1971). Los surcos y grietas que se observan en la parte inferior, constituyen tubos de lava parcialmente derrumbados.
Fuente: NASA



[F85] Boceto del artista Robert McCall que muestra una ciudad subterránea en la Luna. Una gruesa capa de material protege el interior de la letal radiación. Diversas aberturas se han creado para comunicar la ciudad con la superficie, permitir la entrada de luz solar y facilitar la ventilación y la refrigeración.

Fuente: McCall Studios

Tomando como referencia la propuesta de la arquitecta Alice Eichhold³⁶, los asentamientos lunares se podrían construir en el interior de cráteres o tubos de lava derruidos y cubrirlos con una estructura de cables tensados. De este modo, las construcciones están más resguardadas de los elementos que aquellas que se planifiquen en campo abierto, ya que los laterales rocosos brindan mayor protección. Además, configuran un entorno visualmente más unitario. Aunque no se tiene claro la eficiencia con la que puede proteger la cubierta, a nivel de diseño, se crea un lugar semiexterior de gran potencial.



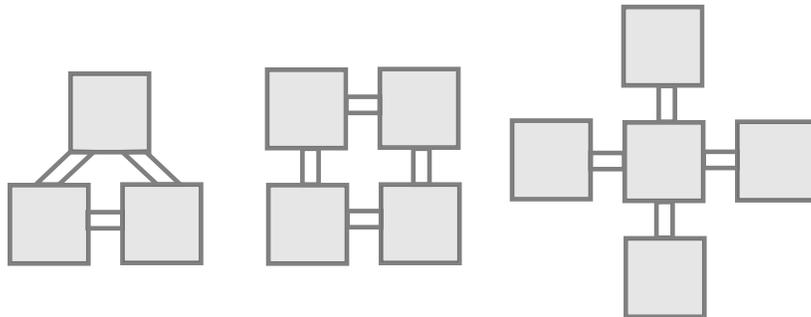
[F86] Esquema del proyecto de Alice Elchhold. Aprovechando la geometría de un cráter, la arquitecta propone crear un espacio semicubierto bajo el cual construir una colonia.

Fuente: Elaboración propia

Es más probable que la ciudad en la Luna consista en una agrupación de hábitats interconectados. Aunque se espera que las tres clases de hábitats convivan durante el periodo de consolidación y crecimiento de la colonia, se desconoce cómo puede ser el asentamiento en el futuro. Puede que las primeras generaciones de módulos no terminen de substituirse y abandonarse, y se acabe adaptando su diseño en una especie de búsqueda de optimización de los recursos. Tal vez las construcciones de tipo I y II se utilicen en misiones en las que por los requisitos temporales y las necesidades espaciales y de confort de la tripulación, se puedan resolver satisfactoriamente con estos módulos sin necesidad de recurrir a otros de mayor complejidad. Sea como fuere, la ciudad espacial puede ser un lugar de gran heterogeneidad que deberá ser organizado desde su creación, ya que la necesidad de optimizar los recursos y la dificultad para traer materiales de la Tierra, descartan la posibilidad de permitir que los asentamientos crezcan de forma informal.

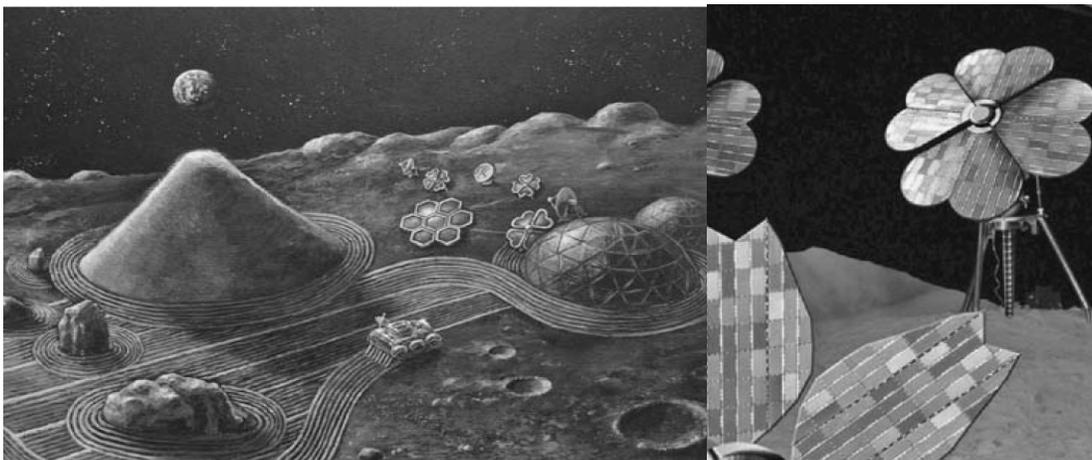
Un urbanismo libre y disperso, con edificaciones a lo largo del territorio, no es factible de plantear al menos hasta que no se establezca una industria de extracción y manufactura de gran calado. La alta densidad y a la compactación se convierten, por tanto, en atributos intrínsecos para todo asentamiento espacial inicial. El profesor Larry Bell, director del Centro Internacional Sasakawa para la arquitectura espacial (SICSA), esboza algunos de los posibles patrones organizativos que se pueden presentar en una ciudad lunar.

