

**Marte:**  
*Construcción del primer asentamiento humano.*

**Carlos Sirviente Alonso**

exp. 12393

--- ---

Tutor: Jesús Donaire García de Mora

--- ---

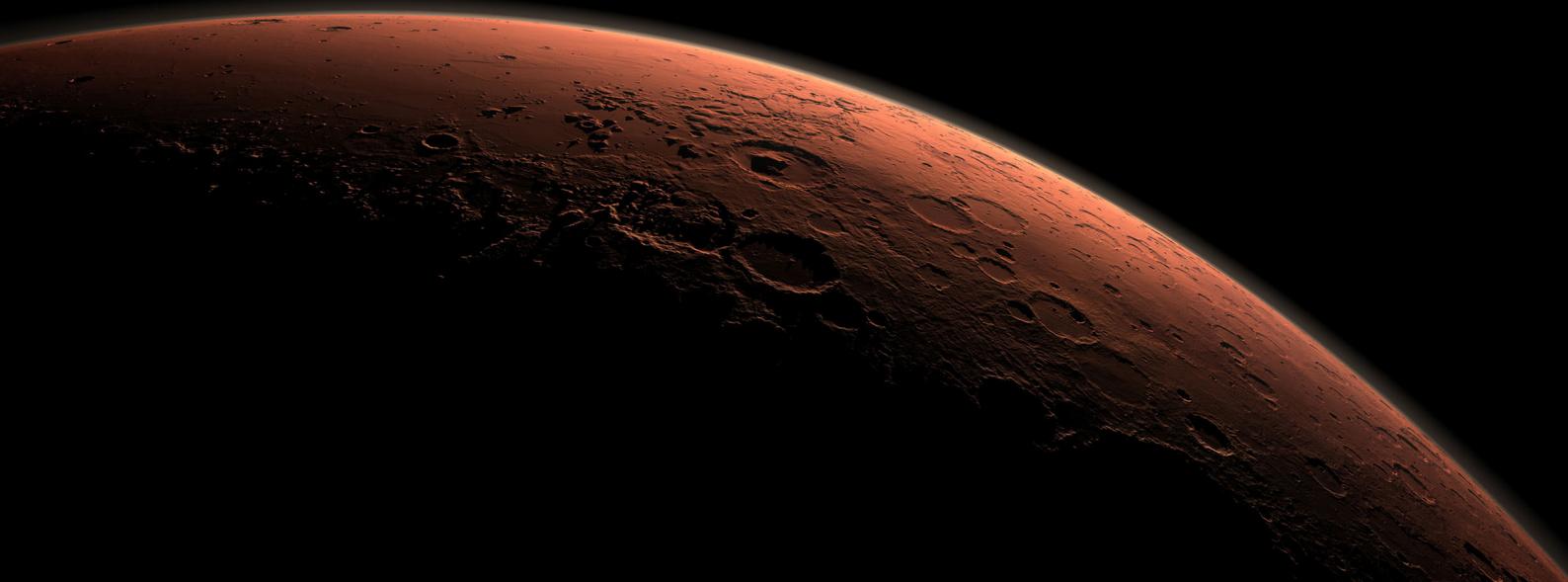
**Aula 2:**

Javier García-Gutiérrez Mosteiro  
Consuelo Acha Román

--- ---

**13.06.2017**

Madrid





«Realmente soy un soñador práctico; mis sueños no son bagatelas en el aire. Lo que yo quiero es convertir mis sueños en realidad»

Mahatma Gandhi



## ABSTRACT

La carrera por habitar Marte no acaba más que de empezar, pero este breve espacio de tiempo ha sido más que suficiente para conocer el escenario donde se vivirá, su problemática y posibles soluciones.

En el presente trabajo se estudia la viabilidad teórica de construir un asentamiento permanente de seres humanos. Dicho asentamiento tendrá lugar en un túnel de lava, donde se creará un espacio completamente hermético del exterior. Dentro, el ambiente de relaciones sociales será lo más equivalente posible al que se da en La Tierra. En la construcción se emplearan materiales manufacturados en el destino, son el hormigón de azufre, el hielo y el plástico. Esto permitirá un abaratamiento de los costes de transporte interplanetarios, así como que propiciará una cierta independencia de Marte con nosotros. El entendimiento de las plantas es crucial tanto a nivel de diseño, como de construcción, como de sustento de la comunidad. Además, como el trabajo se ha desarrollado para la futura hipótesis de una terraformación del planeta, todo el trabajo de investigación referente a los vegetales estará en consonancia con poder habitar al aire libre en un futuro. Durante el apartado de urbanismo se profundizará en la obtención de recursos energéticos, hídricos y en bienestar emocional. El último apartado del trabajo, la arquitectura, se centra principalmente en el estudio de técnicas de construcción modernas, que permitan hacer lo más eficientemente posible todo el conjunto del viaje a Marte.

Todo este esfuerzo se realizará con el objetivo de teorizar sobre si con la tecnología actual se podría o no el Planeta Rojo.



## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

ACS – Agua Caliente Sanitaria.

ARM – Asteroid Redirect Mission.

CAM – Crassulacean Acid Metabolism.

CEO – Chief Executive Officer.

EEUU – Estados Unidos de América.

ESA – European Space Agency.

HAB – abreviatura de HABitation en inglés.

IBt – Instituto de Biotecnología.

ISS – International Space Station.

LED – Light-Emitting Diode.

LSS – Life Support System.

MRO – Mars Reconnaissance Orbiter

NASA – National Aeronautics and Space Administration.

NIAC – NASA Institute for Advance Concepts.

ONU – Organización de las Naciones Unidas.

PHB – Polihidroxibutirato.

SSL – Sinterizado Selectivo por Láser.

UE – Unión Europea

UNAM – Universidad Nacional Autónoma de México.

URSS – Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

UVA – Rayos Ultravioleta A.

UVB – Rayos Ultravioleta B.



# Índice

## **Primera parte**

<b>1. Introducción.</b>	
1.1. Antecedentes históricos de las colonias: Nuevos horizontes.	11
1.2. Horizontes modernos: la conquista del espacio.	13
1.3. Estado actual de la cuestión: Creación de la Apoikia.	16
<b>2. Objetivos del trabajo: Un paso más cerca.</b>	18

## **Segunda parte**

3. El Planeta Rojo: el entorno más hostil.	21
4. Terraformación: paso de lo extremo a lo habitable.	27
5. Futuras ciudades: análisis de los requisitos básicos de cualquier asentamiento en Marte.	28
6. Propuestas actuales: estructuras que permitan la vida.	31
7. Requerimientos agronómicos de un asentamiento.	
a. Finalidad de los cultivos.	36
b. Metodología de cultivo.	39
c. Especificaciones constructivas.	45
8. Localización y desarrollo urbanístico.	
a. Implantación geográfica.	47
b. Recursos y su integración en la ciudad.	53
c. Estructura y crecimiento de la ciudad.	57
9. Soluciones arquitectónicas.	
a. Materiales de construcción.	63
b. Criterios de diseño de los espacios.	66
c. Análisis de las fases constructivas.	68

## **Tercera parte**

10. Conclusiones del trabajo.	75
<b>11. Bibliografía.</b>	
11.1. Bibliografía citada.	79
11.2. Bibliografía consultada.	80
11.3. Recursos digitales.	80
11.4. Ponencias.	82



## **PRIMERA PARTE**



### ***1.1. Antecedentes históricos de las colonias: Nuevos horizontes***

La historia del mundo está plagada de migraciones, movimientos masivos de seres humanos de un lugar a otro completamente desconocido, lleno de incógnitas, pero también lleno de esperanza. Numerosas han sido las expediciones que han llevado a grandes hombres a expandir los límites del mundo conocido, motivadas en muchos casos por el simple deseo de encontrar rutas alternativas, de explorar y conocer esas tierras lejanas desde las que llegan historias de guerreros invictos, imperios cuya extensión es infinita y polvos mágicos capaces de reducir ciudades enteras a escombros en cuestión de minutos. Si buscásemos el origen de las primeras migraciones organizadas, entendiendo como tales migraciones de pueblos enteros que buscan un futuro más próspero, pero donde no se pretende alterar la esencia de dicho pueblo, deberíamos remontarnos hasta el siglo VII a. C.

Durante lo que se conoce como edad media helénica se formaron las primeras *poleis*, unas verdaderas ciudades-estado que jamás llegaron a fusionarse en una nación y mantuvieron siempre su identidad propia. La diáspora griega fue el resultado de una gran fuga, los habitantes huían para poder sobrevivir, no partían para poder fundar colonias y expandir su territorio como otrora hicieron los mismos aqueos y dorios. Las llegadas de los pueblos indoeuropeos y la superpoblación provocó que los pelasgos (verdaderos autóctonos de Grecia) abandonasen sus ciudades originales y buscasen refugio en los archipiélagos aledaños. Aunque el tiempo ha acabado denominando griegos a todos y con ello nos ha llegado esta idea errónea de que las *poleis* han sido la primera forma de colonización de la historia, la realidad es bien diferente. De hecho, “colonia” en griego se dice *apoikia*, que significa literalmente “casa afuera”. Esta palabra, en sí misma, excluye toda intención de conquista y toda reticencia imperialista<sup>1</sup>.

Si algo demuestra que las nuevas *poleis* no eran ningún tipo de colonialismo primitivo es la enorme independencia política que tenían de su “alma máter”. No existía ningún tipo de servidumbre ni política ni económica, llegando incluso a producirse guerras entre la ciudad fundadora y la ciudad fundada. Tal fue el caso de Corinto y Corfú, por ejemplo. Esto no quiere decir que no se produjesen intercambios comerciales entre las ciudades-estado, ya que a diferencia de las ciudades sumerias, las griegas, en muchos casos, se especializaban en determinados productos o servicios que luego vendían o prestaban a otra ciudad. Como ejemplo de ello tenemos el caso ateniense, donde con el objetivo de propiciarse una hegemonía marítima, puso su industria naval al servicio de los comerciantes de todas las demás ciudades, constituyéndose como capital helénica de los astilleros.

Avanzando en la historia encontramos numerosos casos de civilizaciones que se expandieron y diseminaron a lo largo del globo, dando lugar en el futuro a nuevos estados: Castilla y el continente americano, las Trece Colonias británicas de Norteamérica, y Portugal y sus colonias de ultramar son, en contraposición a los

<sup>1</sup> Citado en *Storia del Greci*, de Indro Montanelli, Rizzoli editore, Milán, 1959.

griegos, claros ejemplos de colonialismo tal y como lo entendemos en nuestra era. Al igual que en las ciudades-estado, entre los nuevos territorios habitados y su alma máter en el viejo continente, se establecían relaciones económicas, pero nunca en calidad de igualdad, sino que siempre existía una subyugación tanto política como comercial entre las colonias y la metrópoli. Hasta tal punto que todas las decisiones de calado que afectasen a los territorios colonizados debían de pasar por instituciones en Europa, así como que cualquier ínfula de autodeterminación y escisión eran rápidamente sofocadas, con el objetivo de mantener el control.

## 1.2. Horizontes modernos: la conquista del espacio

Es legítimo pensar que, a pesar de los intereses coloniales de las grandes potencias europeas en el continente americano, la mecha que prendió el fervor por lanzarse al mar y establecer nuevas colonias fue la curiosidad de un grupo de hombres que emprendieron la empresa de expandir su mundo. En el año 1492, el “mundo” se reducía a la cuenca del Mediterráneo, Oriente próximo, las Indias y los reinos del entorno de China y Japón. Por lo que toda nueva ruta que comunicase dichos focos sería, a su vez, un medio de aumentar e investigar nuevos entornos, animales, plantas e incluso culturas. De la misma manera que el ser humano era curioso en el siglo XV lo es en la actualidad. La diferencia ahora estriba en que la meta ya no es tanto conocer nuestro planeta, como lanzarnos a conocer lo que le rodea.

Podríamos argumentar que la razón por la cual el ser humano ha fijado su vista en el espacio es únicamente la inquietud científica de esclarecer si verdaderamente estamos solos en el universo o si por el contrario, al igual que Colón se encontró con los aborígenes cuando llegó al nuevo continente, nosotros nos encontraremos con alguna otra forma de vida inteligente en nuestro viaje más allá de la atmósfera. No obstante, pecaríamos de inocentes, puesto que la verdadera motivación de una aventura tal como la que resultó en el descubrimiento de América no fue otra que la de establecer una ruta comercial nueva con las indias sin tener que utilizar ninguna de las ya establecidas y controladas por otras potencias que no eran Castilla. Encontramos la historia de la humanidad llena de ejemplos donde el conocimiento fue un resultado colateral de empresas tremadamente ambiciosas. Por citar un ejemplo más reciente, encontraríamos el Apolo 11. La tensión existente entre las grandes potencias del momento, EEUU y la URSS, encontró su máxima expresión en la carrera espacial, donde la rivalidad, y nada más, entre ambas naciones resultó en la llegada del hombre a la Luna en Julio de 1969 y la enunciación de la célebre frase «un pequeño paso para un hombre, un gran salto para la humanidad»... Si tuviésemos que encontrar una razón al por qué hoy en día las agencias espaciales de numerosos países se han marcado como objetivo llevar al ser humano a Marte, podríamos decir que es la ambición o la competitividad. Sin embargo, estaríamos nuevamente errados en nuestro diagnóstico, pues la situación actual es bien diferente a la que se vivía en los años sesenta y la que se vivió en su momento con los Reyes Católicos. El cambio acontecido entre entonces y hoy no es tanto un cambio material, como de mentalidad. Si el siglo XVIII fue identificado como el siglo del progreso científico, podríamos decir que lo que identifica el nuestro es la concienciación ambiental: vivimos la era de la sostenibilidad y la ecología. El siglo XVIII no solo se conoce como el siglo de la revolución industrial, sino que también recibe el nombre de Siglo de las Luces, como consecuencia de la gran revolución que se produjo en la sociedad. Uno de los mayores exponentes de este cambio social decía que hay que admitir que el mal está sobre la tierra<sup>2</sup>, y en opinión de muchos hombres ilustres actuales, este filósofo no pudo estar más acertado

<sup>2</sup> Citado en *Poema sobre el desastre de Lisboa*, Voltaire, 1756.

literalmente, pues es en el hombre donde encontramos el origen de la patología que sufre La Tierra.

El inicio del siglo XXI ha traído de la mano una visión crítica del entorno, donde se ha puesto de manifiesto que como resultado del progreso hemos estado castigando el planeta. La extracción descontrolada de combustibles fósiles, la emisión constante de gases nocivos como el dióxido de carbono o el metano, el fumigado de los campos con productos químicos o la tala masiva de bosques no nos ha conducido a otra cosa más que al deterioro de nuestro ecosistema y nuestra salud. Es por ello que desde finales del siglo pasado se han ido firmando acuerdos mundiales de no emisión de gases efecto invernadero, reducción del uso de aerosoles, reducción también del vertido de metales pesados en el océano y demás actuaciones, todas en pro de la mejora del estado de salud del planeta. El planeta que nos acoge, tiene entre sus muchas virtudes la de adaptarse a las nuevas condiciones que se le presentan, como sucedió hace millones de años y como sucede hoy en día. Sin embargo entre dichas virtudes no se cuenta la de asimilar dichos cambios a una gran velocidad, sino todo lo contrario. Toda esta serie de tratados y protocolos de actuación con respecto al medio ambiente han tenido efecto, pues por ejemplo, el agujero de la Capa de Ozono se está cerrando lentamente. A pesar de ello, instituciones tan relevantes como la Organización Meteorológica Mundial avalan estudios que demuestran la insuficiencia de estas medidas a la hora de paliar el problema a tiempo. Ya que como indican recientes estudios elaborados por esta agencia, la temperatura del planeta (directamente relacionada con el efecto invernadero) continua en aumento, sin haberse percibido una ralentización de dicha subida de los termómetros. Las consecuencias de esta situación en la que nos encontramos son tremendas, pues según las previsiones de crecimiento de la población humana en el año 2015 hechas por la ONU, para el año 2050 la población mundial habrá pasado de los 7.300 millones actuales a la apabullante cifra de 9.700 millones<sup>3</sup>, lo que se traduce en un aumento exponencial de la demanda de recursos naturales y de la presión que ejercemos sobre el medio ambiente. Para dar un orden de magnitud, numerosos científicos han cifrado esta demanda para mediados de siglo en la destrucción de un 20% de los hábitats naturales que todavía no se han alterado. Por tanto, no es tan descabellado pensar que, al igual que los pelasgos y aqueos tuvieron que fundar nuevas ciudades para poder solucionar los problemas que les acaecían, en la actualidad hayan surgido voces, como la de Elon Musk, dando como solución al problema de La Tierra la creación de una colonia humana en algún otro planeta. Con el paso de los años parece que esa nueva *apoikia* está más cerca, concretamente a 59 millones de kilómetros, en un planeta de nuestro sistema solar dentro de la zona habitable de nuestra estrella, llamado Marte.

La siguiente pregunta que nos podría surgir es, sin ir más lejos, la de ¿por qué Marte?, ¿qué hace de nuestro hermano Rojo un objetivo deseable? Haciendo nuestras las palabras del CEO de SpaceX<sup>4</sup>, responderíamos a ambas diciendo que es la única opción lógica. Si el deseo fuese el de viajar a cualquiera de los planetas del sistema solar, este sería perfectamente alcanzable, pero si nuestro interés está en habitar ese planeta entonces las posibilidades se reducen drásticamente. Una de las razones principales es la temperatura. Los seres humanos no podrían habitar la gran mayoría

<sup>3</sup> *World Population Prospects: The 2015 Revision*, publicado por la ONU, Nueva York, 2015.

<sup>4</sup> Extraído de la *67th International Astronautical Congress*, intervención de Elon Musk, 2016.

del sistema solar, pues es demasiado frío, ya que están demasiado lejos del sol. De esta manera, quedarían descartados todos los planetas desde Júpiter hacia el exterior de nuestro sistema. Por el otro lado nos quedaríamos con Mercurio y Venus. El primero quedaría descartado por las mismas razones por las que descartábamos los anteriores planetas, la temperatura. La proximidad de Mercurio al Sol hacen de éste un horno constante donde la vida duraría minutos, puesto que la temperatura media del planeta durante el día es de 350 °C. El segundo, el planeta Venus, no tiene nada que ver con la diosa, pues su densa atmósfera convierte el planeta en una olla a presión. Si Mercurio era un horno, Venus es como el centro de La Tierra. La atmósfera del segundo planeta del sistema solar, compuesta en un 96% de dióxido de carbono, hace que la temperatura media en la superficie del planeta sea de 460 °C, alcanzando un máximo de 500°C. Estas altas temperaturas, unidas a que la presión atmosférica a nivel de la superficie es 90 veces mayor que la que encontramos a nivel del mar en nuestras costas, hacen de Venus un entorno completamente inalcanzable, a pesar de su proximidad. Por tanto, no nos quedan más que dos opciones, La Luna o Marte. Nuestro satélite no podría considerarse como la opción más óptima, puesto que allí el día dura unos 28 días y la noche otros tantos. Esto desembocaría en una alteración drástica de los ritmos de vida humanos, que acabaría por producir desequilibrios del sueño, y demás trastornos para la salud. La atmósfera lunar es inexistente, su tamaño es muy reducido en comparación con la tierra, lo que también produciría en los cuerpos humanos una serie de patologías relacionadas con la gravedad y la presión atmosférica. Por último, solo quedaría apuntar la escasez de recursos lunares, pues todo nuevo asentamiento necesitaría de recursos propios y no depender del comercio con La Tierra.