Respecto a las viviendas, se proponen dos posibles soluciones. Por un lado, una configuración en triángulo posibilita la creación de un bucle utilizando la menor cantidad posible de módulos. Esta disposición puede reducir los enfrentamientos interpersonales, ya que ofrece la posibilidad de evitar el tránsito por un compartimento para llegar a otro. No obstante, esta geometría presenta inconvenientes en cuanto al ensamblaje para interconectar las estructuras, por lo que una distribución en cuadriláteros ortogonales resulta más ventajosa, a pesar de que requiere mayor número de módulos y ocupa una mayor superficie.



[F87] Esquema con diferentes tipos de uniones entre módulos.
Fuente: Elaboración propia

Ambas modelos presentan la particularidad de contar con un espacio interior que se asemeja a un patio. La artista Ayako Ono introduce los “karesansui” como idea para diseñar los exteriores de las construcciones espaciales. También llamados paisajes secos, son un tipo de jardín japonés compuesto por rocas y arena en la que se dibujan formas redondeadas. El objetivo que persigue es el de aprovechar los elementos del entorno lunar para combinar arte y naturaleza. Ono también apunta a introducir formas naturales a través de paneles solares que se asemejan a flores. así como disponer los módulos de hábitat formando estructuras fractales.

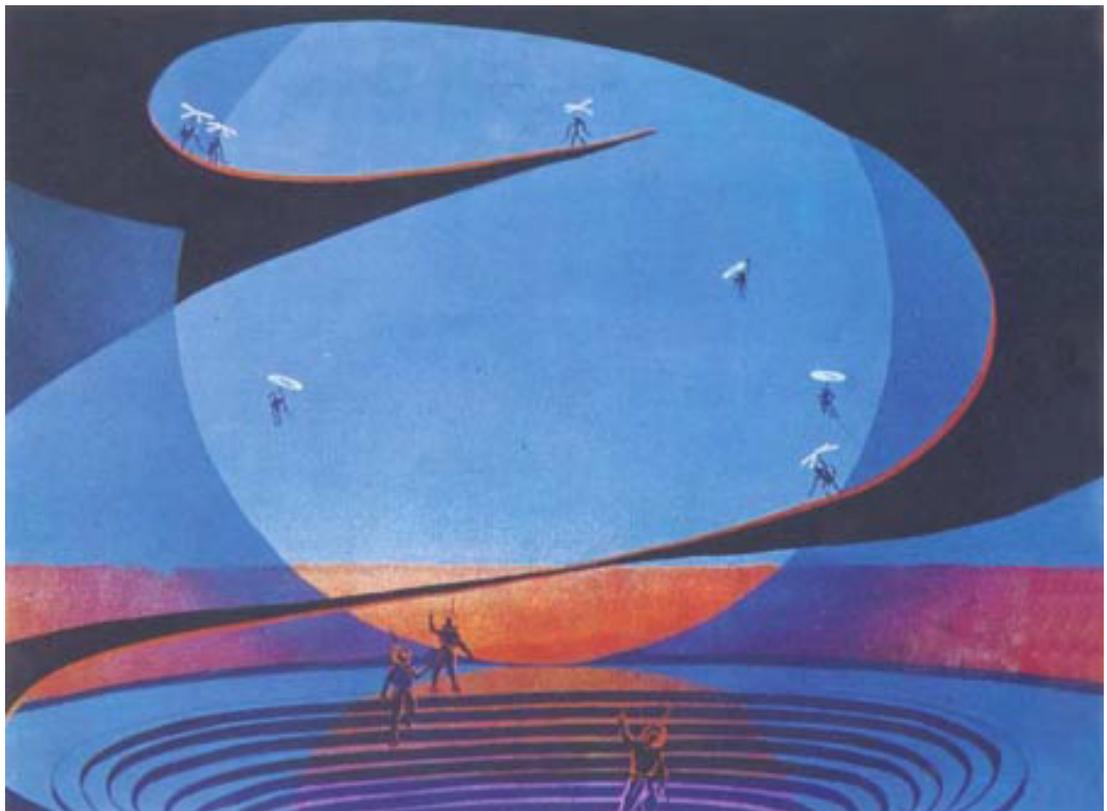


[F88] Jardín Zen Lunar y Panel solar con geometría floral. Conceptos propuestos por la artista Ayako Ono para implementar un diseño respetuoso con el entorno y que, además, contribuya a mejorar la calidad de vida de los colonos de la Luna.

Fuente: Lunar Settlements, Taylor & Francis Group, 2010.

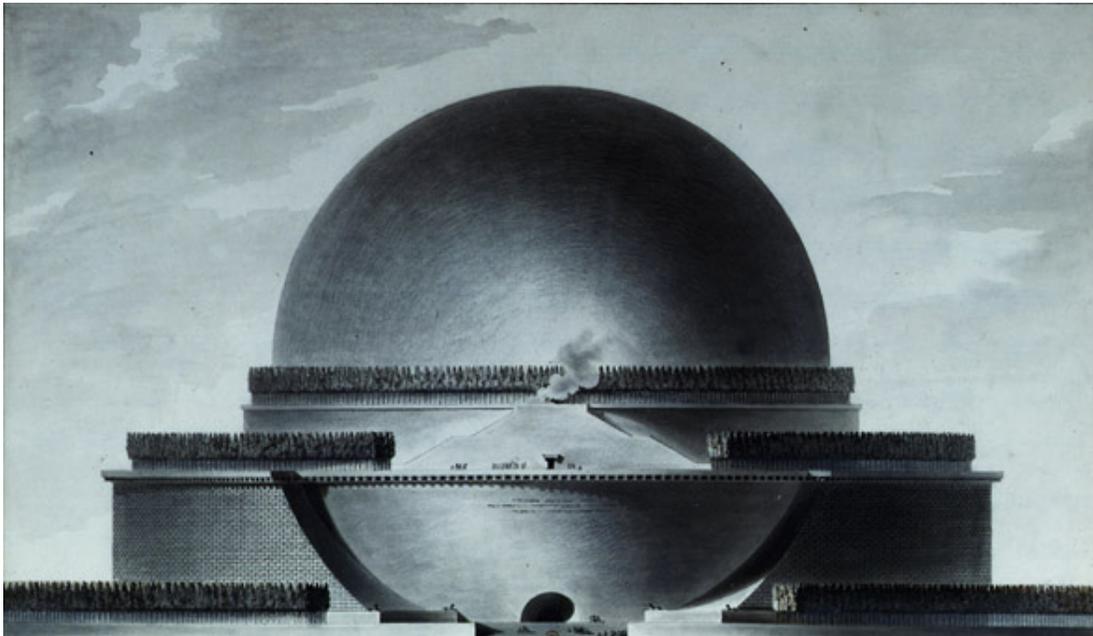
Respecto a la organización y planificación de las parcelas y los edificios urbanos, Bell recurre a la mención de tres ejemplos terrestres que se pueden adoptar como referentes. Todos ellos permiten el desarrollo de una vida urbana a cubierto y alejada de los espacios naturales.

El urbanismo grecorromano se toma como primera referencia para la confección de un vecindario espacial. Las ciudades helénicas e itálicas, pese a adoptar un organización hipodámica y repetitiva, destacan por el control de los volúmenes y las vistas para formar recorridos urbanos teatrales y dinámicos³⁷. Los centros comerciales y grandes almacenes se alzan como los ejemplos a seguir en cuanto al diseño de las zonas de tiendas y negocios. Estos espacios y sus locales estimulan sensorialmente al consumidor controlando, entre otras cosas, las vistas y la iluminación de forma que se mejora la experiencia de compra y se incentivan las ventas, convirtiéndolo en un lugar de gran concentración económica y social. Por último, los edificios religiosos ofrecen una gran lección arquitectónica, en especial las construcciones medievales bizantinas, musulmanes y cristianas. A través del empleo de la luz, la acústica, el color y la geometría, la atmósfera de los templos logra emocionar al fiel y apelar fuertemente a su espiritualidad sin recurrir a vistas exteriores.



[F89] "Extraterrestrial Architecture". A. Sokolov. 1967. Ilustración para "Stars are awaiting for us". Editorial Young Guard. Moscú. 1967. El dibujo muestra una arquitectura creada por una civilización no humana asentada en otro planeta. Las geometrías y los diseños dejan asombrados a los visitantes terrestres.

Fuente: Scifiart.narod.ru



[F90] Cenotafio de Newton. Étienne-Louis Boullée. 1784. La geometría y diseño del proyecto recuerda a los dibujos del artista soviético Andrei Sokolov. Tal vez, ambas utopías puedan ser llevadas a cabo algún día en la Luna.

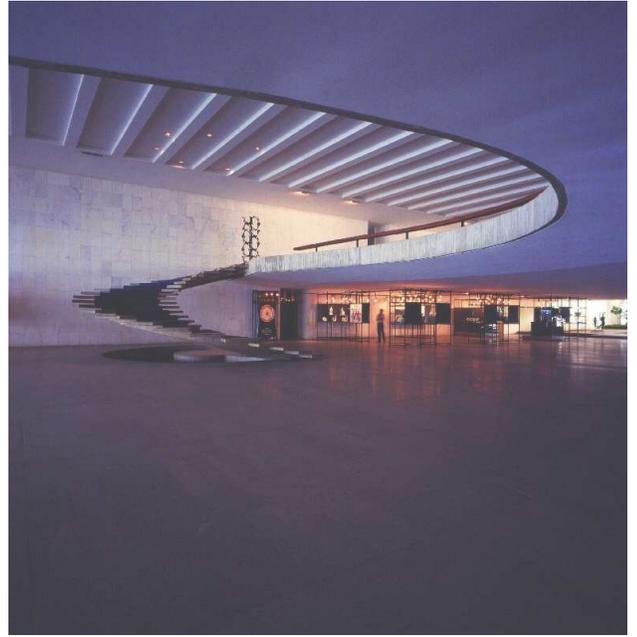
Fuente: Biblioteca Nacional de Francia.

Anotaciones y Referencias

- 1 Larry Bell, «Surface Infrastructure, Planning and Design Considerations for Future Lunar and Mars Habitation», en *Lunar settlements*, Haym Benaroya (CRC Press, 2010), 388.
- 2 M.M. Cohen y H. Benaroya, « Lunar-base structures», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 181.
- 3 K. Kennedy, «Vernacular of space architecture», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 8.
- 4 Javier-Chan, Porras Rhee, «Colonias Espaciales: Estudio Paramétrico de Espacios Habitables En Microgravedad» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2019), 12.
- 5 Kennedy, «Vernacular of space architecture», 9.
- 6 Brent Sherwood, «Lunar architecture and urbanism», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 318.
- 7 Bell, «Surface Infrastructure», 387.
- 8 Larry Toups y Kriss J. Kennedy, « Lunar habitat concepts», en *Out of this world: The new field of space architecture*, Howe, A. Scott, y Brent Sherwood (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009), 207.