Por tanto, Marte es la única solución a esta operación de selección, puesto que su atmósfera, aunque no respirable para los seres humanos, sí podría albergar vida vegetal, porque las diferencias de temperatura con los ambientes más extremos habitados por los hombres en La Tierra no son tan grandes, y la presión atmosférica no es ni de lejos tan extremadamente distinta a la nuestra. Un día marciano consta de 24 horas y media, lo cual no alteraría nuestros ritmos de vida, y la gravedad es de casi 0,4 g, entorno a la cual nuestro cuerpo todavía podría adaptarse con relativa facilidad. Hace también de Marte una opción viable el hecho de que es un planeta rico en recursos, sobre todo en hierro y sílice, dos de los elementos en los que se ha basado el progreso humano.

### *1.3. Estado actual de la cuestión: Creación de la Apoikia*

Actualmente existen diversas instituciones, tanto públicas como privadas, que han desvelado sus intenciones de llegar a Marte en el futuro. Entre ellas se cuentan SpaceX, NASA, ESA, Mars Society o Mars One, por ejemplo. Cada una tiene su propio plan para lograr sus objetivos, no obstante cabe resaltar que las metas de cada una son bien diferentes. Así, SpaceX y La Mars Society abogan por un establecimiento rápido de la vida humana allí, finalizando en la terraformación del planeta. Sin embargo, otras, como la NASA y la ESA, son más conservadoras por el momento, pues plantean unas metas menos ambiciosas a corto plazo, más interesadas por la investigación en sí que por el llegar y vivir. Todas ellas coinciden en varios aspectos: uno de ellos es una progresión escalonada de la misión y otro es el testado de la tecnología con “viajes menores”, para establecer si es seguro o no mandar seres humanos sin que sufran ningún daño.

En una primera etapa tenemos lo que la NASA denomina como “*Three Phases on Our Journey to Mars*”<sup>5</sup>, donde se definen los retos anteriores a la estancia de seres humanos continuada en el planeta. Estas tres fases se denominan *Earth Reliant*, *Proving Ground* y *Earth Independent*. La primera, donde se encuentra ahora la agencia, se caracteriza por la investigación a bordo de la ISS, en la que no solo se estudia tecnología que permita misiones de larga duración en el espacio exterior, sino que también se estudia cómo responde el cuerpo humano en dichas misiones. La segunda fase se basa en traspasar la frontera lunar, donde se validara todo lo anteriormente investigado en la primera fase. Durante esta fase se plantea el redireccionaldo de un asteroide cercano a La Tierra, para ponerlo en órbita alrededor de La Luna en lo que llaman *Lunar Distant Retrograde Orbit*. El objetivo de la ARM no es otro que el de entender los condicionantes del espacio exterior y probar un nuevo sistema de propulsión (*Solar Electric Propulsion*) capaz de transportar cargas de gran masa sin el empleo de combustibles químicos. En la tercera y última fase el objetivo es llegar a Marte y sus satélites para poder establecer allí hábitats de tránsito, en los cuales se pueda estudiar a fondo el entorno y los recursos existentes, así como levantar un sistema de comunicación eficiente. Esta última fase, aún siendo la conclusión del *Journey to Mars*, no es sino el principio del establecimiento de una colonia.

En una segunda etapa, todos los planes para poder crear una ciudad marciana habitada de forma permanente también pasa por tres fases. El primer estadio lo podríamos denominar *Martian Outpost* y en él se enmarcan misiones temporales de trabajo e investigación. Es decir, la última fase anteriormente explicada sería el primer paso de cara a la creación de una comunidad. La segunda fase es lo que se podría llamar *Relay Settlement*, una especie de comunidad semipermanente, donde se van relevando los astronautas y en donde se emplazarían labores de construcción de todos los

<sup>5</sup> Extraido de *NASA's Journey to Mars: Pioneering Next Steps in Space Exploration*, NASA, Octubre 2015.

sistemas necesarios para una vida permanente, tales como la creación de grandes cámaras de cultivo capaces de sustentar la vida que se desarrollase en dicha ciudad, el establecimiento de sistemas a gran escala de purificado del aire y extracción de agua, el emplazamiento de las centrales de suministro eléctrico que abastezcan la ciudad, el establecimiento de una lanzadera para futuros viajes e intercambios con La Tierra y demás requisitos indispensables para una ciudad. En la tercera fase, que podríamos denominar *Martian Apoikia*, se daría *de facto* la constitución de la *Polis*, de forma que esta comunidad basada en los relevos podría desarrollar una vida sin depender en ningún aspecto de La Tierra para su sustentación, pues como hemos ido avanzando, sería perfectamente capaz por si misma de proporcionarse, no solo energía, alimento, agua y aire, sino también de manufacturar sus propios recursos, y por tanto no depender de las continuas remesas de materiales llegadas desde el Planeta Azul. Es aquí donde los planes de determinadas empresas e instituciones no acaban, puesto que sus pretensiones para el planeta en un futuro son las de ser capaces de vivir en la superficie del mismo sin necesidad de estar confinados en espacios herméticos presurizados y con el aire tratado. Es decir, dichas empresas lo que persiguen es poder vivir al aire libre.

## ***2. Objetivos del trabajo: Un paso más cerca***

Una vez tenemos una visión global de cuáles son los diferentes planes y las fases de las que éstos constan, estamos en disposición de establecer cuál es el objeto de este trabajo.

Enmarcándose dentro de lo que sería la fase *Martian Apoikia*, se pretende analizar los condicionantes, la problemática y posibles soluciones, teniendo como fin último la terraformación. En otras palabras, el presente trabajo persigue presentar una posible tercera fase, que combinada por otro lado con las labores de terraformación, permitan, en un futuro, la vida de los seres humanos en la corteza marciana.

El análisis de la problemática pasará, no solo por el entendimiento del entorno y los retos que éste plantea, sino también por el análisis de las necesidades de una ciudad sostenible y autosuficiente. Se investigaran, por otro lado, diferentes métodos de proporcionar sustento alimenticio (incluyendo agua) y distintos sistemas de obtención de energía para el buen funcionamiento de todos los equipos. También es objeto de este trabajo el hacer un análisis de los desafíos arquitectónicos y urbanísticos más inmediatos que dicha comunidad tendrá que afrontar, lo que es inalienable del estudio y comprensión de los recursos allí existentes para su uso en la construcción, y el entendimiento de la topografía del planeta. Como resultado de la convivencia de un grupo reducido de personas en un ambiente aislado, se prestará especial atención al impacto que sobre la estabilidad emocional produce un adecuado uso de los vegetales en la arquitectura. La meta será poder afirmar al término de esta investigación con una gran seguridad que es posible habitar Marte con la tecnología actual y un poco de trabajo en la economización de costes y optimización de los equipos.

Sin realizar un diseño exacto de una comunidad, se aportará como resultado de esta investigación una relación de criterios a tener en cuenta para la creación de una comunidad humana permanente en Marte. Se emplearán ayudas gráficas que reflejen de manera clara los resultados de los análisis críticos realizados.

## SEGUNDA PARTE



### 3. El Planeta Rojo: El entorno más hostil.

Anteriormente se ha apuntado a Marte como el único cuerpo celeste de nuestro sistema solar que podría albergar vida, no obstante, es uno de los ambientes más radicales y drásticos conocidos por el hombre. Por el momento, toda la información del planeta de la que se dispone a día de hoy se basa en datos recogidos por satélites que constantemente orbitan alrededor del mismo, como la *Mars Reconnaissance Orbiter*. Otra de las fuentes de conocimiento científico sobre Marte son los *rovers* que aterrizaron en su superficie y que tras varios años han ido recorriendo grandes extensiones del planeta. El más moderno de entre dichos rovers es el *Opportunity*. Gracias a todas las misiones espaciales que se han llevado a cabo, los satélites, las sondas y los *rovers*, hemos podido conocer elementos clave del planeta de cara a un futuro asentamiento humano.

La zona de habitabilidad de una estrella es definida por la NASA como la zona alrededor de la misma donde potencialmente podríamos encontrar agua líquida, un ingrediente esencial para la vida tal y como la conocemos<sup>6</sup>. Es esta razón por lo que desde hace unas décadas se ha puesto especial atención en encontrar agua en Marte, planeta que se encuentra dentro de la zona habitable del Sol y cuya superficie, sin embargo, no muestra signos de dicha presencia.

Las numerosas mediciones térmicas que se han llevado a cabo en el planeta han constatado que la temperatura media se encuentra entorno a los -63°C, mientras que en nuestro planeta obtenemos una media de 14°C. Sin embargo, así como aquí encontramos unas temperaturas máximas y mínimas de 58°C y -88°C, allí estas se transforman en 30°C y -140°C, respectivamente. La gran parte del planeta se encuentra por lo tanto a temperaturas inferiores al punto de fusión del agua, razón que llevaba a los científicos a buscar hielo en la superficie y el subsuelo marciano.

Recientemente se ha evidenciado la presencia de agua en Marte, primero se encontró hielo<sup>7</sup> y, por último, en septiembre de 2015 la NASA confirmó la existencia de escorrentías de agua líquida<sup>8</sup>. El hielo principalmente se encuentra en el subsuelo, aunque es cierto que existe una cierta cantidad de hielo en la superficie, pero comparativamente es bastante inferior a la encerrada bajo tierra. La explicación que dan los científicos a la presencia de hielo subterráneo es la de que Marte en su origen fue un lugar como La Tierra, un planeta con océanos, mares y ríos, y que debido al transcurso de los milenios y al enfriamiento del corazón del planeta, este agua se congeló y se fue cubriendo progresivamente. Esta teoría, junto con la existencia de

<sup>6</sup> «A habitable zone [...] is defined as the region around a star where liquid water, an essential ingredient for life as we know it, could potentially be present» - *NASA's Definition of a Star's Habitable Zone*

<sup>7</sup> Véase apartado de recursos digitales en la bibliografía.

<sup>8</sup> Véase *NASA confirms evidence that liquid water flows on today's Mars*.

túneles de lava, ha llevado a diversos científicos y astrofísicos a defender la posibilidad de que parte del agua, que en su momento fue líquida, estuviese confinada dentro de estos túneles. Para que nos podamos hacer una idea de la gran cantidad de agua helada que hay en Marte, la NASA hizo público el hallazgo de un depósito de agua congelada subterránea con un tamaño superior en extensión al estado de Nuevo México (31.5194 km<sup>2</sup>), siendo éste el depósito más grande encontrado en el planeta, pero no el último que se encontrará, según apunta la agencia.

Saliendo del subsuelo encontramos agua líquida, como ya habíamos adelantado, pero en circunstancias muy concretas. Usando un espectrómetro de imágenes, se han encontrado evidencias de minerales hidratados en la superficie. Estas vetas oscuras, como las define la agencia americana, aparecen en temporadas cálidas del año y en zonas con una presencia alta de sales. Las sales hacen que el punto de fusión del agua baje considerablemente y así se puedan dar estos flujos de agua superficial. A pesar de ser una importante noticia, la cantidad de vetas de agua superficiales es tan reducida y tan limitada en el tiempo que, tal y como apuntan los expertos, no sería suficiente para el sustento de la vida.

Una de las razones de por qué en Marte no encontramos, no solo agua líquida sino cualquier otro elemento líquido, es la baja presión atmosférica. La atmósfera marciana es 100 veces más liviana que la terrestre, lo que hace que cualquier sustancia de la corteza pase de sólido a gas sin el tramo intermedio del estado líquido.

La presión atmosférica no solo es altamente influyente en lo relativo a la física de los elementos sino que también es un factor determinante para la vida. Si tomamos como referencia nuestro planeta, observaremos que de forma natural no existe vida por encima de los 5.000 metros de altitud aproximadamente, debido a la baja presión que dificulta nuestras funciones vitales. Esto no quiere decir que no se pueda mantener un ser vivo por encima de esa altitud, sino que de manera natural y por sus propios medios, este ser no sobreviviría. En nuestro planeta observamos que a nivel del mar la presión atmosférica es de 1.013 hPa. Con la altura la presión disminuye considerablemente, a 5.000 metros, donde ya no se producía la vida, tenemos por ejemplo una presión de 539,93 hPa. Cuando hacemos estas mediciones en Marte nos damos cuenta de la espectacular diferencia de escalas: allí la presión media registrada es de 6-7 hPa, con una mínima en el punto más alto de 0,3 hPa y una máxima de 11,6 hPa en las profundidades de Hellas Planitia<sup>9</sup>.

En consecuencia, podríamos decir que la presión atmosférica y la temperatura son los principales causantes de la falta de vida en el planeta y no estaríamos muy desencaminados. Sin embargo, existen muchos otros factores que dificultan la vida. Uno de ellos, también derivado de la atmósfera, es la entrada de radiación en el planeta. La composición de la atmósfera marciana es en un 96% dióxido de carbono, gas de efecto invernadero que no impide la entrada de radiación. En La Tierra, sin embargo, la gran cantidad de oxígeno presente en la atmósfera, combinado en forma de ozono, es la responsable de que radiaciones como la UVA y la UVB no alcancen su superficie en cantidades perjudiciales para la vida.

<sup>9</sup> Hellas Planitia, es una llanura localizada en el hemisferio sur del planeta Marte, consistente en un gran cráter de impacto, con un diámetro de unos 2.300 km es el más grande y también la zona de mayor profundidad del planeta.

Todo planeta está expuesto a tres tipos diferentes de radiación. La primera denominada radiación cósmica se produce en los núcleos activos de galaxias como Centauro. En nuestro planeta la ionosfera es la encargada de frenar este tipo de radiación. Esta parte de la atmósfera, compuesta por gases ionizados, absorbe las longitudes de ondas más bajas. El segundo tipo de radiación se denomina viento solar, una radiación derivada de la heliosfera y que se basa en la expulsión a grandes velocidades de partículas subatómicas. La “atmosfera gaseosa” de ningún planeta es capaz de frenar el viento solar, pero sin embargo, en La Tierra existe un mecanismo de defensa denominado magnetosfera. Esta capa de atmósfera, inmediatamente consecutiva a la ionosfera, es un campo magnético que envuelve al planeta y que es producido por su núcleo líquido y ferroso. Por último, nos queda hablar de la radiación proveniente de las erupciones solares, también contenida por la magnetosfera. Las fulguraciones solares son la liberación súbita e intensa de radiación electromagnética, que comparadas en fuerza a una bomba de hidrógeno, aceleran las partículas como los protones a velocidades similares a las de la luz, provocando una devastación muchísimo más violenta que el viento solar. Como comentábamos anteriormente, en Marte, la atmósfera no es capaz de frenar la radiación cósmica, y el hecho de tener un núcleo sólido y frío hace que carezca de una geodinamo capaz de contrarrestar el viento y las erupciones solares.

Es deducible, por tanto, que la atmósfera de un planeta juega un papel crucial en la generación de vida y su permanencia en el tiempo, no solo por la defensa natural ante la radiación y por la presión, sino porque también es la responsable de la minimización de los impactos por meteoritos. La altas temperaturas de la termosfera, junto con el roce de los meteoritos con las partículas de gas presentes en la atmósfera, hacen que desciendan las probabilidades de su impacto en la superficie, o que éste nunca llegue a producirse. Es por tanto lógico que a mayor densidad de la atmósfera, menor será el riesgo de impacto y el consecuente daño. Sin embargo, como antes comentábamos, el liviano “escudo protector” marciano no es capaz de frenar la gran mayoría de cuerpos que se le aproximan.

Muchos de los problemas que plantearía Marte se ven agudizados agravados por la gravedad. En el Planeta Rojo la gravedad es casi un 60% menor que en La Tierra, lo que implica que allí para contrarrestar un esfuerzo “x” (como bien puede la sobrepresión interior de los espacios habitables) con simplemente el peso propio de un elemento (los muros que encierran dicho espacio, por ejemplo), necesitaríamos casi 4 veces más peso que aquí. Las consecuencias de esto son también muy transversales si tenemos en cuenta los planes futuros que se tienen para ese planeta, ya que por ejemplo un árbol que en La Tierra se desarrollase hasta alcanzar los 30 metros, en Marte crecería hasta alcanzar un tamaño 3,8 veces superior, por el simple hecho de que durante años este árbol se adaptó a una fuerza de 1g, y, de repente, se ve tan solo sometido a 0,38g. Estas consideraciones de la gravedad y el peso propio de los elementos y materiales cobrarán especial importancia cuando se desarrolle el tema de la construcción en Marte.

El ejemplo del árbol no es un ejemplo cualquiera, ya que como se viene comentando, en la superficie marciana no se dan las condiciones necesarias para la vida. No obstante, gracias a la tecnología de la cual disponemos hoy en día, está al alcance de nuestra mano adaptar el entorno para la vida. Estudios de la Universidad de

Wageningen han demostrado que el sustrato en Marte no dista mucho de ser apto para el óptimo desarrollo de vegetales<sup>10</sup>. Estos trabajos demuestran que los cultivos en Marte podrían desarrollarse más fácilmente de lo que hasta ahora se pensaba, y lo que es más, sin riesgo alguno para su consumo por el ser humano, ya que los análisis realizados a los vegetales cultivados demostraban que la cantidad de metales pesados y demás elementos potencialmente dañinos para el hombre se encontraban bajo los límites exigidos en nuestro propio planeta. Es cierto, sin embargo, que aunque el sustrato presente los nutrientes necesarios para el cultivo, estos no se reparten por el planeta de manera uniforme. Al igual que ocurre en La Tierra, los nutrientes tienen un reparto bastante desigual por toda la superficie, y dependiendo del lugar donde los futuros habitantes establezcan el asentamiento, sería necesario el uso de fertilizantes, tal y como apunta la NASA.

Tanto las agencias espaciales como los diferentes entes colaboradores de éstas coinciden en apuntar que, de cara al establecimiento de los seres humanos en Marte, los cultivos tendrán una relevancia capital en lo que respecta al sustento de la comunidad. Por ello, a día de hoy se realizan diversos experimentos testando distintos vegetales y observando su desarrollo. Como resultado de los experimentos con 10 vegetales comestibles diferentes, el equipo del exobiólogo Wieger Wamelik determinó que el potencial de cultivo del sustrato marciano es levemente inferior al terrestre. En sus trabajos se estuvieron analizando espinacas, tomates, quínoa y rábanos, entre otros. En la actualidad se continúan los trabajos con las plantas anteriores y además se ha extendido el estudio a otras especies vegetales comestibles con el objetivo de determinar cuáles son más adecuadas para el cultivo en Marte.