[F91] "In the bottom of another planet", A.Sokolov, 1970. Ilustración para el libro "To the Stars". Editorial Aurora. Leningrado, 1970.
Fuente: Scifiart.narod.ru



[F92] Escaleras del Ministerio de Relaciones Exteriores. Oscar Niemeyer. Brasilia. 1962. posible fuente de inspiración para la ideación de las arquitecturas interiores imaginadas por el artista soviético Andrei Sokolov.
Fuente: Fundación Oscar Niemeyer

9 Ibid.

10 Ibid., 208.

11 John F. Connolly, «Constellation program overview», en *NASA Presentation*, (Constellation Program Office, 2009), https://www.nasa.gov/pdf/163092main_constellation_program_overview.pdf.

12 Sherwood, «Lunar architecture and urbanism», 322.

13 Marta Woodward Moncho, «La Cabaña. Un espacio mínimo para habitar» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de València, 2019), 12.

14 Xavier Monteys, *La habitación: más allá de la sala de estar*. (Barcelona: Gustavo Gili, 2014), 10.

15 Woodward Moncho, «La Cabaña. Un espacio mínimo para habitar», 47.

16 Ibid., 63.

17 Monteys, *La habitación: más allá de la sala de estar*, 58..

18 Ibid., 88.

- 19** Ibíd., 17.
- 20** Emilio Martín Gutiérrez, «El movimiento metabolista: Kisho Kurokawa y la arquitectura de las cápsulas», *Boletín Académico, Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña*, nº12 (1990): 21.
- 21** Sergi Prió Gea, «Arquitectura del espacio mínimo» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2019), 36.
- 22** Porras Rhee, «Colonias Espaciales», 36.
- 23** Touns y Kennedy, « Lunar habitat concepts», 210.
- 24** Porras Rhee, «Colonias Espaciales», 39.
- 25** Prió Gea, «Arquitectura del espacio mínimo», 31.
- 26** Miriam Martín Santos, «Descifrando la casa 4D Análisis e interpretación del proyecto “4D House” del Programa Dymaxion de Buckminster Fuller» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2015), 7.
- 27** Lara Monfort Ballester, «Richard Buckminster Fuller. Prototipos para la industrialización de la vivienda» (Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de València, 2015), 25.
- 28** Sherwood, «Lunar architecture and urbanism», 323.
- 29** Aunque no son en exclusiva los únicos materiales posibles, si son los que presentan mayores expectativas de uso debido a la facilidad con la que se pueden fabricar y su adecuación a las exigencias del entorno lunar.
- 30** Para mayor información sobre Lunar Habitation véase «Building a lunar base with 3D printing», The European Space Agency, acceso el 17 de julio de 2020, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing.
- 31** Sherwood, «Lunar architecture and urbanism», 323.
- 32** Niklas Järström, «A Self-Sufficient Moon-Base Analogue», en *Lunar settlements*, Haym Benaroya (CRC Press, 2010), 366.
- 33** Sherwood, «Lunar architecture and urbanism», 366.
- 34** Leonard Davis, «Living Underground on the Moon: How Lava Tubes Could Air Lunar Colonization», *Space.com*, 30 de julio de 2019, acceso el 20 de agosto de 2020, <https://www.space.com/moon-colonists-lunar-lava-tubes.html>
- 35** Laura Geggel, « City-Size Lunar Lava Tube Could House Future Astronaut Residents», *Space.com*, 21 de octubre de 2017, acceso el 20 de agosto de 2020, <https://www.space.com/38527-moon-lava-tube-could-shelter-astronauts.html>.
- 36** Cohen y Benaroya, «Lunar-base structures», 196.
- 37** Sherwood, «Lunar architecture and urbanism», 325.

4. Conclusiones

El papel de la arquitectura en el desarrollo y la evolución de los programas espaciales puede considerarse más bien escaso. Aunque destacan figuras como Galina Balashova y Constance Adams, la aportación no puede compararse al de otras disciplinas como la ingeniería.

Hasta la fecha, la ideación de estructuras en las que se prioriza la eficiencia de la máquina frente al bienestar de la tripulación ha sido la corriente predominante, y ha sido necesaria y beneficiosa para lograr que el hombre llegue al espacio. Sin embargo, cada vez más hay una mayor voluntad de aumentar el número de tripulantes y la duración de las misiones, por lo que se vuelve necesario reformular los diseños y volcarlos hacia una mejora del confort humano. Aunque se han producido grandes avances en el diseño y el tratamiento del interior desde las primeras naves, todavía queda un largo camino por recorrer. Además, hasta que no se inicien las operaciones en suelo lunar, resulta complicado proponer un diseño de hábitat que resuelva adecuadamente los requisitos de la vida humana en el espacio.