Es necesario apuntar que todas las diferentes instituciones que trabajan en este ámbito tienen presente que, por el momento, a pesar de que el sustrato permite el cultivo, el resto del ambiente no. La presión atmosférica y los cambios tan drásticos de temperatura impedirían que cualquier vegetal pudiese desarrollarse. Primeramente, porque el agua contenida en ellos se sublimaría. Este es el motivo por el que equipos de investigación como los de las doctoras Wendy Boss y Amy Grunden trabajan en la vía de la ingeniería genética. El equipo de la universidad de Carolina del Norte, esponsorizado por el NIAC, ha conseguido por el momento modificar plantas de tabaco para que éstas, de manera natural, puedan deshacerse de las partículas tóxicas de oxígeno generadas naturalmente por un organismo en situaciones de estrés<sup>11</sup>. Una vez lograda esta meta, el equipo se ha puesto a trabajar para modificar la misma planta con genes de organismos terrestres capaces de resistir temperaturas de -40°C<sup>12</sup>, para poder así conseguir que en un futuro, las plantas que se exportasen a Marte pudiesen sobrevivir en el exterior. Como es de esperar, no solo las doctoras Boss y Grunden trabajan en el campo del diseño genético, ya que en la Universidad de Illinois el profesor Stephen Long ha conseguido modificar la estructura genética de manera que las plantas de tabaco, objeto del estudio, aprovechen un 20% más la energía que les llega del sol, disparando consecuente el rendimiento de dicho cultivo<sup>13</sup>. Los avances del

<sup>10</sup> Véase *4 Crops grown on martian soil are edible*, Universidad de Wageningen.

<sup>11</sup> Véase *Designer Plants on Mars*, NASA

<sup>12</sup> El oso de mar es un animal microscópico que es capaz de resistir temperaturas desde los -200°C hasta los 100°C, de hecho en 2011 la NASA lanzó al espacio exterior este animal y regresó en perfectas condiciones.

<sup>13</sup> Véase las entradas de la universidad de Northumbria en la bibliografía.

profesor Long, unidos a los que hace la Universidad de Wageningen en el proyecto *EDEN ISS*<sup>14</sup> permitirían cultivar en ambientes controlados de la comunidad humana marciana, de una manera mucho más eficiente de lo que podríamos lograr en La Tierra.

Llegados a este punto, parece que actualmente cualquier planteamiento de habitar Marte pasa necesariamente por la manipulación del entorno. Parece darse a entender que el planeta no tiene nada que ofrecer más allá del frío, la baja presión y la radiación. Esto es sin embargo falso. De hecho, en lo relativo a la construcción de un asentamiento, la mayoría de las hipótesis hasta ahora planteadas y factibles pasan por el empleo de la mayor cantidad de recursos existentes en la superficie. Marte tiene muchas cosas que ofrecer y entre ellas encontramos, por ejemplo, el azufre. La gran mayoría de su superficie está compuesta por sulfatos y demás combinaciones sulfúricas. Este elemento, que a priori no parece aportar mucho, cobra una relevancia transcendental cuando se tiene en cuenta la imposibilidad de construir con procesos que impliquen agua. En casi el 90% de los trabajos de construcción, incluso desde sus inicios, el hombre ha empleado agua en algún punto del proceso. Desde los antiguos dorios, de los que se hablaba al inicio del trabajo, hasta hoy, el agua siempre ha sido un recurso abundante y constante. Por el contrario, en Marte esto no es así. Allí, el agua debe reservarse de manera preferencial para el consumo humano y el cultivo, de forma secundaria, como se verá más adelante, para la protección frente a la radiación y para la climatización de los espacios habitables, y por último, podría emplearse en pequeños procesos industriales. Desde el siglo XX se ha venido empleando como método de construcción preferente el hormigón, llegándose a no entender a día de hoy una construcción permanente y resistente sin este elemento. Podría argumentarse que también se ha empleado el acero<sup>15</sup> de forma muy extensa en la historia del hombre, y no se está errado al hacer esta aseveración, pero los enormes costes que implica transportar las cantidades de acero necesarias para la construcción de una ciudad hacen que se vuelva irreal completamente su empleo en Marte. Es en este momento donde profesionales como la doctora Lin Wan recurren al azufre para encontrar un método de construcción barato y sencillo. El equipo de Wan se ha dedicado al estudio del hormigón de azufre<sup>16</sup> como material de construcción *in situ* en Marte<sup>17</sup>, ya que el planeta ofrece grandes cantidades de azufre en muy diversas combinaciones y, muchas de ellas, de fácil refinado. Esto, unido a que el punto de fusión de este elemento no supera los 300°C (mientras que en la obtención del cemento en La Tierra el proceso requiere de temperaturas cuatro veces mayores) y que su fraguado se realiza de forma mucho más rápida que en el hormigón común, hacen de este material un potencial candidato para futuras construcciones marcianas, máxime cuando comparamos los costes de importar constantemente materiales desde nuestro planeta frente a los costes de montar una refinería de azufre en las cercanías de la colonia.

<sup>14</sup> *EDEN ISS – Proyecto financiado por la UE en el que se estudian la eficiencia (entendiendo como tal el rápido desarrollo de un cultivo para el sustento de una comunidad reducida de seres humanos) de determinados cultivos bajo unas determinadas condiciones como puedan ser la luz solar simulada mediante tecnología LED y demás consideraciones. A finales de 2017 se prevé empiecen los ensayos en la estación Antártica Neumeyer III.*

<sup>15</sup> A pesar de que posteriormente se explica que el planeta es rico en hierro y sílice, el grado de desarrollo de las comunidades marcianas debería ser tan avanzado que no se contempla en la hipótesis de trabajo el uso del acero producido allí.

<sup>16</sup> A partir de este punto, salvo indicación contraria, se está haciendo referencia al hormigón de azufre cuando se hable de hormigón.

<sup>17</sup> Véase *A novel material for in situ construction on Mars*, Lin Wan, publicado por la Universidad de Northwestern, 2016.

Finalmente, queda destacar que la riqueza del planeta no solo radica en los materiales y su posible refinado, ya que, así como el hielo es el mejor aislante frente al viento solar, la topografía y la morfología marciana pueden jugar en favor del bienestar de la sociedad que allí se instaure. Numerosos científicos creen que Marte en su origen fue un planeta similar al nuestro. Prueba de ello son las numerosas formaciones rocosas de origen sedimentario que se encuentran en toda la superficie. Sin embargo, a diferencia de La Tierra, Marte sufrió un proceso radical de enfriamiento, la mayoría de los gases de su atmósfera fueron desapareciendo y el corazón líquido dejó de latir. Paulatinamente el agua fue desapareciendo de la superficie, bien porque se congeló y posteriores capas de regolito<sup>18</sup> sepultaron estas masas de hielo, o bien porque se combinó con otros elementos al evaporarse. Mientras estos cambios se iban sucediendo, todavía se producían grandes movimientos de magma que generaron montañas como el Monte Olimpo, el volcán más grande del sistema solar. Numerosos astrofísicos y estudiosos del planeta, avalados por diversos descubrimientos recientes de las agencias espaciales, apuntan que el posterior impacto de meteoritos en la superficie dio lugar a una serie de cráteres que dan acceso a la enorme red de túneles de lava subterráneos. Desde el descubrimiento de estas estructuras, los científicos apuntan a ellas como potenciales sitios donde establecer las futuras ciudades. Principalmente porque, al igual que cuando el hombre descubrió el fuego una cueva le cobijaba y le protegía de las inclemencias del tiempo, ahora los famosos “*martian skylights*”<sup>19</sup> podrían ofrecernos una protección natural y económica a las adversidades derivadas de la gran incidencia de la radiación. Durante años estuvieron los *skylight* encima de la mesa, pero la demora en la obtención de datos fehacientes sobre su acceso y su interior ha derivado en que se buscasen soluciones superficiales alternativas, como la que propone el estudio Foster & Partners. No obstante, es cierto que con el descubrimiento de hielo bajo la superficie, la teoría de habitar los túneles de lava ha recobrado cada vez más fuerza dentro de la comunidad científica, llegando a contarse nuevamente entre las opciones de habitar más plausibles. La razón de ello es la alta probabilidad de encontrar hielo puro en el interior de los túneles.

Los túneles y los *skylights* no solo son una forma de protegerse frente a la radiación, sino que también son la mejor opción natural de enfrentarse a los cambios de temperatura, ya que la experiencia nos dice que las grandes masas de tierra consiguen una inercia térmica espectacular económicamente muy costosa de obtener de manera artificial en Marte. Si a esto le sumamos las expectativas de que los túneles podrían ser una fuente directa de suministro de agua para la comunidad y que además, tal y como dicta el sentido común, tienen un acceso menos abrupto que los *skylights*, nos encontramos, como bien apuntan algunos, ante las nuevas ciudades marcianas.

<sup>18</sup> Se trata de También se define como regolito la capa continua de material fragmentario, incoherente, producida por impactos meteoríticos, que forma normalmente los depósitos superficiales en planetas, satélites y asteroides donde la atmósfera es delgada o ausente; el ejemplo clásico es el regolito lunar, con varios metros de espesor, con componentes que varían desde bloques de tamaño métrico hasta polvo microscópico y partículas de vidrio.

<sup>19</sup> Un *skylight* es un agujero vertical en el techo de un túnel de lava producido bien por el impacto de un meteorito o bien por el derrumbe a consecuencia del peso propio y la resistencia de la formación.

#### 4. *Terraformación: Paso de lo extremo a lo habitable.*

Alcanzado este punto parece que los planes para Marte están claros. Sin embargo, todas las actuaciones hasta ahora mentadas no son sino la parte más inmediata del proceso de establecer asentamientos humanos. El verdadero reto está en conseguir un futuro donde los seres humanos sean capaces de vivir en la superficie sin tener que recurrir a espacios controlados. Podría parecer ciencia ficción, pero la realidad es que tenemos la tecnología y las pautas necesarias para ello y llevamos cientos de años aplicándolas. A este proceso se le denomina terraformación y consiste principalmente en modificar las características del planeta para hacerlas óptimas para la vida y permitir, posteriormente, su desarrollo a gran escala en el mismo.

El proceso entero consta de diversas partes. La primera de ellas es el calentamiento del planeta. Calentar un planeta es una tarea fácil para el hombre y lo hemos demostrado en el nuestro. Aun así, el reto en Marte consiste en que dicho calentamiento debe producirse de una manera rápida (entendiendo por rápida el transcurso de, al menos, un siglo). La forma menos dañina para los futuros seres humanos se basa en la expulsión de gases de efecto invernadero que no solo provoque un calentamiento, si no que ayude a densificar la atmósfera, para poder alcanzar presiones atmosféricas similares a las terrestres. Cuando se habla de gases de efecto invernadero, automáticamente se piensa en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cuyo potencial es bajo comparado con otros, como los hexafluoruros de sulfuro o los clorfluorocarbonos. Además, recientes estudios como el de la doctora Margarita Marinova<sup>20</sup> apuntan que estos gases pueden ser elaborados en el planeta de una manera económicamente más viable que el CO<sub>2</sub>. De hecho, el proceso más fácil y económico es mojando el sustrato marciano, ya que al contacto con el agua éste reacciona liberando grandes cantidades de este gas. Tal y como apuntan los planes actuales de las entidades interesadas en el proyecto de terraformar Marte, el primer paso consiste en la liberación de estos gases a base de azufre y flúor, de manera que el planeta comience a calentarse hasta que el hielo superficial pase a ser agua líquida, a cuyo paso se iría liberando CO<sub>2</sub>, con lo que se potenciaría el efecto invernadero.

La segunda parte del proceso de terraformación se basa en la incorporación de vida vegetal que transforme el CO<sub>2</sub> en oxígeno (O<sub>2</sub>) paulatinamente. Esta segunda etapa del proceso es la más larga de todas, puesto que hasta que se llegue a poder respirar la atmósfera marciana, es necesario que pasen cientos de años. Pero lo que sí es posible en el transcurso de 100 años es alcanzar una temperatura y presión aceptable, de forma que no nos veamos sometidos a un hermetismo completo para el día a día.

Es necesario hablar de estos planes a largo plazo, puesto que la hipótesis en la cual se enmarca este trabajo está íntimamente ligada al proceso de terraformación. El inicio de la ciudad marciana se corresponde en el tiempo con una terraformación incipiente, permitiéndose en el futuro habitar el exterior.

<sup>20</sup> Estraído del documental *Terraforming Mars*, National Geographic, 2009.

## 5. Las futuras ciudades: análisis de los requisitos básicos de cualquier asentamiento en Marte.

Con el objetivo de entender el funcionamiento propio de una comunidad permanente en Marte, primero hemos de entender cuáles son las necesidades principales que ésta demandaría. Es evidente que nos enfrentamos ante el problema que supone cualquier ciudad planificada, como pueda ser la Nueva Capital de El Cairo, en Egipto, o como fue en su momento Chandigarh, en la India.

El requisito más inmediato es la elección del lugar. En La Tierra esta decisión está ligada a condicionantes como la comunicación por carretera o la capacidad de suministro de recursos a la ciudad. Sin embargo, la primera condición indispensable para la localización de una ciudad en Marte es la relativa facilidad de poder realizar el aterrizaje de las naves, lo que las agencias espaciales denominan como *Landing Site*. Entendemos como condiciones adecuadas para el *Landing Site* una relativa igualdad del terreno en una extensión grande, es decir, el lugar más óptimo sería una gran extensión de terreno plana, donde una nave pueda realizar las maniobras necesarias sin salirse de dicha área y donde la nave quede perfectamente apoyada en el lugar. En nuestro planeta, tradicionalmente se han elegido sitios naturalmente protegidos frente a posibles ataques para el establecimiento de la mayoría de las ciudades. En el pasado, este hecho era quizás la condición *sine qua non* para producir un asentamiento permanente, pues la geopolítica del momento y lo beligerantes que resultaban los pueblos llevaba a destacar este aspecto sobre otros más importantes. Hoy día, por el contrario, esta situación ya no se produce. No obstante, es verdad que en el caso de Marte juega un papel decisivo el natural cobijo frente a las inclemencias del tiempo, tales como la radiación o las devastadoras tormentas de arena, ya que podría determinar en gran medida la permanencia del ser humano en el planeta.

Ya sea por la necesidad de defensa militar o por la necesidad de aglomerar en una única ciudad los organismos de gobierno, existe una tónica común de cara a la elección del sitio: la presencia de agua. El agua es el sustento primordial para la vida, ya sea humana, animal o vegetal. No solo es necesario su consumo para la vida, sino que el agua está presente en la mayoría de avances que el hombre ha realizado desde sus inicios. Las principales rutas comerciales de la antigüedad se establecían por mar y las interiores por río. La fuerza del agua es lo que permitió la proliferación de molinos y por ende la producción de harina. El agua es una fuente de energía renovable bastante importante en la actualidad. Con esto, lo que se pretende es afirmar que no cabe pensar en una ciudad en la que no exista la presencia de agua. Esta premisa es la que hace plantearse si una ciudad en Marte pasa de ser ciencia ficción a convertirse en realidad. Anteriormente se ha tratado el tema de la presencia de agua en Marte. Sin embargo, es necesario apuntar que no toda el agua está repartida de igual manera por la superficie del planeta. Por ello, otro de los factores para determinar la futura localización de la ciudad marciana es la presencia de hielo en sus proximidades. No obstante, podría darse la paradoja de que, por otras razones, el lugar más apropiado para la ciudad fuera

un punto de Marte con una escasa presencia de hielo, para lo que los científicos ya se han adelantado y han comprobado que el agua es perfectamente extraíble tanto de la atmósfera como del sustrato marciano. El problema de extraer agua de la atmósfera es que en el proceso se requieren grandes cantidades de hidrógeno, gas que en Marte solo se puede obtener a día de hoy mediante电解. Para poder llevar dicho proceso a cabo, al menos deberíamos importar hidrógeno líquido desde La Tierra. Sin embargo, la opción de obtener agua del sustrato es mucho más eficaz en las primeras fases de la comunidad, ya que se basa en calentar sustratos que potencialmente contengan agua hasta que ésta se convierta en vapor<sup>21</sup>.

Otro de los factores que determinan el establecimiento de una ciudad es su accesibilidad a la energía. Las ciudades terrestres demandan cada vez más energía y, en caso de Marte, este factor será de carácter vital debido a que la mayoría de las fuentes de energía que empleamos hoy por hoy no se dan allí. Estamos hablando obviamente de fuentes fósiles de energía. De la misma manera, tampoco podríamos depender de fuentes de energía tales como la hidráulica, la derivada de corrientes marinas y demás energías renovables que impliquen la inexistencia de la fuente. De hecho, las fuentes de energía que se prevé se empleen en Marte son la energía solar fotovoltaica, la geotérmica y la eólica, siempre acompañadas de un *back-up* de energía nuclear (como la actualmente empleada por rovers como el *Curiosity*). Recientemente, se ha apuntado por parte de la Universidad de Northumbria la posibilidad de emplear energía basada en el efecto Leidenfrost<sup>22</sup>, aunque todavía este tipo de energía no se ha tenido en cuenta tanto como las demás.

Anteriormente se ha apuntado que en uno de los aspectos importantes para una ciudad planificada es la conexión mediante el transporte. Queda claro que en Marte, a día de hoy, esta situación no es un problema desde el punto de vista de transportar humanos, aunque sí que lo es desde el punto de vista de los recursos. Es de esperar, como bien nos indica el sentido común, que sea cual sea el lugar de implantación de la comunidad marciana, éste no gozará del inmediato acceso a todos los recursos que requiere, y por ello se debe prever el transporte de los mismos. Actualmente, la tecnología de la que disponen las entidades espaciales permite cubrir recorridos de 50 km diarios (se puede ampliar el radio estableciendo un pequeño refugio), de forma que en este radio deben encontrarse disponibles tanto el agua como la energía o el combustible. Como consecuencia de esta necesaria comunicación, también surge la necesidad de habilitar espacios para la vida en cada uno de los puntos de extracción de energía, agua y demás recursos, puesto que si los habitantes requieren permanecer en dichos lugares durante un tiempo determinado puedan hacerlo sin arriesgar su vida a consecuencia de las condiciones climáticas adversas.

Por último, solo queda considerar un aspecto decisivo en la implantación de una ciudad, que no es otro que la comunicación con otras. Vivimos una era de la

<sup>21</sup> Según un estudio de la Escuela de Minas de la Universidad de Colorado, bastaría con calentar el sustrato hasta temperaturas entre los 200 y 500 grados centígrados, para luego poder condensar el vapor liberado y almacenar el agua en forma sólida. El sistema desarrollado por la Universidad es uno de los que potencialmente se podrían llevar a la práctica, pese a que todavía quedan pendientes labores de optimización.

<sup>22</sup> Efecto que se produce cuando una gota de un líquido entra en contacto con una superficie cuya temperatura es levemente superior a su punto de ebullición, desencadenándose una levitación de la gota que se puede encauzar de forma que el movimiento de la gota en la superficie genere energía.

comunicación, donde cualquier suceso acaecido en un punto determinado del planeta es inmediatamente conocido en el extremo opuesto. De este modo, la comunidad marciana estará caracterizada en gran medida por su capacidad de conexión con La Tierra, así como de comunicación interna dentro del planeta. Por ello, toda nueva ciudad que se pretenda crear deberá contemplar la viabilidad de construir un sistema de comunicaciones bastante fiable, eficaz y rápido, puesto que allí cualquier retraso en la comunicación puede marcar la diferencia entre la vida y la muerte.

## 6. Las propuestas actuales: asentamientos científicos que permiten la vida.

A pesar de que el tema objeto del trabajo es de radical actualidad y reciente investigación dentro de la comunidad científica, esto no ha impedido que diversos arquitectos, ingenieros e incluso escritores de ciencia ficción bien documentados hayan especulado con posibles asentamientos en Marte. A continuación se expondrán algunos ejemplos de asentamiento, aunque se ha de matizar previamente que algunos de ellos se desarrollaron para La Luna. No es problema para un estudio de casos que dichos ejemplos tuvieran nuestro satélite como referencia, ya que muchos de los aspectos que se tratan en dichos casos son similares a la situación marciana. Para una mejor comprensión de los diferentes asentamientos que se presentan, éstos han sido separados en tres grupos principales: inflables, naturalmente enterrados y de construcción in situ.

El primero de los grupos es uno de los más estudiados por las agencias espaciales. Los inflables presentan una serie de ventajas que sobrepasan las de otras tipologías constructivas. Sin embargo, la principal desventaja que conllevan es la importación 100% de todos y cada uno de los elementos, ya que hoy en día no se dispone de la tecnología suficiente para poder manufacturar dichas estructuras en el planeta de destino. Dentro de la familia de los *pneumatic HABs* destacan dos ejemplos muy claros: el primero es la “*Professional Research of Station on Mars*”, diseñada por J. Kozicki<sup>23</sup> en el año 2004, mientras que el segundo ejemplo es más reciente y mezcla tecnologías nuevas con las facultades de los inflables. Este segundo ejemplo no es otro que el proyecto del estudio Foster & Partners conocido bajo el nombre de *Mars Habitation*, diseñado en el año 2015.

El proyecto de Kozicki se basa principalmente en tres cúpulas neumáticas conectadas entre sí mediante unas pasarelas que se juntan en un núcleo compuesto por una estructura metálica. La peculiaridad de las cúpulas de Kozicki son los grandes ventanales que se abren en los frentes. Estos ventanales, fabricados en materiales plásticos fijados a la estructura metálica, permiten una visión del exterior sin el detrimento de las condiciones interiores. Cada una de las cúpulas tiene un tamaño diferente y alberga funciones muy dispares, como son la de cultivar, vivir e investigar. Dentro de los usos de vivienda y trabajo encontraríamos diferentes niveles, todos ellos suspendidos de las cúpulas, que permiten una mayor optimización del espacio. Estas cúpulas proyectadas en Kevlar por el autor no permiten la protección de los habitantes frente a las tormentas solares, cuyas consecuencias, como antes se explicó, son devastadoras. Por ello, Kozicki requiere de ese modulo central metálico, para poder resguardar a los habitantes de las posibles épocas de altos niveles de radiación solar.

<sup>23</sup> Extraido de la tesis doctoral de la doctora J. Kozicka.

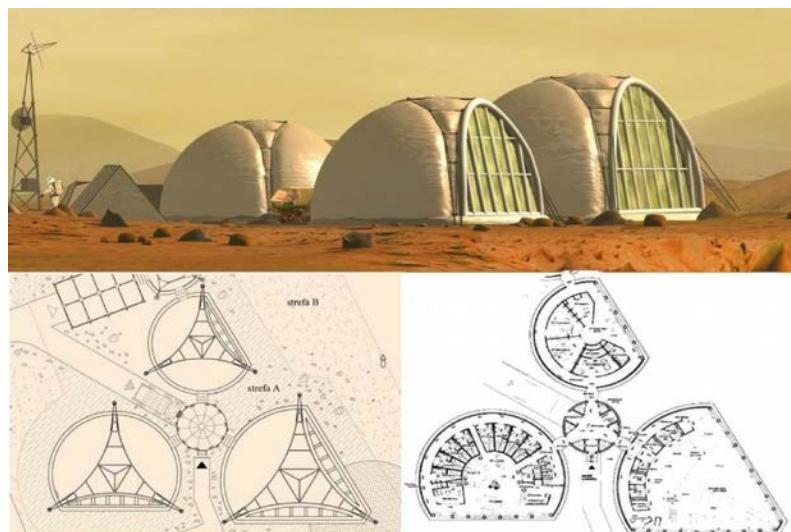


Figura 1

La propuesta de Kozicki, a juicio del autor de este trabajo, ofrece una serie de ventajas muy beneficiosas de cara al bienestar de los habitantes de la comunidad, como son la iluminación natural de todos los espacios que componen la base, así como la visión del exterior en todo momento desde casi cualquier punto de las cúpulas. Sin embargo, el hecho de que no ofrezcan esa protección continuada frente a la radiación, que sean unas estructuras muy limitadas en tanto a capacidad y que el 100% del conjunto ha de ser manufacturado en nuestro planeta y posteriormente enviado a Marte, convierten a esta opción en una de las menos recomendables para la creación de una ciudad.

Pasados unos años, concretamente 11, encontramos una nueva propuesta basada en los inflables y que solventa alguna de las desventajas principales que tenía la propuesta de Kozicki. El estudio Forster & Partners patentó recientemente una técnica de impresión 3D para la construcción de estaciones lunares basada en el regolito lunar. Con el espíritu de establecer una propuesta, premiada por la NASA en el concurso *3D printed Habitats for Mars*, el estudio extrapoló al Planeta Rojo los avances que habían llevado a cabo en La Luna. El proyecto lunar se basaba en desplegar una cúpula inflable desde el módulo aterrizado, sobre la cuál una serie de robots autónomos comenzaban a depositar regolito y a cubrir esta cúpula por completo, dejando únicamente un pequeño espacio para la entrada de luz. En el ejemplo de Marte el estudio fue más radical desde el punto de vista económico. El proyecto consiste en varias fases, las primeras constan de un proceso de excavación llevado a cabo por unos

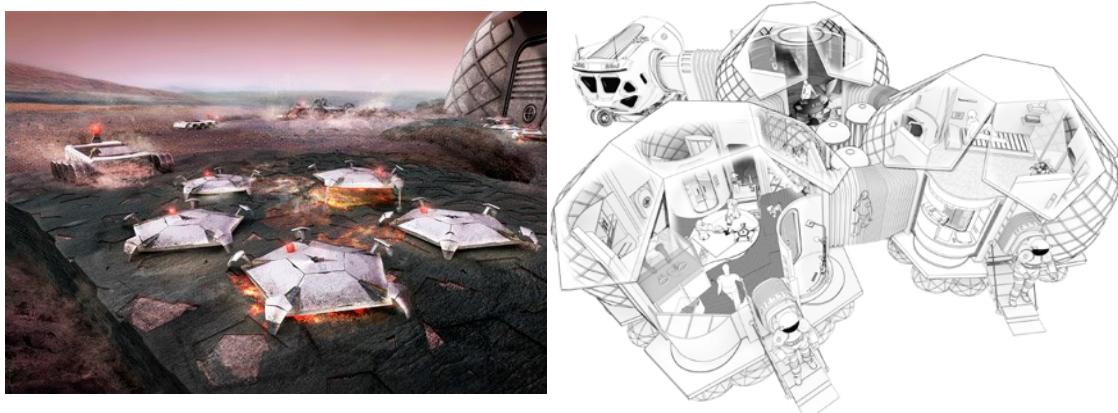


Figura 2

robots semiautónomos controlados desde nuestro planeta o la estación internacional. Cuando estos robots hayan finalizado sus trabajos de excavación estarán esperando unos módulos inflables con un corazón metálico, que se introducen en el hueco excavado. Estos módulos se conectan entre sí mediante unas pasarelas también neumáticas y cuando están completamente desplegados y conectados se cubren empleando el sistema de impresión 3D desarrollado para el proyecto de La Luna.

A juicio del autor de este trabajo, la propuesta del estudio inglés es más óptima desde el punto de vista de la protección continuada frente a la radiación, ya que la masa de regolito a emplear ofrece una suficiente protección frente al viento solar. Ahora bien, se pierden completamente las ventajas de tener huecos al exterior que ofrecía la propuesta del 2004. Conjuntamente se ha valorado que, a pesar de que en este caso se emplean más materiales marcianos, todavía se depende constantemente de La Tierra en cuanto a la construcción de los hábitats. Al igual que ocurría con Kozicki, el conjunto está producido casi al 90% en el exterior del planeta y posteriormente importado.

En la otra cara de la moneda tendríamos dos proyectos cuya naturaleza es opuesta. Estos son la segunda familia, las construcciones en túneles de lava. El primero de los casos se basa en habitar un entorno naturalmente protegido de las inclemencias del planeta, tanto de la radiación como de la temperatura y del viento. En esta línea se exponen dos opciones del año 1993 y del año 2003 de G. Moore y P. Kokh, respectivamente.

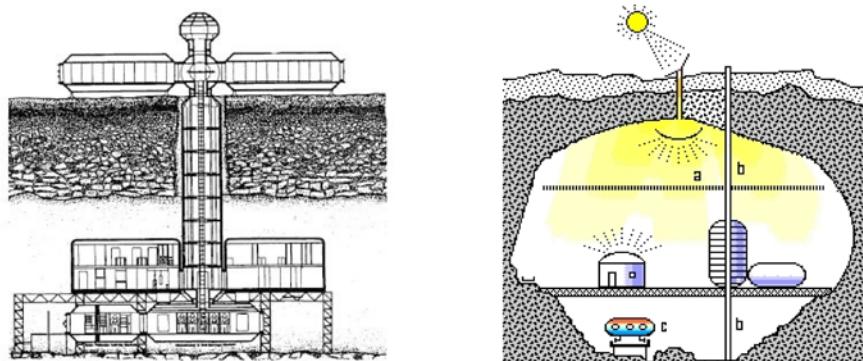


Figura 3

Las opciones planteadas por Moore y Kokh rápidamente fueron desestimadas por el autor como posibles opciones de construir en Marte, debido a que la construcción dependía intrínsecamente de una industrialización. Sin embargo, ambas son representativas de dos maneras de entender cómo habitar un túnel. Tomando como referencia la opción de Moore, observamos que se basa en el sellado de la entrada al túnel mediante una estructura metálica expuesta continuamente a la radiación, y que se une con los niveles inferiores mediante una comunicación vertical que obtura la entrada de luz natural. Esta opción conlleva una vida determinada por la artificialidad de la base, es decir, no hay ninguna vía de escape de la mente al exterior y se tiene constantemente la impresión de habitar un espacio confinado, potenciando de esta manera sentimientos de claustrofobia. Este concepto de estación no aprovecha las posibilidades de hermetismo que le ofrece un túnel y esto se debe a la forma que adoptan los pisos inferiores de la base. Esto se debe a que solo queda sellado el acceso superior al túnel, y no las otras posibles vías de entrada de aire contaminado, de

manera que todos los espacios bajo rasante tienen que estar controlados. En lugar de acondicionar un gran espacio, se acondicionan muchos, lo que impide que sea una solución eficiente.

Es posible, tal y como demuestra Kokh, habitar un espacio disminuyendo la sensación de claustrofobia típica de un túnel, con el simple uso de la luz natural. Kokh plantea mediante un sistema de reflexión por espejos la iluminación interior del túnel en toda su dimensión (hasta donde alcance la iluminación). Esta propuesta sigue incurriendo en errores de dependencia continuada con La Tierra, puesto que, como la anterior, se basa en construcciones metálicas. Sin embargo, aporta un mayor índice de bienestar. Sometidas ambas propuestas a la crítica del autor, observamos que tanto una como la otra son económicamente inviables. Ambas propuestas dejan de lado la posibilidad de combinar la configuración natural del terreno con técnicas de construcción que aprovechen el potencial de estos lugares, como podría ser los inflables o la impresión 3D. No obstante, no ha de perderse de vista que ambos proyectos son anteriores a muchos de los avances tecnológicos en los que se basan las demás propuestas.

Cerrando el capítulo de estudio de casos, se ha optado por comentar una propuesta radicalmente diferente de las estructuras neumáticas y la construcción 3D. Ésta no es otra que el proyecto de I. Petrov<sup>24</sup>. En esencia, el autor no emplea la tecnología como impulsor de la idea, sino la tradición. El proyecto se basa en la construcción mediante técnicas de mampostería, que tradicionalmente se han empleado desde la antigüedad, tales como la construcción de bóvedas y cúpulas de ladrillo. En Marte no existen canteras ni tampoco una fuente desde la que manufacturar ladrillos, pero lo que sí hay en abundancia es regolito, el cual sometido a mucha presión se puede compactar y dárle forma de bloque. El proyecto de Petrov basa la construcción del complejo en estas estructuras a compresión porque la protección frente a la radiación se realiza con 10 metros de regolito depositado sobre el sistema de bóvedas. El autor, consciente de la imperiosa necesidad del hombre por mirar hacia afuera y escapar del entorno confinado, al menos con la vista, plantea unos usos habitacionales “exteriores”. Las estancias de descanso y vida de los habitantes se componen de una bóveda abierta al exterior en cuyo interior se dispone un marco metálico, desde el cual se despliegan unas paredes inflables con ventanas. Estos módulos son enviados al planeta, ya que no se pueden construir en él. Sin embargo, en los espacios de relación, trabajo y distribución Petrov plantea soluciones muy hábiles de cara al confort. Entre estas se cuentan la Plaza del Árbol, la presencia de vegetación dispersa por los espacios de distribución o la iluminación natural mediante espejos de los grandes espacios. De todos los casos expuestos en este capítulo, este último es el único que puede considerarse una ciudad y no una estación científica permanente, puesto que tiene en cuenta numerosos factores de carácter psicológico, de confort, de economización de costes, de comunicación y de relaciones que los anteriores no plantean. Por ello, se le puede considerar como el detonante del pensamiento global de ciudad y no de estación, que posteriormente ha llevado a numerosos trabajos de diseño de ciudades marcianas, como el desarrollado por la doctora en arquitectura Joanna Kozicka en su tesis doctoral presentada a mediados del año 2016.

<sup>24</sup> Extraído de la tesis de master de I. Petrov.

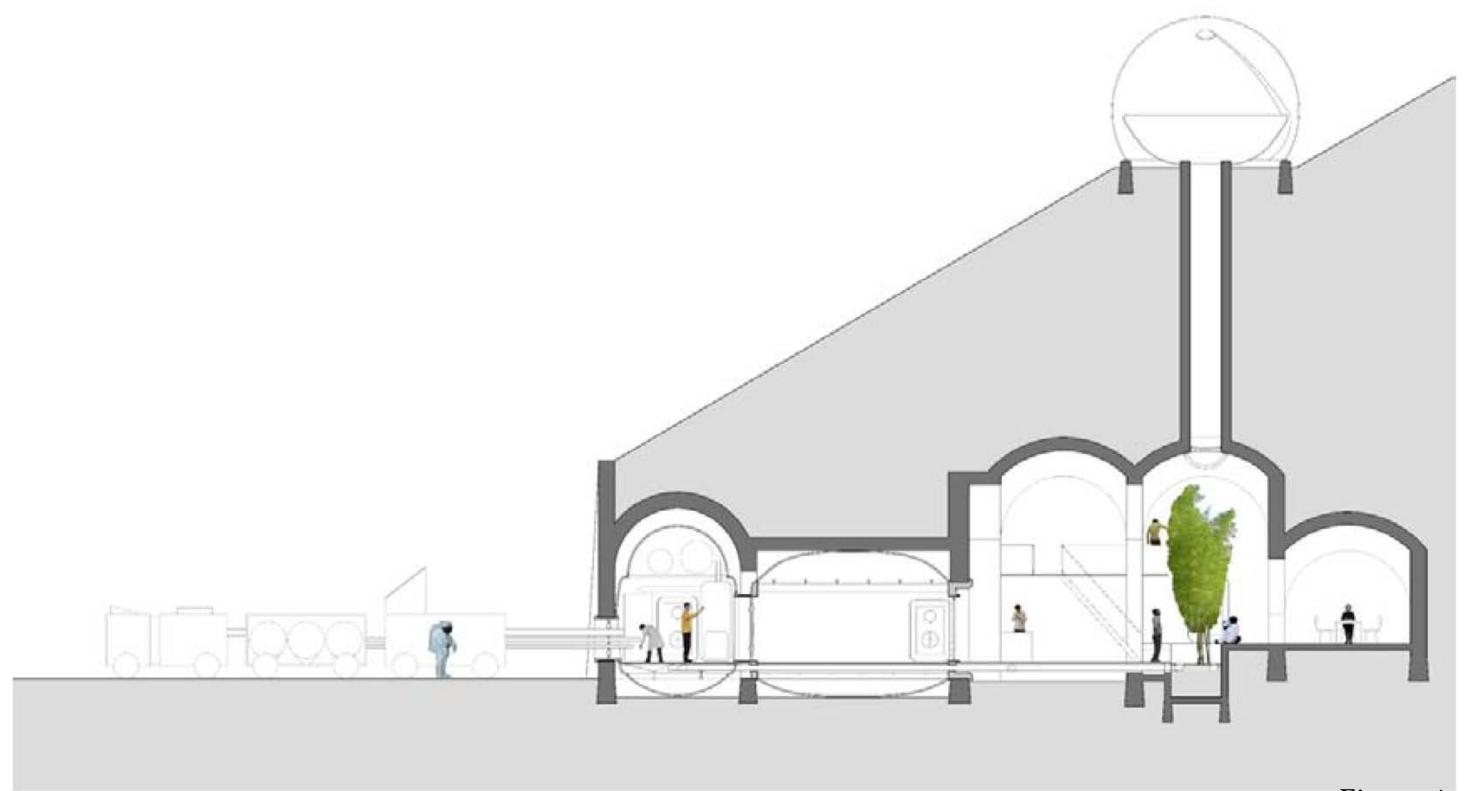
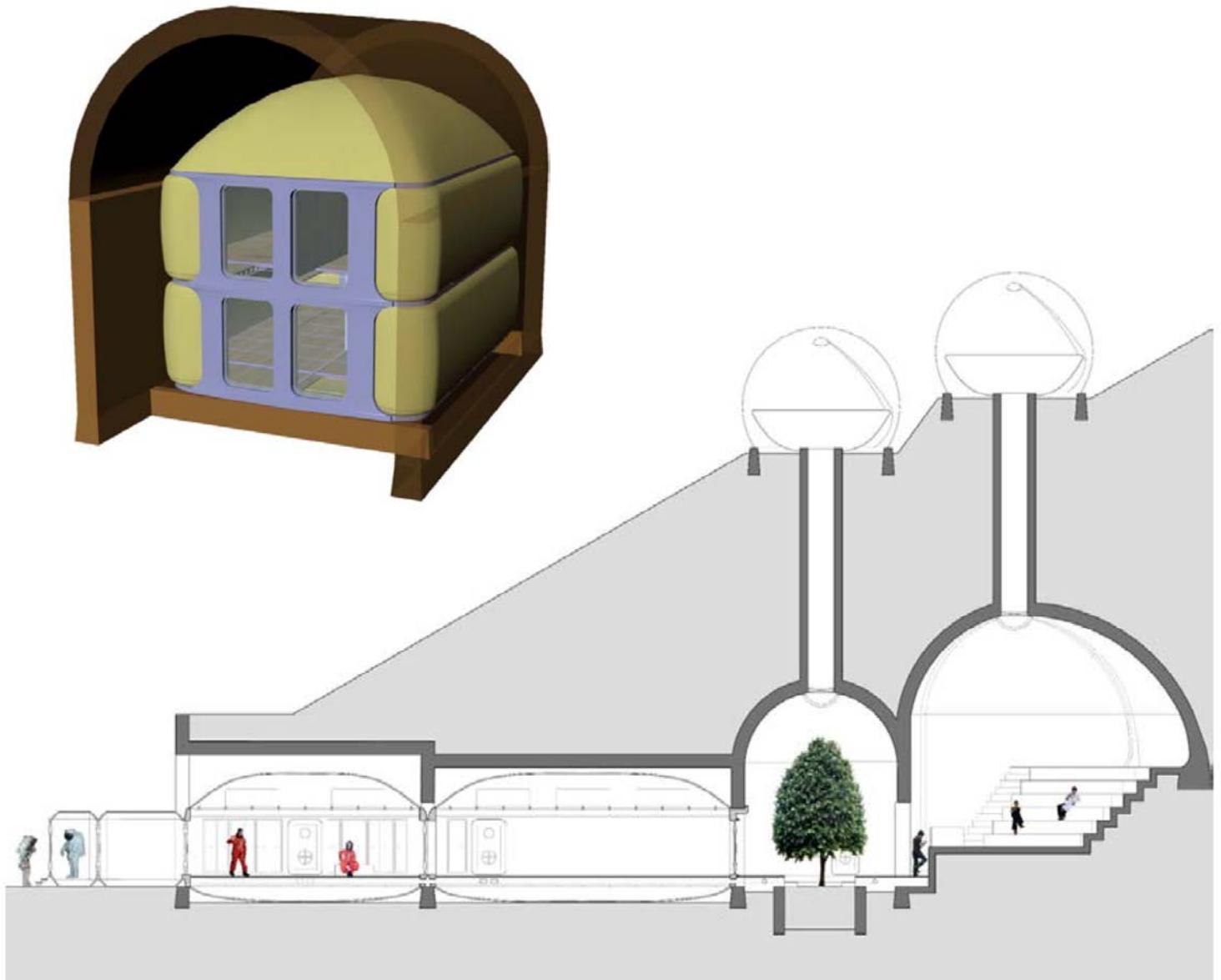