Hay que tener presente que la relación entre la arquitectura y el hombre es una interacción que se perfecciona con el paso del tiempo a medida que la sociedad y sus necesidades avanzan y evolucionan. Por esa razón los modelos que se propongan se modificarán constantemente según los tripulantes habiten en ellas, pues serán testeados y probados de forma real, revelando los puntos débiles. A pesar de ello, las simulaciones y las construcciones análogas de hábitats espaciales ya han detectados algunos de los problemas, y diversos estudios empiezan a mostrar una serie de indicaciones deseables de aplicar desde un inicio.

A continuación, se exponen las conclusiones obtenidas tras la tarea de análisis e investigación del presente trabajo. Se aspira a que estas sean integradas y tomadas en consideración en las futuras propuestas para hábitats en la Luna.

Integración con el entorno

Preservar intacta la superficie de la Luna es el mayor objetivo que se debe perseguir. La contemplación de los paisajes lunares vírgenes y las formas naturales del relieve, actúan como una gran fuente terapéutica que estimula la sensibilidad humana y calma las necesidades e instintos más primitivos de la tripulación.

El empleo de regolito para cubrir las futuras estructuras se alza como la opción favorita para lograr una correcta integración paisajística. Este material, presente en abundantes cantidades en la superficie lunar, ofrece, además, una excelente capa de protección contra la radiación y el impacto de meteoritos, y puede emplearse fácilmente utilizando medios mecánicos, robotizados o humanos.

Fundar los asentamientos cerca de cráteres, colinas o riscos también favorece la integración paisajística. No sólo se aprovechan sus formas para mejorar la protección de la colonia frente a los elementos, sino que se pueden servir de guía para su crecimiento, integrando las unidades geológicas lunares en la planificación.

Crear jardines secos es una opción que integra los materiales naturales presentes en la Luna, (como el regolito, las rocas y los minerales) y recrear formas ondulantes y orgánicas que recuerdan a los elementos de la naturaleza terrestre. Esta intervención, que no altera el paisaje sustancialmente, constituye una actividad artística y efímera que combina pasatiempo, relajación y contemplación y mejora las relaciones del grupo durante el proceso de ideación y ejecución.

Ventanas

Las ventanas y las aberturas son necesarias para proveer una entrada de luz natural hacia el interior de los hábitats. Son una parte imprescindible dado que, psicológicamente, simbolizan que un lugar alberga vida. Estos elementos, además, permiten la visualización de la naturaleza y la actividad exterior desde la protección y seguridad del interior. Por lo que se mejora el diálogo existente entre la construcción y el entorno.

Mirar por la ventana tiene enormes efectos terapéuticos. Esto es extremadamente necesario en un entorno en el que la letalidad del exterior se combina con la soledad y la lejanía. Visualizar la naturaleza del exterior, combatir el aburrimiento, y gozar de un momento de reflexión e introspección son algunas de las actividades de las que se puede disfrutar.

Es muy recomendable que las aberturas ofrezcan la posibilidad de regular la iluminación que se recibe. Por una parte, se busca que esto se produzca de forma automática. De esta forma se regula el paso del tiempo, ya que los ciclos diurnos y nocturnos de la rotación lunar difieren en exceso de los de la Tierra. Por otra, se pretende que los tripulantes puedan crear y personalizar el ambiente para que se adecúe a la actividad que se quiera realizar.

Es necesario recordar el gran inconveniente que suponen las ventanas. Ellas son los puntos débiles de la estructura. Aunque se recomienda que presenten formas circulares en ojo de buey, se prefiere que los hábitats incluyan un reducido número de ventanas, con dimensiones modestas; ya que, al presentar una menor protección, la radiación penetra con mayor facilidad a través de ellas.

Existe un intenso debate entre la necesidad de instalar ventanas (para mejorar la iluminación, crear vistas y mejorar la habitabilidad) y prescindir de ellas (para reducir el riesgo de radiación y fallo estructural). Una solución podría ser la instalación de pantallas digitales que reprodujesen imágenes del exterior. Otra podría ser la ideación de falsas ventanas con espejos reflectantes que permitiesen visualizar el exterior minimizando la entrada de radiación directa.

Restringir el uso de las ventanas a los periodos de menor riesgo para la tripulación (etapas de umbría y de baja intensidad radiactiva) parece ser otra de las alternativas. Aunque no existe un claro consenso sobre cómo actuar, puede que la mejor de las soluciones sea una combinación de todas ellas.

Espacios reservados para el descanso, la intimidad, y la socialización

La experiencia de la tripulación de la ISS ha demostrado la necesidad de incorporar dormitorios en los diseños para contar con compartimentos cómodos y exclusivos para dormir. Estos deben poder aislarse acústicamente del resto de las estancias, por eso se recomienda situarlos lo más apartados posible de los recorridos principales. Así se facilita esta tarea. Es conveniente que se cuente con una ventana individual para el disfrute personal de cada tripulante. Además, se deben instalar múltiples compartimentos que ofrezcan suficiente espacio para el almacenamiento personal.

Se necesitan también áreas para el trabajo y la recreación íntima y personal, y ofrecer la posibilidad de personalizar el dormitorio según el gusto personal (colores, iluminación, distribución, mobiliario o usos).

Fuera de la zona de dormitorios, es conveniente contar con rincones y zonas de confidencias. Estos lugares pueden emplearse para propiciar conversaciones personales o actividades con reducidas personas, aunque también pueden ser excelentes lugares para la contemplación, la meditación y la reflexión. Hay que recordar que se debe evitar la discriminación y el aislamiento severo de un individuo o grupo. Es por eso que el posicionamiento de estos lugares debe estar cerca de los espacios y recorridos principales.

Las salas y espacios comunes permiten la celebración de reuniones y diversas actividades con grupos grandes. Se debe procurar que todos los tripulantes disfruten de los momentos de sociabilización, por lo que se debe

evitar los diseños excluyentes y etnocéntricos. No obstante, hay que ofrecer la posibilidad de no participar en ellos. Una organización de los espacios en bucle (triangular, rectangular o con otras geometrías) ofrece rutas alternativas y evita que un individuo atraviese una sala que no desea traspasar. De esta forma se reducen los posibles conflictos interpersonales.

A modo de sugerencia, se pueden emplear distintos elementos propios de la Luna para crear una iconografía y un diseño en el que todos los tripulantes puedan sentirse identificados. También se pueden emplear para crear una cultura común, aunque se deben incorporar reminiscencias a la Tierra para evitar olvidar los orígenes en una potencial civilización lunar.

Estimulación sensorial

El uso de colores suaves, claros y cálidos son óptimos para prevenir la depresión entre la tripulación. La pigmentación puede utilizarse no solo con fines terapéuticos, sino como modo de mejorar la orientación (diferenciando el plano suelo-techo con diferentes colores o gamas cromáticas). Además, los colores pueden ayudar a delimitar mejor las zonas y las funciones dentro de una misma sala. Incluso contribuir a crear atmósferas según la función deseada.

La introducción de materiales y fibras naturales como maderas, tejidos, pétreos o cerámicos, acerca la tripulación a la naturaleza, en un entorno privado de ella, y los incentiva mediante el estímulo visual, táctil e incluso sonoro. Con el mismo objetivo, se podrían instalar pantallas digitales o dibujos y esculturas que representen elementos y sonidos naturales.

Espacios flexibles

Las estancias flexibles y que permiten realizar múltiples tareas, son un método extraordinario para usar eficientemente el espacio disponible (extremadamente escaso en los primeros modelos de hábitat) El empleo del mobiliario para organizar y distribuir el espacio, permite obviar paredes y compartimentos, ampliar la variedad de usos permitidos, y facilitar el cambio de funciones. Si además se utilizan piezas flexibles y transformables, un mismo elemento puede servir para distintas funciones. No obstante, es importante destacar que ciertos elementos se recomiendan que ofrezcan poca o nula libertad. Son convenientes para los diseños de baño y cocina. De esta forma se ahorra espacio, pero se mantiene la máxima funcionalidad y comodidad para usar estos servicios.

Separación de zona de trabajo y vivienda

Es recomendable separar las áreas dedicadas a albergar los laboratorios, suministros, instalaciones, almacenes y trajes de paseo espacial (sucios y ruidosos), de las destinadas a la vivienda (dormitorios, socialización, cocina, actividad y deporte, relajación). Podría ser conveniente diseñar una zona de transición entre ambas funciones en la que se instalase la zona de aseo y almacenamiento de materiales y vestimenta de trabajo.

Mayores volúmenes y áreas

Debido a la reducida gravedad se necesitan mayores alturas y espacios horizontales, ya que la relación entre los desplazamientos humanos (saltar, andar y correr) se magnifican entre 3 y 4 veces respecto a las medidas obtenidas en la Tierra. El uso de volúmenes toroidales o cilíndricos con casquetes esféricos puede ser un recurso para generar espacios mayores a través de la expansión de la estructura original mediante métodos inflables o mecánicos.

Recorridos y ambientes escénicos

Un diseño que utilice módulos y construcciones con diferentes volumetrías y genere puntos de vista de forma premeditada, puede crear recorridos urbanos ricos y entretenidos para ser disfrutados por los tripulantes cuando abandonen el interior de los hábitats. En los espacios interiores, el uso de la luz, el sonido y las formas de la arquitectura, puede utilizarse para emocionar a los habitantes y mejorar su experiencia en el espacio.

Todas estas consideraciones, en conclusión, se enmarcan en la realización de diseños que, por un lado, evoquen en los residentes un sentido de pertenencia e identificación con el lugar. Y, por otro lado, favorezcan la intimidad y se adapten fácilmente a las características y necesidades de cada individuo. De esta forma, la permanencia es más agradable y placentera, se produce una mejora en el estado de salud física y mental de los tripulantes, y se puede desarrollar un sentido de unidad que refuerza las relaciones interpersonales y reduce los conflictos. Esto ayuda a la tripulación a mantenerse activa y en alerta en un entorno lleno de peligros y en el que el factor humano puede resultar clave en el éxito de cada misión.

Por último, de cara a futuros estudios, sería conveniente realizar una propuesta de diseño interior para un hábitat, en el que se integrasen todos los elementos anteriormente mencionados. También sería interesante profundizar en las posibilidades constructivas y estructurales, para generar un diseño mucho más tangible y aproximado a la realidad.