Figura 4

## 7. Requerimientos agronómicos de un asentamiento

### a. **Finalidad de los cultivos.**

Con anterioridad se ha apuntado la importancia de los cultivos y las plantas en la rutina diaria de la nueva colonia. En La Tierra, puede que esta importancia pase desapercibida, puesto que se da con una asidua frecuencia. Los vegetales no solo son una fuente de alimento, sino la principal fuente de oxígeno que existe en el planeta, sin la cual el resto de seres vivos no sobrevivirían. Son también un recurso constructivo de vital importancia, sobre todo en el pasado. Por último, cabe resaltar el impacto sobre el bienestar que conlleva la presencia de vegetación en una comunidad, máxime cuando ésta se encuentra aislada del resto. Por tanto, el objeto de este capítulo es analizar la finalidad de las plantas en la futura ciudad marciana y su importancia. Por ello, se han definido cuatro grupos principales de vegetales, según su finalidad; vegetales de consumo, vegetales de oxigenación, vegetales de construcción y, por último y no por ello menos importante, vegetales arquitectónicos.

Analizando el primer conjunto, los **vegetales de consumo**, observamos a priori que se destinan únicamente a la producción de alimento. Este tipo de plantas ha de ser seleccionado meticulosamente con el objetivo de garantizar el mayor aporte de nutrientes posible a la comunidad. En este momento, todos los esfuerzos por parte de las agencias espaciales y demás entidades relacionadas con los proyectos de habitar Marte se han centrado sobre los cultivos, ya que es económicamente mucho más barato transportar plantas que transportar una fuente de alimento animal. Los animales procesados para el consumo ocupan un lugar dentro de las lanzaderas y su preparación para el viaje es costosa, lo cual no quiere decir que no sea una opción, sino que simplemente es más cara que transportar semillas o incluso las plantas en sí. Parece lógico pensar que cuando una comunidad se encuentra en las primeras fases de su implantación, estas soluciones (enviar animales o comida periódicamente) no son las más apropiadas, puesto que se debería dar prioridad en los envíos a elementos como las plantas de tratamiento de aire, de reciclado de residuos y de obtención de energía, lo que se conoce como *Life Support System*.

Partiendo de esta base, establecemos que los habitantes de esta comunidad serán esencialmente vegetarianos, y por tanto, es donde toma importancia la selección de alimentos, puesto que las plantas no pueden ofrecer los mismos nutrientes que una dieta omnívora variada. A consecuencia de ello, se está empezando a plantear la necesidad de elaborar un listado de plantas capaces de aportar una variedad de nutrientes suficientes a los habitantes. Actualmente la ESA, la NASA y sus colaboradores no han llegado tan lejos, pero para este trabajo el autor se sirvió de

nutricionistas con el objeto de intentar determinar cuáles serían los vegetales potencialmente candidatos a realizar el viaje.

Las dietas vegetarianas y veganas aportan una gran variedad de nutrientes, como vitaminas, minerales y fibras, entre otros. No obstante, pueden sufrir de un déficit de vitamina B12, vitamina D, zinc, calcio, hierro y ácidos grasos omega 3. Los aminoácidos son ingeridos principalmente con el consumo de proteínas animales, aunque pueden ser aportados mediante la combinación de proteínas vegetales procedentes de cereales y legumbres. La ingesta de dichos alimentos no tiene por qué producirse simultáneamente durante la misma comida, sino que puede realizarse a lo largo del día en diferentes momentos. El omega 3, muy presente en alimentos como el pescado, puede consumirse también a través de frutos secos, como las nueces, la soja y las algas. En el caso de Marte, concretamente las algas se antojan complicadas de consumir, pero las nueces y la soja son vegetales perfectamente transportables. El hierro y el zinc están presentes en cultivos como las espinacas, las lentejas y las frutas ricas en vitamina C. De entre ellos, algunos como las espinacas ya han sido tenidos en cuenta para el futuro de las ciudades marcianas. Además de las consideraciones expuestas, cabe resaltar que según las últimas valoraciones de dietistas, alimentos como la quinoa, podrían ser candidatos a poblar Marte, ya que se desarrollan con una relativa facilidad y su contenido nutricional es bastante rico.

Hasta la fecha, los alimentos principalmente barajados entre otros posibles candidatos son tomates, guisantes, centeno, rábanos, puerro, rúcula, berro quinoa, espinacas y cebollino. Estos no son otros que los elegidos por el profesor W. Wamelik, de la Universidad de Wageningen, para los estudios de cultivo en sustrato marciano y para el proyecto EDEN ISS<sup>25</sup>. Sin embargo, otros colaboradores de la NASA apuntan a las patatas y el trigo como otros dos vegetales de inminente estudio. No obstante, se ha de tener presente que de las tres fases de colonización planteadas por las agencias espaciales, estos estudios se centran en los antecedentes de la primera. Sin embargo, el presente trabajo se enmarca dentro de la tercera fase, y por tanto, se asume que en ese momento, el desafío de cultivar cualquier planta en el planeta estará superado.

Dentro del segundo grupo de vegetales anteriormente nombrado, encontramos las denominadas plantas C4 y CAM. Este grupo, **los vegetales de oxigenación**, tienen como objetivo la producción de oxígeno, principalmente. Cómo estos pasos aún no han sido previstos por las agencias espaciales, el autor del trabajo empleó como referencia estudios realizados en La Tierra sobre la producción de oxígeno. Tras una investigación sobre los distintos procesos naturales por los que las plantas convierten el CO<sub>2</sub> en O<sub>2</sub>, se llegó a la conclusión de que lo más óptimo para la producción de oxígeno en los espacios compartidos con los seres humanos son aquellas plantas cuya fotorrespiración es la menos derrochadora, siendo éstas las denominadas C4 y CAM (Metabolismo ácido de las crasulaceas). Las plantas C4 reducen al mínimo la fotorrespiración, separando la fijación inicial de CO<sub>2</sub> y el ciclo de Calvin en el espacio, al realizar estos pasos en tipos de células diferentes, funciones que les permiten generar una mayor cantidad de oxígeno por metro cuadrado que otras plantas. Dentro de esta familia encontramos plantas de consumo como el maíz y la caña de azúcar, y otro tipo de plantas como el césped tropical, el sorgo y el mijo. La otra tipología de plantas a

<sup>25</sup> Véase EDEN ISS Project, Universidad de Wageningen.

tener en cuenta en su combinación con los seres humanos son las CAM. Éstas reducen al mínimo la fotorrespiración y ahorran agua separando los procesos de fijación de dióxido de carbono y el ciclo de Calvin únicamente entre el día y la noche, y no en el espacio como las plantas C4. Esta familia se ha adaptado tradicionalmente a climas muy secos y de cambios drásticos de temperatura, como los desiertos. Entre algunos de sus miembros encontramos plantas de consumo, como las chumberas<sup>26</sup>, productoras de tuna<sup>27</sup>, numerosos cactus, y plantas arquitectónicas, como el arbusto elefante<sup>28</sup> y las planta piedra<sup>29</sup>. Cuando se trate el capítulo de las plantas arquitectónicas, cobrarán vital importancia sobre todo las plantas CAM.

El tercer grupo de plantas, **los vegetales de construcción**, es aquel cuya importancia deriva de sus propiedades mecánicas y estructurales. Aquí encontramos una familia en exclusividad, los bambús, plantas caracterizadas por su enorme resistencia a los esfuerzos tanto de tracción como de compresión, poco densas comparadas con otras plantas, gracias a su estructura de celdas de aire interior, de rápido crecimiento<sup>30</sup> y resistentes al calor. Algunas especies de bambú se desarrollan incluso a temperaturas cercanas a los -25°C<sup>31</sup> en regiones andinas cercanas a la cota permanente de nieve. A pesar de sus buenas características constructivas, estas plantas conllevan un consumo de agua mucho más elevado que cualquier otra madera. Sin embargo, en el estadio de desarrollo donde se enmarca la hipótesis del presente trabajo, se entiende que la capacidad de generar agua de la comunidad humana marciana permitirá su empleo en ciertas cantidades para el cultivo de estas plantas. Esto es así porque se busca una optimización exhaustiva de este recurso y se entiende preferible el empleo de agua en el cultivo de bambú que en la creación de hidrógeno como fuente de energía y combustible. Parte de la problemática que conlleva el bambú es que para que la planta alcance unas existencias aceptables para su empleo como elemento estructural, debe desarrollarse durante al menos 3 años. De todas formas, a efectos de la hipótesis de este trabajo, y teniendo en cuenta que la gravedad permitiría ampliar el rango de resistencias aceptables y que la ingeniería genética avanza a pasos agigantados, se considera que, en el futuro, el tiempo de maduración de la planta se habrá acortado considerablemente y, desde el punto de vista genético, se habrá conseguido combinar la resistencia a las bajas temperaturas con el crecimiento rápido, para obtener un tipo de bambú perfectamente adaptable al medio marciano, que no requiera de cultivo controlado.

Finalmente se encuentran los **vegetales arquitectónicos**, que son aquellos destinados a cultivarse en entornos adaptados a la vida humana y en combinación con los demás usos arquitectónicos de la ciudad, produciéndose una estrecha relación entre estos y los habitantes. La importancia de estos vegetales surge de la necesidad de los hombres de “sentirse como en casa”, es decir, de la mejora del bienestar mental de la comunidad. Numerosos estudios apuntan los beneficios no nutricionales de las plantas en comunidades extremadamente aisladas, como la ISS o como grupos de científicos establecidos en la Antártida. El *Space Dynamics Laboratory* de la Universidad de Utah

<sup>26</sup> *Opuntia ficus-indica*

<sup>27</sup> Fruto de la chumbera.

<sup>28</sup> *Portulacaria afra*

<sup>29</sup> *Lithops karasmontana*

<sup>30</sup> Determinadas especies de bambú como la *Phyllostachys bambusoides* crecen hasta 1 metro al día.

<sup>31</sup> *Chusquea aristata* – Originaria de la región andina.

apunta en un breve estudio cuáles son algunos de estos beneficios, por ejemplo, el incremento de relaciones sociales gracias a la jardinería. Según apunta este estudio, la jardinería es un foco de aglomeración social, donde se puede potenciar el sentimiento de grupo. Otra de las ventajas que cita el estudio es la estabilidad emocional de los habitantes como consecuencia de los olores desprendidos por las plantas. No es baladí que el olor de una planta pueda afectar al bienestar emocional, puesto que debe tener presente que los habitantes de la futura ciudad marciana están expuestos a un ambiente constantemente controlado, donde no hay viento, no hay olores, la temperatura es constante y la luz solar muy preciada. La fatiga mental que puedan sufrir los habitantes de esta comunidad se ve considerablemente reducida por la presencia de plantas en los espacios de trabajo y en las “área de escape” del estrés y cansancio producidos al realizar las mismas labores continuadamente durante años. Es necesario apuntar, llegado este punto, el cambio que puede producir en la mente humana el parar de realizar labores de trabajo que comienzan a producir cansancio y salir del lugar de trabajo a pasear o tomar un café. Este acto, apenas sin transcendencia, se ve enormemente potenciado en una comunidad sometida a condiciones artificiales, cuando existen elementos naturales como las plantas, que apaciguan la sensación de dependencia continuada de la tecnología.

La importancia de las plantas como ayuda psicológica a través de su incorporación en la arquitectura puede ser muy beneficiosa si tenemos en cuenta que, no hace mucho tiempo, astronautas de la ISS se congratulaban fervorosamente por haber conseguido “*Space zucchini, and then he had his buddy space broccoli. And then there was space sunflower*”<sup>32</sup> [ZINNIAS FROM SPACE! NASA Studies the Multiple Benefits of Gardening, NASA]. Posteriormente, en el capítulo sobre arquitectura y vegetación se hablará de cómo se pueden potenciar los beneficios no nutricionales de las plantas mediante su integración arquitectónica.

### **b. Metodología de cultivo.**

Teniendo en cuenta que la hipótesis de trabajo se basa en una independencia de la ciudad con respecto a La Tierra, alcanzada tras unos años determinantes donde se producirán una serie de avances tecnológicos hoy día teorizados y que actualmente se encuentran en la fase de experimentación, dando resultados muy satisfactorios, se ha de comprender que muchas de las hipótesis posteriormente presentadas todavía

<sup>32</sup> “Calabacín espacial, luego llegó su amigo el brócoli espacial y por último el girasol espacial” – ZINNIAS FROM SPACE! NASA studies the Multiple Benefits of Gardening, NASA, Enero 2016

requieren de una comprobación experimental, pero que se entiende no forman parte de la ciencia ficción, puesto que los medios para lograrlo existen en la actualidad. En este apartado de la investigación se analiza concretamente una posible metodología de cultivo para la futura comunidad, basada en técnicas de cultivo en ya en uso y en fase de estudio por entes colaboradores de las agencias espaciales, como la Universidad de Wageningen.

Antes de poder entender el conjunto del sistema de cultivo, se ha de entender el funcionamiento de dos de los métodos empleados: las cámaras de cultivo y los invernaderos. Ambos, son sistemas para favorecer el cultivo en situaciones más desfavorables que las del entorno natural de la planta en cuestión. Este control de la fisiología de los vegetales permite aumentar exponencialmente la producción de cultivo, gracias al aprovechamiento de los espacios verticales.

El primero se basa en controlar dentro de un ambiente completamente hermético las condiciones de desarrollo del cultivo. Las cámaras son unos elementos que permiten controlar el 100% de las condiciones ambientales, como son la temperatura, la irradiación, la humedad, la composición del aire que entra en la misma, etc. Son la mejor opción cuando tenemos en cuenta la falta de adaptación de determinadas plantas a ambientes extremos. En las cámaras de cultivo los ingenieros, biólogos y demás profesionales pueden llevar a cabo estudios de cómo afectan diferentes nutrientes a las plantas, ya que el control es tan exhaustivo que hasta el científico decide qué nutrientes y en qué cantidades se deben aportar a los vegetales.

En el otro extremo del tablero encontramos los invernaderos, también estructuras de apoyo al cultivo, pero cuyo nivel de control es mucho menor. Los invernaderos son unas estructuras cubiertas por materiales como el plástico o el vidrio, que permiten el paso de la radiación solar hacia el interior, incidiendo sobre los objetos. Debido a la energía que absorben, estos, a su vez, emiten radiación infrarroja que no es capaz de traspasar los vidrios o plásticos hacia el exterior, provocando el aumento de la temperatura en el interior. A diferencia de las cámaras de cultivo, estas estructuras no permiten un control exhaustivo de las condiciones interiores. Existen, como es lógic, o estadios intermedios entre la cámara de cultivo y el invernadero, pero en esencia, la contraposición reside en el nivel de control del ambiente interior que el operador pueda tener.

En este apartado se explicará una metodología de cultivo adaptada al planeta Marte, con el objeto de conseguir maximizar los rendimientos de los cultivos y de la ciudad en su conjunto. Dicho plan de cultivo se basa en cuatro etapas principales, que se han denominado cámaras aeropónicas, cámaras de sustrato, invernaderos interiores e invernaderos exteriores. Todas estas etapas han sido planteadas progresivamente desde el ambiente más controlado al más libre. Ha de entenderse que la utilización sucesiva de cámaras e invernaderos desde un mayor a un menor control de las condiciones está ligado temporalmente a la evolución y desarrollo de la comunidad. Podría decirse que el fin último de esta metodología de trabajo es la incorporación plena de las plantas a la superficie marciana sin ningún tipo de ayuda artificial, relacionando así la planificación de la ciudad marciana con los futuros planes de terraformación del planeta, ya que se entiende que todo forma parte de un plan global de desarrollo de la población humana como vegetal a “relativo” corto plazo.