5. Bibliografía

- Aldrin, Edwin E. Introducción a *Our World in Space*, de Robert McCall y Isaac Asimov, 11. Stephens. 1982.
- Antonio Martín. «La loca carrera por el turismo espacial». *El Confidencial*. 13 de julio 2019. Acceso el 15 de agosto de 2020, https://www.elconfidencial.com/empresas/2019-07-13/carrera-turismo-espacial-200-000-euros-orbita_2122091/.
- Badger, Jeffrey R. «Designing for Space, on Earth: Creating More Livable Extraterrestrial Habitats Through Architectural Design». Trabajo fin de máster, Universidad de Cincinnati, 2012.
- Bell, Larry. «Surface Infrastructure, Planning and Design Considerations for Future Lunar and Mars Habitation». En *Lunar settlements*, Haym Benaroya, 387-400. CRC Press, 2010.
- Binot, R. E. Kufner, O. Minster, y H. U. Walter. *The International Space Station. Microgravity: A Tool for Industrial Research*. Noordwijk: European Space Agency. 1998.
- Casillas, Raúl Pólit. «Arquitectura espacial: un nuevo campo de innovación práctica». *Revista de treball, economia i societat*, n° 56 (2010): 15–22.
- Cohen, Marc M. y Haym Benaroya. «Lunar-Based Structures». En *Out of this world: The new field of space architecture*. Howe, A. Scott, y Brent Sherwood, 180-204. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- Connolly, John F. «Constellation program overview». En *NASA Presentation. Constellation Program Office*, 2009. https://www.nasa.gov/pdf/163092main_constellation_program_overview.pdf.
- Davis, Leonard. «Living Underground on the Moon: How Lava Tubes Could Air Lunar Colonization». *Space.com*, 30 de julio de 2019. Acceso el 20 de agosto de 2020. <https://www.space.com/moon-colonists-lunar-lava-tubes.html>.
- Doule, Ondrej. «Ground Control: Space Architecture as Defined by Variable Gravity». *Architectural Design* 84 n°6 (2014): 90–95.
- Encyclopaedia Britannica. «Gherman Stepanovich Titov». Acceso el 16 de junio de 2020. <https://www.britannica.com/>.

- Escrig, Félix, and Javier P. Valcárcel. «Estructuras espaciales desplegadas curvas». *Informes de la Construcción* 39. n°393 (1988): 53-71.
- Foster and Partners. «Lunar Habitation». Acceso el 22 de junio de 2020. <https://www.fosterandpartners.com/projects/lunar-habitation/>.
- Fross, Klaudiusz, y Bielak-Zasadzka, Maria. «Space Architecture». En *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 342–353. Springer, 2018.
- Geggel, Laura. « City-Size Lunar Lava Tube Couls House Future Astronaut Residents». *Space.com*, 21 de octubre de 2017. Acceso el 20 de agosto de 2020. <https://www.space.com/38527-moon-lava-tube-could-shelter-astronauts.html>.
- Glushko V.P y Sokolova S.A. «Readings by K.E. Tsiolkovsky. Tsiolkovsky and astronautics». *From the history of domestic science*. n.º3 (1976): 105.
- Goddard Space Flight Center. «Dr.Robert H.Goddard, American Rocketry Pioneer». Acceso el 16 de junio de 2020. https://www.nasa.gov/centers/goddard/about/history/dr_goddard.html.
- Gómez Sánchez, Javier. «Arquitectura Espacial: Características y diseño de los hábitats en el espacio exterior». Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Madrid. 2018.
- Harland, David M. «Space Station», *Encyclopaedia Britannica*. Acceso el 16 de junio de 2020. <https://www.britannica.com/technology/space-station>.
- Harrison, Albert A. «Humanizing outer space: architecture, habitability, and behavioral health». *Acta Astronautica* 66. n°5-6 (2010): 890–896.
- Hollingham, Richard. «Should We Build a Village on the Moon?». *BBC*. Acceso el 15 de Agosto de 2020. <https://www.bbc.com/future/article/20150712-should-we-build-a-village-on-the-moon>.
- International Space Exploration Coordination Group. «The Global Exploration Roadmap». Acceso el 15 de Agosto de 2020, https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/ger_2018_small_mobile.pdf
- Järvstråt, Niklas. «A Self-Sufficient Moon-Base Analogue». En *Lunar settlements*, Haym Benaroya, 355-374. CRC Press, 2010.

- Kennedy, K. «Vernacular of space architecture». En *Out of this world: The new field of space architecture*. Howe, A. Scott, y Brent Sherwood, 7-21. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- Libal, Angela «The Temperatures of Outer Space Around the Earth». *Sciencing*, 13 de abril de 2018. Acceso el 15 de agosto de 2020. <https://sciencing.com/temperatures-outer-space-around-earth-20254.html>.
- López Negro, Elena. «La Casa Del Espacio: Habitar Fuera de La Tierra». Trabajo fin de grado. Universidad Politécnica de Madrid. 2017.
- Malik, Tariq. «NASA Recycles Former ISS Module for Life Support Research». *Space.com*. 14 de febrero de 2006. Acceso el 7 de agosto de 2020. <https://www.space.com/2050-nasa-recycles-iss-module-life-support-research.html>.
- Mars Artic Research Station. «About the FMARS». Acceso el 23 de junio de 2020. <http://fmars.marssociety.org/about-the-fmars/>.
- Mars Desert Research Station. «About the MDRS». Acceso el 23 de junio de 2020. <https://mdrs.marssociety.org/about-the-mdrs/>.
- Martín Gutiérrez, Emilio. «El movimiento metabolista: Kisho Kurokawa y la arquitectura de las cápsulas». *Boletín Académico, Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña*, nº12 (1990): 15–21.
- Martín Santos, Miriam. «Descifrando la casa 4D Análisis e interpretación del proyecto “4D House” del Programa Dymaxion de Buckminster Fuller». Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- McCall, Robert y Asimov, Isaac. *Our World in Space*. Stephens, 1974.
- McCall Studios. «The Artist». Acceso el 15 de junio de 2020. <http://www.mccallstudios.com/>.
- Monfort Ballester, Lara. «Richard Buckminster Fuller. Prototipos para la industrialización de la vivienda». Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de València, 2015.
- Monteys, Xavier. *La habitación: más allá de la sala de estar*. Barcelona: Gustavo Gili, 2014.
- NASA. «Gemini VI Views Gemini VII». Acceso el 7 de agosto de 2020. https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_709.html.