## Cámaras aeropónicas

El primer paso en los cultivos de la futura colonia es, evidentemente, la fase más controlada del proceso. Las razones para ello son que este modo de cultivar sería el empleado por el proto-asentamiento en sus etapas más iniciales, ya que es la única vía rápida y eficaz de independencia con el Planeta Azul. Estas cámaras asegurarían la presencia continua del cultivo a través del control exhaustivo de la temperatura, la humedad y demás factores. La necesidad de control mediante estas instalaciones deriva de que no es permisible perder ninguna de las cosechas. Si anteriormente hemos descartado la importación de alimentos animales, debemos siempre buscar el máximo rendimiento del material vegetal que transportemos. En definitiva, este primer estadío del proceso sería la aplicación de los avances que resulten del proyecto EDEN ISS. Se entiende que dicho proyecto es el más óptimo, no solo por los avances que está logrando, sino por el método de cultivo que plantea, la aeroponía.

Los cultivos aeropónicos se desarrollan sin sustrato alguno, en un medio gaseoso, rociado continuamente por agua y nutrientes. Esta niebla nutritiva generada artificialmente permite, no solo que las plantas crezcan en cualquier lugar, sino que ofrezcan unos ratios de aprovechamiento de los nutrientes mucho mayores que mediante hidroponía o el cultivo en sustratos enriquecidos. El funcionamiento de estas cámaras es muy sencillo de reproducir en el planeta de destino, sobre todo con las técnicas de construcción 3D planteadas, que permiten imprimir macetas de gran tamaño cuya superficie de cultivo sea mayor que la que nos permiten las macetas<sup>33</sup> industrializadas en La Tierra. La sencillez constructiva reside en que por dentro de las macetas se puede incorporar un sistema longitudinal de riego y oxigenación de las dimensiones requeridas por el espacio contenedor de la cámara, que posteriormente se cubre con las tapas donde están practicados los orificios para las plantas. Sobre las hileras de macetas se dispondría un sistema de iluminación LED idéntico al que monta el laboratorio de pruebas del equipo de W. Wamelik en los Países Bajos y que permite una irradiancia constante de energía, que a su vez, facilita el continuo crecimiento de las plantas. Sobre todo en las primeras fases de desarrollo de la ciudad, será de vital importancia disponer de material vegetal modificado genéticamente para evitar que las plantas sufran demasiado estrés al someterlas a situaciones de cultivo forzadas.

Una vez se hayan desarrollado lo suficiente, las plantas pasarán a las cámaras de sustrato, la segunda etapa del proceso de cultivo.

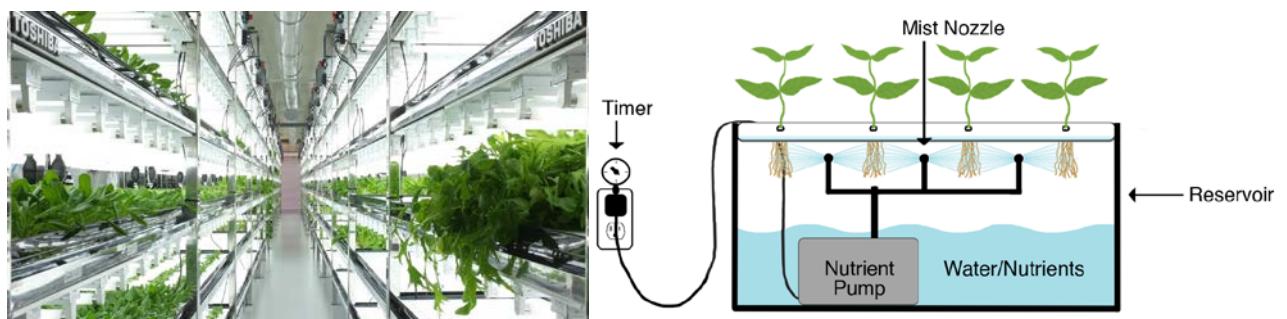


Figura 5

<sup>33</sup> Se denomina maceta en la aeroponía al recipiente donde se mantiene la planta. A diferencia de una maceta tradicional, estas macetas solo disponen de una pequeña apertura por donde sale la planta en busca de la luz y una entrada del sistema de riego y oxigenación por la parte inferior de la cavidad donde se genera la mezcla nutritiva de aire y agua.

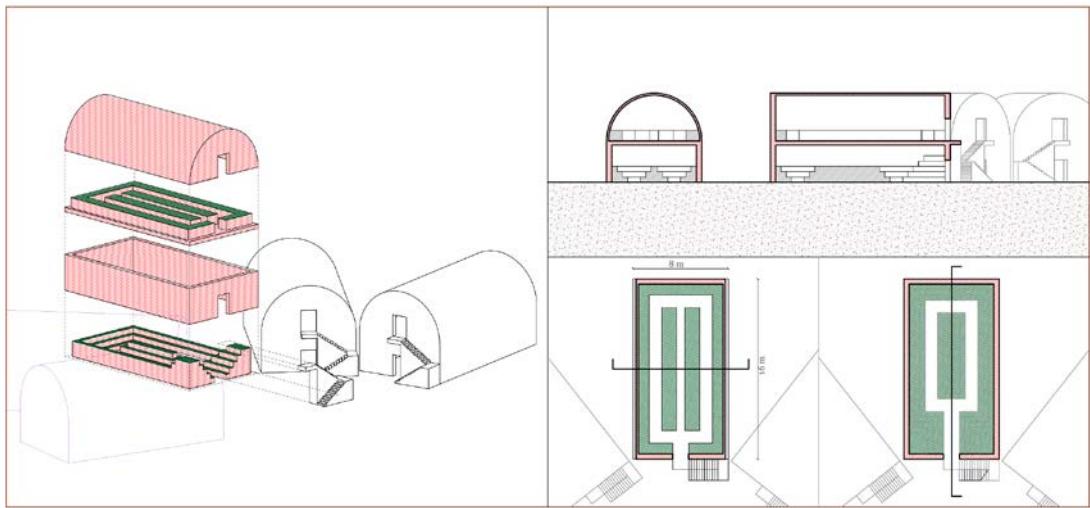


Figura 6

### Cámaras de sustrato

Las cámaras de sustrato se corresponden con estadios más avanzado del asentamiento (por decirlo de alguna manera, se corresponderían con la fase dos en cuanto a cronología de cultivos). Estas no dejan de ser unas cámaras de cultivo similares a las anteriores, donde en vez de cultivarse en un medio vaporoso, las plantas se desarrollan en el sustrato natural del planeta. Como ya se comentó con anterioridad, el sustrato marciano permite el cultivo sin una gran necesidad de fertilización, aunque para mejorar la adaptación de las plantas, primero se controla la germinación en el estadio anterior, proporcionando artificialmente los nutrientes que posteriormente estén disponibles en el sustrato. Los distintos vegetales objeto de cultivo se desarrollarán en estas cámaras bajo un control menos intenso de las condiciones ambientales, con el fin de adaptar la planta al entorno más inmediato al que pasará<sup>34</sup>.

Así como las cámaras aeropónicas eran espacios estancos, estas cámaras de sustrato pueden ser menos restrictivas en este aspecto, pudiéndose, por tanto, aumentar su tamaño. Hemos de tener en cuenta que, cuanto menor sea el nivel de control necesario, mayor puede ser el tamaño de la cámara y más eficiente es el proceso entero.

Esta tipología de cámara, al igual que la anterior, goza de una alta facilidad de construcción in situ mediante técnicas 3D, siendo incluso mucho más sencillas en cuanto a forma. Las cámaras planteadas se basan en unas bandejas de hormigón entre las cuales se incorpora un sistema de riego de los más tradicionales que existen, los canales de agua. No debe preocupar la presencia de agua líquida en estas cámaras, ya que todavía la temperatura y las condiciones de humedad están controladas. Estas cámaras son además muy beneficiosas en tanto al urbanismo y el bienestar. Así como las cámaras de la primera etapa se plantean como habitaciones, estas cámaras, debido a su sencillez constructiva, se plantean como grandes espacios con diversidad de recorridos, dentro los cuales pueden darse áreas de descanso a modo de túnel<sup>35</sup>. Estos

<sup>34</sup> En el caso de que la terraformación se produzca plenamente, el empleo de las cámaras e invernaderos será, más que una necesidad imperiosa, un ejercicio de monitorización de la fisiología de las plantas, con objeto de mantener siempre el mayor rendimiento posible.

<sup>35</sup> Entiéndase por cámaras transitables una estructura aislada transparente que permite la visión de la cámara de cultivo que lo rodea. Se podría decir que es el equivalente a un túnel acristalado de paso, como

túneles pueden constituir una red de corredores verdes, que los habitantes de la colonia deben atravesar para cambiar de actividad dentro de un mismo edificio, propiciando de esta manera la interacción entre el ser humano y las plantas, que como se indicaba en el capítulo anterior, puede favorecer sustancialmente la estabilidad emocional y mental de los habitantes.

No se debe perder de vista que estos espacios están iluminados artificialmente y, aunque en ellos se deba y pueda simular el ciclo día/noche, no dejan de ser espacios confinados y cerrados. Por ello, los vegetales, tras una estancia determinada en estas cámaras de cultivo, pasan a la tercera etapa del proceso, los invernaderos.

### Invernaderos interiores

Esta etapa de cultivo se destina principalmente a plantas decorativas y productoras de oxígeno. En este punto se plantea una serie de estructuras abiertas a la totalidad del espacio del túnel. Es decir, son espacios interiores del túnel<sup>36</sup>, habitados por los seres humanos, y por tanto, climatizados para su adecuado confort. Los invernaderos interiores son grandes extensiones verdes confinados dentro del gran HAB que se proyecta. Esta fase permite grandes extensiones de cultivo diseminadas entre los demás usos de la ciudad que pueden jugar un papel de “parques” en lo que es el conjunto total.

Realmente, a efectos de cultivo, estas instalaciones no aportan un avance sustancial respecto a las condiciones ambientales, tal y como hacían las fases anteriores, pero sí aportan a la comunidad. Tal y como se ha comentado en reiteradas ocasiones, se ha de plantear una imbricación total de las plantas en el día a día de la población. De hecho, se plantea que los denominados invernaderos de interior jueguen el papel de distribución de las comunicaciones peatonales en la ciudad, delimitando de esta manera los recorridos entre edificaciones. Más adelante, se entenderá la viabilidad de estas extensiones de cultivo interior cuando se explique la estrategia de implantación de la ciudad en el planeta.

El autor de esta investigación especifica que, en función del acceso al agua que tenga la población, estos invernaderos interiores pueden gozar de un sistema de riego similar al que se planteaba en la fase anterior. La posible evaporación del agua en estos espacios no plantea una dificultad, ya que el aire es constantemente reciclado por el LSS, y por tanto, no se produce una pérdida de agua, pues esta puede recuperarse en el sistema de filtrado. Sin embargo, si debido a las circunstancias particulares de la futura ciudad no se aconsejase la libre circulación de agua (por ejemplo en casos de ciudad de desarrollo predominantemente vertical), a lo largo de estas extensiones de cultivo se plantearía un sistema de rociadores, que a su vez permitiesen simular situaciones de lluvia en los entornos abiertos de la ciudad, siendo esta solución un caso extremo a juicio del autor.

los que se encuentran con facilidad en los acuarios de las grandes ciudades, ya que el libre paso de los habitantes por el interior de las cámaras no es viable para el control y la calidad sanitaria del cultivo, pero sí su contemplación.

<sup>36</sup> Véase el apartado implantación geográfica, en el capítulo de Localización y desarrollo urbanístico.

## Invernaderos exteriores

En la última etapa de cultivo de los vegetales destinados a la producción de alimentos y de materiales de construcción se plantean invernaderos en el exterior de la ciudad. La complejidad técnica de estas instalaciones no dejaría de ser la misma que se da en La Tierra, puesto que se cuenta con que los avances en genética hayan progresado hasta el punto de conseguir adaptar los vegetales a las condiciones exteriores del planeta, y con que las plantas generadoras de gases de efecto invernadero hayan conseguido su objetivo, de forma que la climatología exterior no sea tan adversa. Por tanto, en esta última fase se podrá optar por mantener el cultivo en los invernaderos para la intensificación de su aprovechamiento o desmontar dichas infraestructuras y dejar los cultivos al aire libre.

Estas instalaciones se proyectan como la combinación de una estructura portante de bambú con una cubierta a base de plásticos de fabricación marciana<sup>37</sup>, situadas en el exterior y pudiendo estar alejadas cientos de metros del complejo de la ciudad. La única dificultad que plantearían estos invernaderos es principalmente logística, en primer lugar por el transporte del agua y en segundo lugar por el transporte de alimentos y materiales a la población. En lo relativo al agua, se propone que, como estas construcciones se encuentran alejadas de la ciudad, lo más adecuado y eficiente sería la incorporación de unas pequeñas instalaciones extractoras de agua en las cercanías de los invernaderos. De hecho, el autor del proyecto propone una estructuración radial de los invernaderos de manera que converjan en la instalación extractora. Se entiende que si las condiciones del planeta han llegado a permitir la creación de estas instalaciones es porque se ha podido alcanzar el punto de triple estado del agua. De no ser así y no pudiendo mantener agua líquida en los conductos de irrigación del invernadero, estas construcciones deberían rediseñarse para adaptar el suministro de agua en forma de hielo.

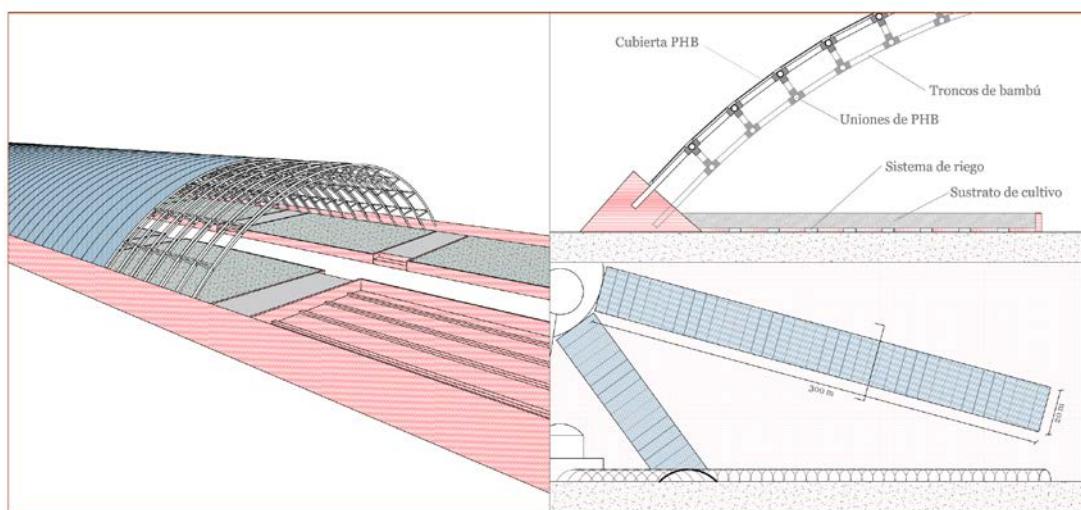


Figura 7

<sup>37</sup> Véase el capítulo de materiales de construcción, concretamente el apartado de plásticos derivados de bacterias.

### c. ***Especificaciones constructivas.***

Una vez entendidas las diferencias existentes entre los cuatro estadios de cultivo, se puede hacer una aproximación morfológica que ponga de manifiesto la sencillez de las construcciones.

Las cámaras aeropónicas, como se señalaba antes, tienen las dimensiones propias de una habitación, donde en todas las paredes que no tienen puerta encontramos distintos niveles de macetas. Estas macetas, de forma prismática, se disponen en cascada para aprovechar al máximo espacio disponible y de forma que los encargados de dichas instalaciones tengan las macetas a una altura adecuada. Las “tapas” de las macetas pueden ser removidas y permitir la manipulación de los sistemas de rociado interiores en caso de fallo. En un primer momento, se ha pensado en el hormigón como material para las macetas, aunque bien es cierto que el regolito impreso podría ser un mejor candidato, al ser más ligero que el hormigón; el plástico refinado por bacterias sería otra de las opciones lógicas, siempre que la ciudad haya alcanzado un nivel de desarrollo en que se puedan permitir destinar plástico a estos elementos. El techo de estas instalaciones, tal y como se muestra en las figuras, consta de un primer nivel donde se encuentran los focos de iluminación y de un nivel superior, la cubierta. Estas cámaras se disponen en una estructura radial, en cuyo centro se encuentra el sistema que controla todas las condiciones ambientales, y en especial, el estado y composición del agua. En la hipótesis que se plantea, se han diseñado unas “islas aeropónicas” que se suceden a lo largo de los cordones verdes de la ciudad. Dentro de las islas tipo 1, como se las designa en el plano, encontramos dos tipos de espacios más, justo en el acceso a las mismas, los laboratorios de ensayos genéticos y una serie de despachos donde los científicos puedan aislarse y trabajar.

Las islas tipo 2, reflejadas en las imágenes, se corresponden con las cámaras de sustrato. Estas islas son menos numerosas pero de mayor tamaño que las tipo 1, al menos 3 veces el de las aeropónicas. Las islas tipo 2 se encuentran en el cinturón vegetal exterior, simplemente porque, al ser cámaras mayores, se aconseja situarlas lo más alejadas del centro para no concentrar muchas edificaciones en ese área. Al igual que la otra familia de islas, éstas se disponen de manera radial y nacen de un núcleo donde, aparte del sistema de control, se encuentran los despachos y laboratorios, ya que el tamaño de las cámaras lo permite.

Rodeando las islas y configurando un colchón verde en la ciudad, encontramos los invernaderos interiores. Estas grandes áreas de cultivo se pueden ir modificando con el tiempo, en caso de necesitar más superficie edificable. Este planteamiento hace referencia a que, en un inicio, la necesidad de viviendas será mucho menor que cuando la ciudad ya haya llegado a su edad madura, y por tanto, se podrá aprovechar del área no construida para disponer invernaderos. Como las comunicaciones en la ciudad no se hacen a través de ningún tipo de pavimento especial, sino que simplemente se conforman por la delimitación natural que ofrecen las plantas, se podrá reconfigurar el trazado de las comunicaciones en función de las necesidades, a juicio del organismo competente. Técnicamente, estas instalaciones solo implican un especial cuidado en el trazado de los canales de irrigación que permitan un riego adecuado.

Por último, solo queda hablar de los invernaderos exteriores. Estas estructuras surgen cuando se haya conseguido el calentamiento del planeta y cuando la colonia haya alcanzado un nivel de desarrollo suficiente, es decir, cuando las condiciones permitan disponer de un sistema de riego líquido o algún sistema basado en el transporte de hielo para el riego. En Marte, una temperatura de aproximadamente -5°C permitiría que el agua en circulación no se congelara fácilmente y, por tanto, irrigar los cultivos (siempre mediante un sistema enterrado para mejorar la inercia). Los invernaderos, que cubrirán grandes extensiones de terreno, se proyectan en bambú y plástico PHB. El bambú, manufacturado en el interior de la ciudad, se dispondrá en unas zapatas sobre rasante de hormigón para impedir que el viento se lleve la estructura.

## 8. Localización y desarrollo urbanístico.

### a. *Implantación geográfica.*

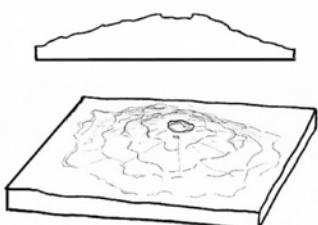


Figura 8

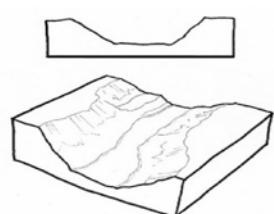


Figura 9

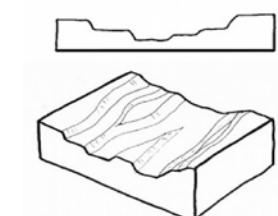


Figura 10

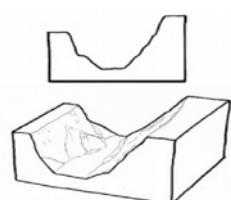


Figura 11

Teniendo en cuenta la topografía del planeta, se han desarrollado varios tipos de posibles morfologías de asentamiento en función de los diferentes escenarios que se pueden presentar. Según los múltiples datos que se tiene de la superficie marciana, se han creado 10 tipos de situaciones topográficas: los volcanes, túneles de lava, *Vallis*, *Chasma*, *Fossa*, *Chaos*, *Rupes*, *Scopulus*, mesetas, colinas y cráteres.

Es necesario apuntar determinados aspectos de ciertas estructuras naturales para una mejor comprensión de la estrategia a seguir. Comenzando por los volcanes, son formaciones similares a las terrestres pero con una diferencia básica sobre todo en los denominados *Mons*, este tipo de volcán se caracteriza por un cono de pendiente muy suave. Se podría llegar a decir que es como una gran colina de formación volcánica. Los *Vallis*, *Chasma*, *Fossa* y *Chaos* son estructuras del tipo valle, pero se diferencian principalmente en la agresividad de la erosión mediante la cual se formaron. Los primeros son los equivalentes a un valle terrestre; los segundos, los *chasmata*, son unos valles profundos de gran extensión y con unos límites muy inclinados; los terceros, *fossae*, son el tipo más suave de valle que se encuentra; y por último, *chaos* es la designación que recibe un sistema laberíntico de valles (*vallis*, *chasma* o *fossae*) que se entrecruzan y forman pequeñas mesetas. Los anteriormente mencionados *rupes* y *scopulus* son formaciones verticales idénticas a los acantilados en su formación. La diferencia entre ambos radica en la irregularidad de la pared, siendo los primeros los más

uniformes, mientras que los segundos son más desiguales. El resto de formaciones, las mesetas, los cráteres y las colinas tienen una estructura idéntica a sus homónimos terrestres.

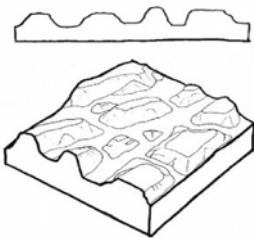


Figura 12

La doctora Joanna Kozicka desarrolla en su tesis las diferentes formas de poder habitar cada uno de los diferentes casos. No es objeto de este capítulo la explicación

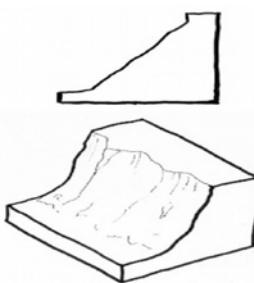


Figura 13

de los mismos, sino su valoración crítica de cara a establecer la viabilidad de la primera ciudad. Siguiendo la estructura del trabajo de J. K. se encuentra, en primer lugar, el caso de una base en terreno llano (por ejemplo una de las muchas *planitias*). Esta localización permite una buena comunicación de la ciudad con La Tierra, ya que los transbordadores disponen de una extensión de terreno liso más que suficiente para aterrizar, la capacidad de recibir luz solar es máxima ( $360^{\circ}$ ) y las conexiones con otros puntos muy sencillas de llevar a cabo. En contraposición, encontramos que estas instalaciones requieren de un aporte de material excesivo, las estrategias de protección frente a la radiación deben de ser muy eficaces y la base está expuesta a las inclemencias del tiempo, así como al impacto de cualquier cuerpo celeste.

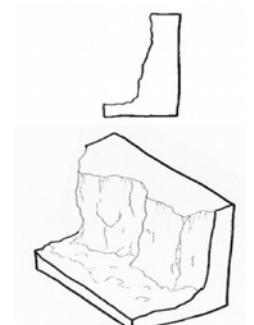


Figura 14

El segundo caso que nos presenta la doctora es la posibilidad de construcción sobre un terreno en pendiente, el cuál aporta una protección natural mayor o menor en

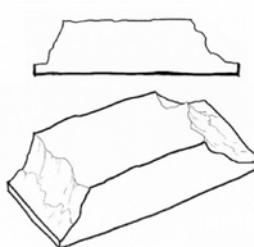


Figura 15

función de la inclinación. Las ventajas de este grupo son muy dispares en función de múltiples factores, como por ejemplo, la decisión de acceder por la base de la pendiente o por la zona superior. Decisiones como cubrir por completo el complejo, o por el contrario, diseñar un sistema de espacios excavados interconectados, así como la decisión de horadar o no mayores volúmenes de terreno, implican un mayor aprovechamiento de la topografía, y por tanto, una consecuente disminución de la problemática y del coste. Sin embargo, las desventajas también son mayores. La principal desventaja es la necesidad de excavar y de asegurar el terreno para que éste sea capaz de albergar vida y resistir las sobrepresiones que se le solicitarán. La propia Kozicka avanza que el déficit de iluminación natural debe tenerse en cuenta, y que por tanto, debe de plantearse un sistema de *skylights* capaz de llevar luz natural al interior, o en caso contrario, asumir la gran demanda energética derivada de iluminar artificialmente.

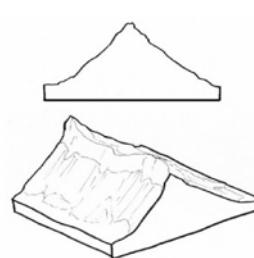


Figura 16

La tercera familia de hábitats que se plantean en la tesis son las construcciones dentro de colinas, un estilo muy

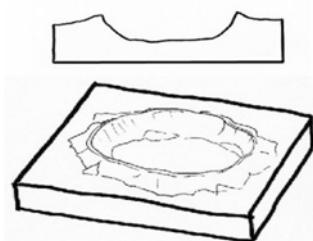


Figura 17

similar al anterior con la ventaja de que se puede aprovechar un frente de hasta 360° si se manipula la colina entera, tal y como propone la arquitecta. Otro de los posibles puntos a favor de una colina frente a una pendiente es que la colina tiene el potencial de convertirse en un cascarón hueco habitado, lo que disminuye de forma importante la sensación de claustrofobia. No obstante, está claro que el coste de vaciar una colina para que se pueda aprovechar el 100% es tan elevado que convierte esta opción

en una vía nada plausible de habitar.

Existen todavía en la obra de la doctora dos tipos más de posibles estrategias, como son la construcción dentro de un cráter o en los límites de un valle. Ambas opciones aportan unas paredes naturales perfectas de cara al viento y a las tormentas, y la sencillez constructiva reside en crear una tapa que permita habitar un agujero o franja, mientras que la desventaja principal es la continua radiación que le llega. Tanto en uno como en otro, se plantea la posibilidad de combinar la estructura central con espacios excavados en los límites. Otro punto en contra de estas estrategias es la localización de un cráter lo suficiente pequeño como para albergar una comunidad de humanos sin recurrir a maquinaria muy específica para

poder cubrir la gran luz de un cráter, o la de encontrar un valle cuyas dimensiones no requieran de El último grupo del que se habla en el documento creado por J. K. son los hábitats situados en los *chaos*. La gran ventaja de estas formaciones es que se pueden combinar todas las ventajas de los anteriores tipos, ya que presentan todas las

posibles situaciones. Para ello la autora diseña un esquema que mejora la consolidación de los espacios, que permite aprovechar la luz del sol, a la vez que facilita la protección frente al tiempo. Sin embargo, al igual que las anteriores familias, este tipo de construcción posee una serie de desventajas, como la dificultad de acceso a la base, así como la comunicación con las lanzaderas. La necesidad de excavar un terreno tan peculiar puede acarrear dificultades técnicas considerables y estar limitado por la orografía a espacios enterrados más pequeños que en las opciones anteriores.

El análisis de la casuística elaborado en la tesis de la doctora Kozicka es bastante adecuado, pero no se hace referencia al escenario de los túneles de lava. En su favor puede argumentarse, que, como estas estructuras no se conocen bien, no son una opción plausible en las primeras

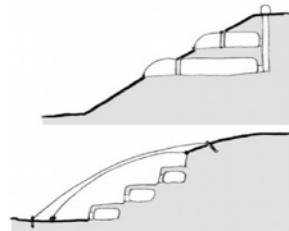


Figura 18

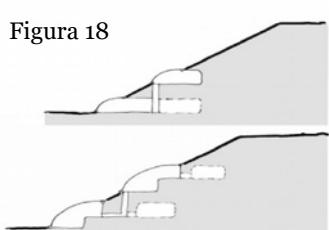


Figura 19

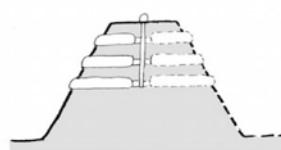


Figura 20

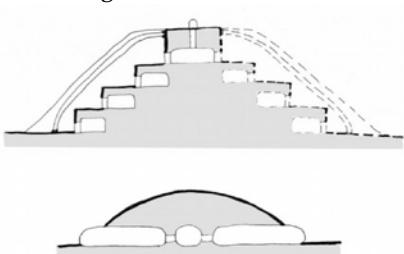


Figura 21

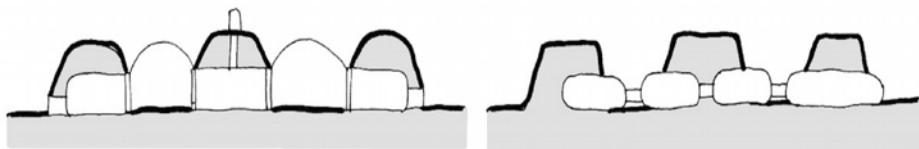


Figura 22

etapas del establecimiento de la comunidad humana marciana. Sin embargo, esta situación toma peso en la tercera y última fase del “proceso colonizador”, y por tanto, el autor del trabajo ha considerado relevante su análisis.

La morfología interna de un túnel de lava marciano se desconoce por el momento, y de lo único que se tienen datos fehacientes es de las dimensiones de los *skylights* que dan acceso a ellos. A pesar de la falta de información, se puede plantear un sistema de habitarlos basado en el estudio de los existentes en La Tierra, ya que la formación de ambos es idéntica. Cabe recalcar que los túneles volcánicos presentan una serie de beneficios frente a cualquier estructura excavada. El primero de ellos, sin ir más lejos, es que cuando por artificio se excava una determinada masa de tierra, los límites de la excavación han de asegurarse de cara a posibles hundimientos. Este tipo de peligros son casi anecdóticos en los túneles, ya que la solidificación de la lava por las paredes crea una capa resistente equivalente a la que tendría que construir el hombre en una excavación. Es decir, estas estructuras tectónicas ofrecen todas las ventajas de cualquier construcción enterrada y además permiten un mayor aprovechamiento de los recursos, puesto que son elementos consolidados durante millones de años.

Al igual que cualquier estrategia sometida a crítica, los túneles tienen un número de desventajas, las mismas que veíamos previamente en cualquier instalación enterrada, con el añadido de un acceso complejo. Hasta ahora solo se tiene constancia de que estos túneles son accesibles desde los *skylights*, que son unas aperturas en el terreno muy profundas y de gran tamaño. Las dimensiones de estos accesos conllevarían realizar un cierre total del agujero, siguiendo una estrategia similar a la empleada por J. K. en los cráteres y sumándole el problema de tener que descender entorno a los 100 metros. Aunque los cráteres y los *skylights* son similares en tanto a beneficios y problemas, se ha observado que la radiación no incide de la misma manera. Esto se produce debido a que la profundidad de las aperturas en los túneles es tal, que la radiación rebota por las paredes de los mismos disipándose en gran medida antes de llegar al suelo, a pesar de que muchos de ellos reciben luz directa del sol en el fondo del agujero, gracias al radio que alcanzan<sup>38</sup>. Por último, queda apuntar que en el presente se han desarrollado sistemas de mapeo y escaneo 3D para poder conocer mejor el interior de estas estructuras, a la par que los satélites que orbitan el planeta se dedican a buscar accesos horizontales al sistema de túneles, ya que como nos demuestra nuestro planeta, estos existen.

De todas las diferentes estrategias de construir una ciudad en Marte, el autor del trabajo considera que la más óptima, por diversas razones, es la de habitar un túnel de lava. Algunas de ellas son, por ejemplo, el natural cobijo que ofrece el túnel frente a la radiación, la temperatura (menos gasto de energía en calefactar los espacios como

<sup>38</sup> Los *skylight* de mayor tamaño de los que se tiene constancia alcanzan los 200 metros de diámetro y una profundidad de 176 metros. No obstante la relación anchura-profundidad no es equivalente en todos ellos, pudiendo variar de forma notable.

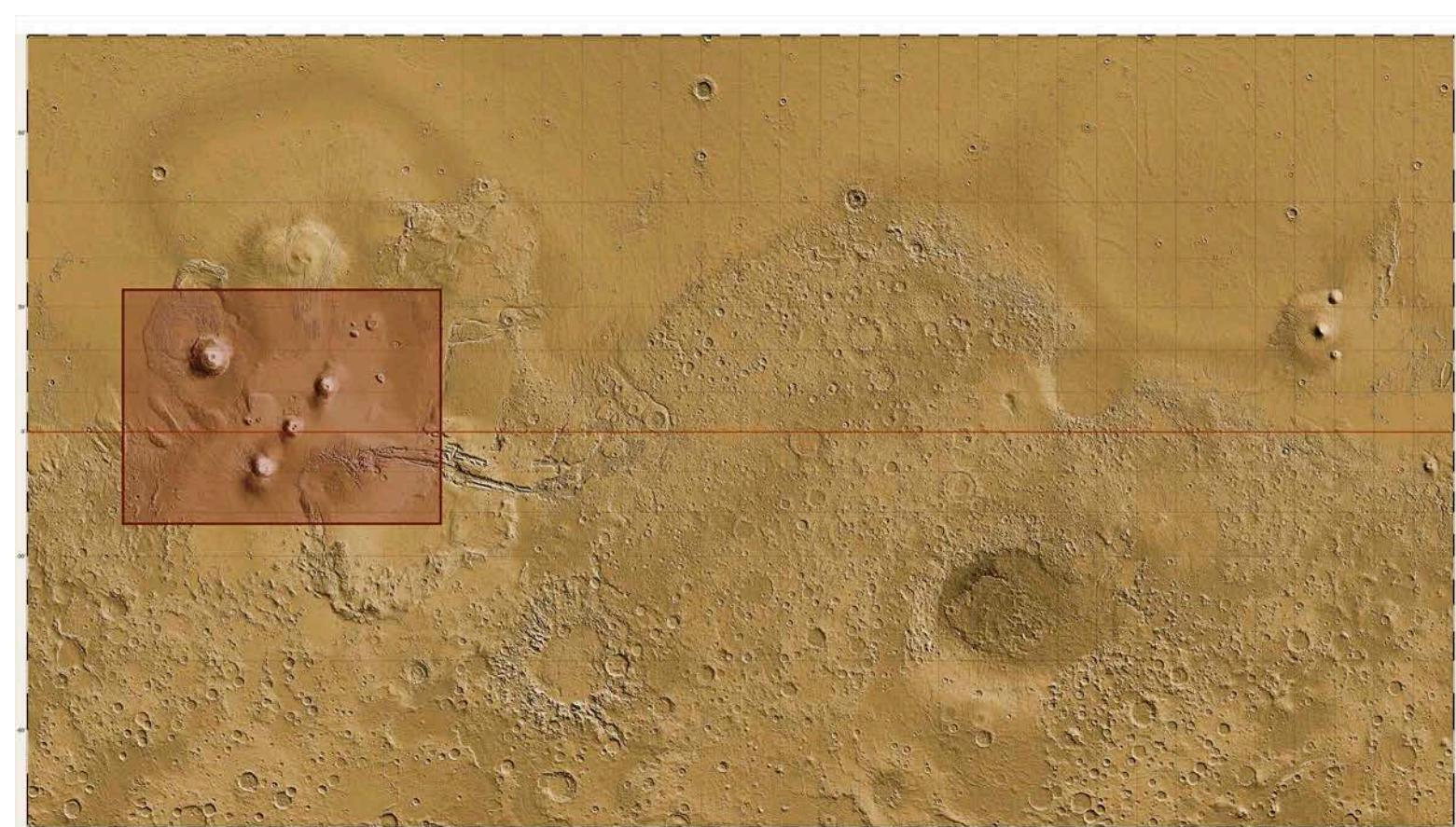
consecuencia de la mayor inercia) y el tiempo; la aparente necesidad de menos recursos y maquinaria, ya que se suprime las labores de excavación; y las dimensiones de los mismos, ya que basándonos en las mediciones de los L se pueden intuir su tamaño. Es cierto que plantean problemas, pero tras una valoración exhaustiva y basándonos en las teorías que muestran medios de divulgación científica de primer orden, como National Geographic, se concluye que las dificultades que estos presentan serán abarcables en el transcurso de no muchos años.

Una vez elegida la estrategia a seguir, se procedió a la elección del lugar de implantación. Para ello, se buscaron *skylights* en zonas en pendiente (lo que aumenta las posibilidades de encontrar accesos no verticales), en zonas volcánicas, en latitudes cercanas al ecuador y en zonas con agua. La razón de situarse en un franja “tropical” no es otra que la de perseguir una mayor temperatura ambiente, mientras que lo que ha motivado la preferencia de entornos volcánicos es la extracción de agua del sustrato<sup>39</sup>. La ultima razón de peso por la que se ha elegido esta situación geográfica viene derivada de la publicación por parte de la NASA de un mapa de agua subterránea, donde a la cartografía del planeta se superpone una cartografía que muestra los porcentajes de agua contenidos bajo tierra.

Habiendo tenido todas estas consideraciones en cuenta, el autor del trabajo seleccionó como situación potencial de establecimiento de la ciudad una extensión de terreno al noroeste del *Arsia Mons* y al sureste del *Pavonis Mons*, en la región conocida bajo el nombre de *Tharsis* o Meseta de *Tharsis*. Esta situación permite la incorporación de plataformas de lanzamiento con relativa facilidad, y además, es una de las zonas de mayor interés científico.