- NASA. «Mir Space Station ». Acceso el 16 de junio de 2020. <https://history.nasa.gov/SP-4225/mir/mir.html>.
- Newman, Dava J. y Harold L. Alexander. «Human locomotion and workload for simulated lunar and martian environments». *Acta Astronautica* 29, n.o 8 (1993): 613–620.
- Porras Rhee, Javier-Chan. «Colonias Espaciales: Estudio Paramétrico de Espacios Habitables En Microgravedad». Trabajo fin de grado. Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
- Prió Gea, Sergi. «Arquitectura del espacio mínimo». Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
- Rask, John. Wenonah Vercoutere. Al Krause y BJ Navarro. «Space Faring: The Radiation Challenge». *Nasa, Module 3*, n°8 (2008):47-62.
- Sandro Pozzi. «La NASA abrirá la Estación Espacial Internacional a turistas en 2020». *El País*, 7 de junio de 2019. Acceso el 15 de agosto de 2020. https://elpais.com/elpais/2019/06/07/ciencia/1559923576_755546.html.
- Santana Santana, Antonio. Carmen Ginés de la Nuez y Pablo Lúcas Máyer Suárez. «El Clima». En *Geografía*, Servicio de Publicaciones y Difusión Científica, 72-93. Las Palmas de Gran Canaria: Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2014.
- Schlacht, Irene Lia y Henrik Birke. «Visual Design: Color and Light for Well Being in Outer Space». En *Lunar settlements*, Haym Benaroya, 175-195. CRC Press, 2010.
- Shane, Bob. «The Cosmic World of Space Artist Robert McCall». *Airport Journals*. 1 de agosto de 2006. Acceso el 6 de Agosto de 2020. <http://airportjournals.com/the-cosmic-world-of-space-artist-robert-mccall/>.
- Sherwood, Brent. «Lunar architecture and urbanism». En *Out of this world: The new field of space architecture*. Howe, A. Scott, y Brent Sherwood, 317-322. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- Sherwood, Brent. «Space architecture for MoonVillage». *Acta Astronautica* 139 (2017): 396–406.
- Sherwood, Brent. «What is Space Architecture?». En *Out of This World: the New Field of Space Architecture*, Howe, A. Scott, and Brent Sherwood, 3-6. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.

Sheryl L. Bishop. «Here to Stay: Designing for Psychological Well-Being for Long Duration Stays on Moon and Mars». En *Lunar settlements*, Haym Benaroya, 261-276. CRC Press, 2010.

The European Space Agency. «About space debris». Acceso el 22 de junio de 2020. https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/About_space_debris.

The European Space Agency. «Alexei Leonov: The artistic spaceman». Acceso el 7 de agosto de 2020. https://www.esa.int/About_Us/ESA_history/Alexei_Leonov_The_artistic_spaceman.

The European Space Agency. «Building a lunar base with 3D printing ». Acceso el 17 de julio de 2020, http://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing

The European Space Agency. «El polo Sur lunar salpicado de cráteres». Acceso el 15 de agosto de 2020. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/El_polo_Sur_lunar_salpicado_de_crateres.

The European Space Agency. «ISS: International Space Station». Acceso el 16 de junio de 2020. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/International_Space_Station/ISS_International_Space_Station.

The European Space Agency. «La atmósfera terrestre llega hasta la Luna...y más allá». Acceso el 15 de agosto de 2020. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/La_atmosfera_terrestre_llega_hasta_la_Luna_y_mas_alla.

The European Space Agency. «Slovenia becomes sixth ESA European Cooperating State». Acceso el 7 de agosto de 2020. https://www.esa.int/About_Us/Corporate_news/Slovenia_becomes_sixth_ESA_European_Cooperating_State.

The University of Arizona. «Biosphere 2». Acceso el 23 de junio de 2020. <https://biosphere2.org/>.

Toups, Larry y Kriss J. Kennedy, « Lunar-habitat concepts». En *Out of this world: The new field of space architecture*. Howe, A. Scott, y Brent Sherwood, 205-228. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.

Woodward Moncho, Marta. «La Cabaña. Un espacio mínimo para habitar». Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de València, 2019.

Yanes, Javier. «Konstantin Tsiolkovsky, de campesino sin estudios a padre de la aeronáutica». *OpenMind BBVA*. 13 de septiembre de 2018. Acceso el 7 de agosto de 2020. <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/konstantin-tsiolkovsky-de-campesino-sin-estudios-a-padre-de-la-astronautica/>.