De cara a afrontar el tema de habitar los túneles de lava presentes en esa región, se plantea una primera fase para su sellado completo, estrategia un tanto ambiciosa, pero cuyos beneficios sobrepasan significativamente su dificultad. En posteriores puntos del trabajo se observará de manera más detallada cómo se produce este sellado, aunque se puede ir avanzando que se basa en las técnicas de impresión 3D con hielo y con hormigón. El hielo se destina a cerrar el *skylight*, puesto que es el agua, y no otro elemento, lo que mejor aísla de la radiación, mientras que el hormigón se destina al sellado del tubo, tanto por el interior como por el exterior (en los casos de acceso horizontal). Con motivo de la escasa información a disposición del común de la población, se plantea una hipótesis de trabajo basada en los datos al alcance del autor, en la cual se habita un túnel de lava hallado gracias a un *skylight* de 140 metros de diámetro y una profundidad de 60 metros. Se presupone que dicho túnel tiene un acceso horizontal a una distancia de 700 metros y una morfología interior como la que se muestra en la Figura 27. La iluminación de la colonia se pretende llevar a cabo con un sistema LED, similar al empleado en las cámaras de cultivo, para que los seres humanos puedan beneficiarse en cierta medida de la incidencia de una luz solar artificial.

<sup>39</sup> Estudios como el de la Universidad de Indiana apuntan a la capacidad de los minerales piroclásticos de absorber agua, gracias a su porosidad. Por ello, si se puede obtener agua del sustrato, esta extracción será más efectiva cuando el sustrato se compone de elementos como las zeolitas y los basaltos.



CARTOGRAFÍA DE LA SUPERFICIE DE MARTE

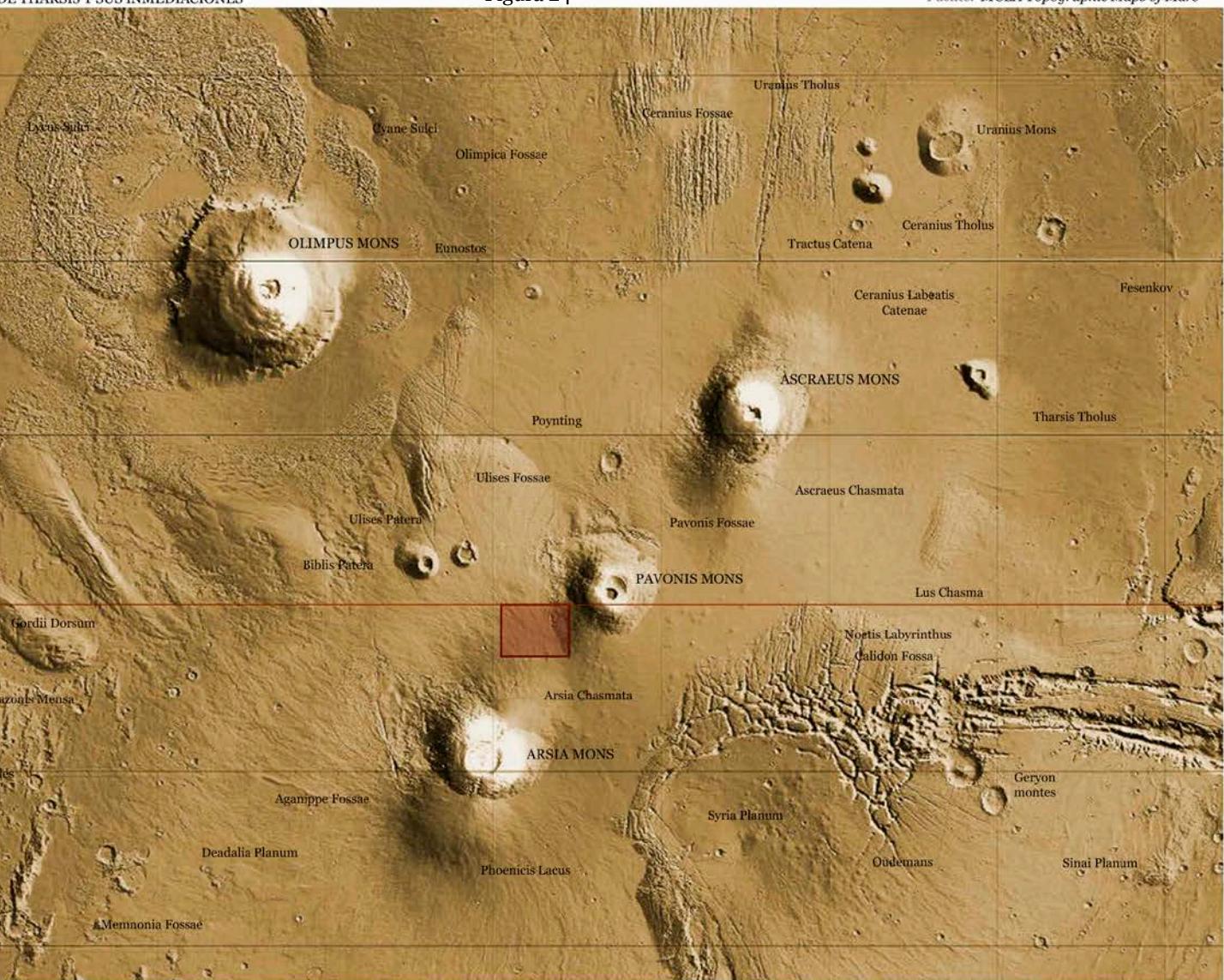
Figura 23

Fuente: *MOLA Topographic Maps of Mars*

REGIÓN DE THARSIS Y SUS INMEDIACIONES

Figura 24

Fuente: *MOLA Topographic Maps of Mars*

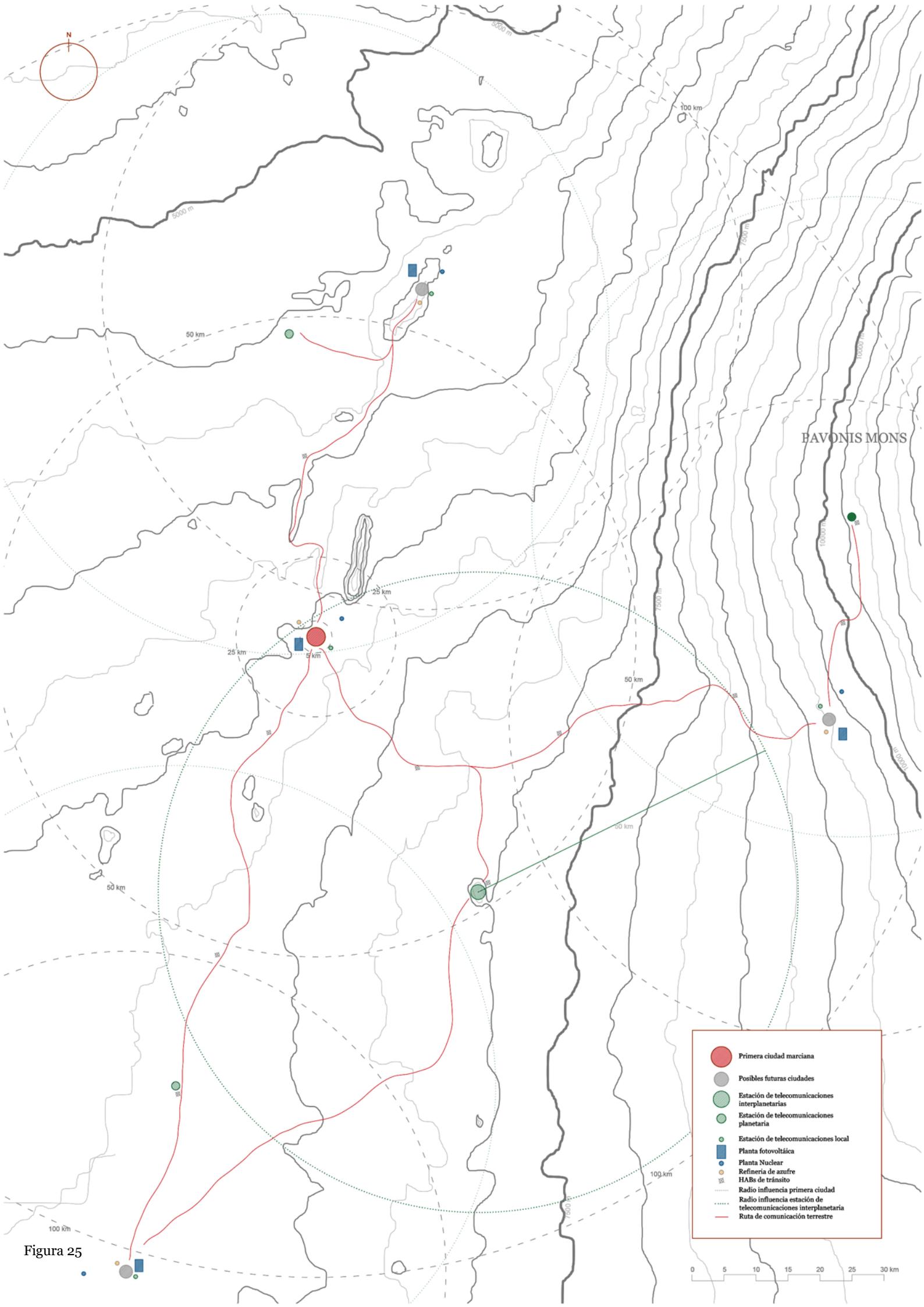


## **b. Recursos y su integración en la ciudad.**

A lo largo de este capítulo se analizará la adaptación de las instalaciones básicas para el sustento de la ciudad al escenario seleccionado. Se comentarán las diferentes fuentes de energía que se plantean y se hará una breve aproximación de su dimensionado. Posteriormente, se analizarán las conexiones tanto radiofónicas como terrestres y se esbozará un posible sistema de relaciones entre estaciones. Será objeto de este apartado la comprensión del *Life Support System*, ya que forma parte crucial de la supervivencia. Por último, plantearemos un sistema de aprovechamiento de la energía solar para la calefacción del complejo subterráneo.

En lo que respecta a las fuentes de energía eléctrica, se ha de diferenciar entre las renovables y la energía nuclear. La principal fuente de energía que se plantea es la solar fotovoltaica. Se escoge ésta de entre las otras posibles energías de origen solar por su carácter horizontal, su coste y su fácil instalación. Cuando se habla de fácil instalación de un tipo de energía solar frente a otras, lo que se está valorando es la complejidad del sistema, de su transporte y de sus características morfológicas. A día de hoy existen dos tipos principales de energía solar, la fotovoltaica y la térmica. Dentro de la térmica encontramos dos morfologías diferentes, por un lado las centrales de torre (descartadas por la dificultad de levantar la torre), y por otro, las de captadores solares cilíndrico-parabólicos (descartados por la fragilidad de sistema de espejo y su gran tamaño). En la otra cara de la moneda tendríamos los paneles fotovoltaicos cuya instalación en el lugar puede ser meramente una fijación en el suelo, puesto que en la latitud donde se encuentra la ciudad los rayos inciden casi perpendicularmente. La dificultad que plantean los paneles es básicamente la de encontrar una explanada de terreno lo suficientemente grande para poder acoger la planta fotovoltaica, y la de almacenar la energía excedente durante el día para poder seguir surtiendo a la ciudad de luz durante las horas de noche. Este segundo inconveniente ya deja de ser un problema, puesto que empresas como Tesla han desarrollado baterías de carga rápida y alta capacidad. Llegado el punto de calcular las dimensiones de la instalación, se ha de tener en cuenta que la irradiancia que le llega al planeta es de  $588,45 \text{ W/m}^2$ , lo que permitiría producir, aproximadamente,  $0,8 \text{ GWh/año}$  por cada megavatio instalado.

La energía nuclear es otra de las fuentes candidatas para instalar en el planeta. La razón es meramente la de tener un *back-up* en caso de fallo de la instalación solar o en caso de largas temporadas de tormentas. En la actualidad se piensa únicamente en la energía nuclear de fisión, ya que todavía no se vislumbra un futuro próximo donde la fusión tenga lugar. La central de fisión conlleva un problema que no da la energía solar, y es que una vez montada, con cierta periodicidad han de llegar remesas de material radioactivo para el buen funcionamiento de la misma, así como la salida de los residuos producidos, que no deberían ser enterrados. Sin embargo, hemos de apuntar que el tamaño de este reactor es mucho más reducido que el de la planta fotovoltaica, y por lo tanto, de mejor adaptación en el lugar elegido. No obstante, ambas centrales se proyectan en el exterior del túnel a una distancia prudente en caso de fallo.



Es cierto que en los inicios del trabajo se consideraron otras fuentes de energía, como la geotermia o la eólica, para el sustento de la comunidad. Sin embargo estos planteamientos fueron desechados rápidamente. La primera de las fuentes se descartó por la poca certeza que tienen las agencias espaciales de que sea una fuente capaz de mantener una ciudad, debido a que no se conoce a día de hoy el comportamiento geotécnico del planeta. Mientras que la segunda de las fuentes fue desestimada como consecuencia de las leyes físicas y la economía. Es cierto que el viento en Marte existe y que las ráfagas son muy intensas en algunos puntos, pero la realidad es que el aprovechamiento de la energía que éste genera no es ni de lejos comparable a los números que se obtienen en La Tierra, debido principalmente a la gravedad principalmente. En consecuencia, el bajo rendimiento que tendría una central eólica y el tamaño que requeriría (mucho mayor comparado con la fotovoltaica) hacen de esta fuente una opción poco aconsejable. Por último, se descartaron centrales Leidenfrost debido a la precariedad a día de hoy de esta tecnología, pese a ser una potencial fuente de energía en el futuro, ya que si algo abunda en Marte es CO<sub>2</sub><sup>40</sup>.

El siguiente punto a comentar es el relacionado con las comunicaciones, tanto terrestres como radiofónicas. Marte tiene un retraso de 20 minutos en la comunicación con La Tierra, por lo que se debe prestar especial atención a la localización del centro de telecomunicaciones. Este factor ya se tuvo en cuenta a la hora de seleccionar la localización de la ciudad, pensando en que latitudes más ecuatoriales y grandes altitudes mejoran la conexión del planeta con los satélites cercanos. Por ello, la estación de comunicaciones se encuentra en el exterior del complejo y en el punto de máxima elevación en un radio máximo de 50 km. Esta distancia permite, en caso de incidente, disponer en cuestión de horas de un equipo de técnicos que solvente dicha incidencia.

La cuestión de los radios abarcables en un día tiene que ver con la capacidad que tienen los habitantes de moverse por el lugar. En principio, en la localización seleccionada, debido a la relativa uniformidad de terreno, esto no se antoja problema. Sin embargo, la ciudad marciana no estará sola durante mucho tiempo, sino que de manera paulatina irán surgiendo nuevas *poleis* por todo el planeta. Las carreteras son elementos que tardarán en llegar, por lo que los viajeros dependerán completamente de los sistemas de geolocalización. Esta dependencia deriva en la creación de *outposts* capaces de abarcar un área determinada, cuya combinación permitirá una conexión constante en cualquier punto de la red. Se entiende que estas áreas estarán confinadas dentro de circunferencias de 100 km de diámetro. Con cada nueva antena y para soslayar posibles contrariedades, será necesario un pequeño espacio habitable con los requerimientos que dichas instalaciones tendrían. No solo un *outpost* radiofónico requiere de un HAB en sus inmediaciones, sino que cualquier instalación que diste más de la distancia anteriormente comentada, necesitará de la dotación de determinados usos, como una LSS, una pequeña fuente de extracción de agua y un mini reactor para abastecer de electricidad los sistemas.

Las centrales eléctricas no solo alimentarán los sistemas de extracción de agua y las comunicaciones, sino que entre otros usos, también alimentan los LSSs. Es de capital importancia un buen reciclado de todos los recursos presentes en la ciudad, desde los materiales y la energía hasta las deposiciones humanas. De entre las

<sup>40</sup> Investigadores de la universidad de Northumbria trabajan con motores Leidenfrost empleando, más que un líquido, hielo seco; es decir utilizando CO<sub>2</sub> congelado.

funciones que realizará el sistema de soporte vital, encontramos el tratamiento del aire del complejo, que se lleva a cabo en conjunción con los cultivos de producción de oxígeno. El sistema sería el encargado de hacer llegar CO<sub>2</sub> a las plantas al ritmo que estas son capaces de convertirlo en O<sub>2</sub>, de manera que se esté liberado constantemente oxígeno en los espacios habitables. Determinadas áreas cultivadas que no se hallen localizadas entre los demás usos pueden destinarse únicamente a la producción de O<sub>2</sub> en un circuito controlado que potencie la generación en mayores cantidades<sup>41</sup>. No obstante, no hemos de perder de vista que el sistema también se encarga de reciclar el aire interior, del mismo modo que hace el de la Estación Espacial Internacional. El sistema de soporte vital también es el encargado de reciclar los residuos generados por la comunidad. El objetivo de este reciclaje es el de la obtención de fertilizantes para los cultivos. Como ha de perseguirse siempre la autosuficiencia, el LSS ha de estar conectado con todos los diferentes puntos de generación de desperdicios. Para ello, se plantea una red de saneamiento eficaz que sea capaz de aglutinar en un punto dichos desechos, tanto humanos como vegetales.

Posteriormente, en el capítulo referente a la arquitectura, se tratarán temas relativos a materiales de construcción, pero debe avanzar que el principal material es el hormigón de azufre, el cual se produce en el mismo planeta gracias a las refinerías instaladas. Estas instalaciones no tienen una complejidad constructiva alta y tampoco emplean tecnología muy especial, pero han de preverse en la planificación de la ciudad, puesto que sin ellas no hay ciudad. Se plantean unas plantas de refinado de azufre exteriores a los túneles, alejadas como máximo a una distancia de 5 km para que el transporte del material sea rápido y se pueda cubrir la demanda casi de inmediato. Las centrales de refinado estarán conectadas a las plantas de abastecimiento eléctrico de la ciudad, al igual que el resto de sistemas, exceptuando las unidades de tratamiento del aire, que deberán ser independientes.

Llegados a este punto, queda tan solo analizar el aprovechamiento de la luz solar para la comunidad. Para ello se plantea una estrategia cada vez más demandada por los gobiernos terrestres, que no es otra que los colectores solares. Estos elementos, similares a los paneles fotovoltaicos, están conectados a un circuito de agua que se encuentra en constante movimiento y que permite calefactar espacios. La tecnología implicada en el proceso puede no plantear un problema en La Tierra, pero sí puede plantearlo en Marte, ya que, a efectos de aislamiento térmico, no se dispone de los mismos materiales que existen aquí. Sin embargo, este sistema de producción de calor es potencialmente mejor candidato que, por ejemplo, los paneles fotovoltaicos para su manufacturación en el planeta de destino. Por ello, se ha puesto un énfasis particular en diseñar una red especial para la ciudad marciana.

Analizando el funcionamiento interno de los colectores solares, se hace evidente que basta con disponer de superficies oscuras que absorban el calor y por las cuales discurre agua. Como el agua era un elemento que no se puede emplear en estos procesos, se apunta la posibilidad de emplear geles especiales o líquidos refrigerantes. Sea el conductor térmico que sea, éste deberá circular bajo tierra (para que ésta hagas

<sup>41</sup> Ejemplo de algunas de estas instalaciones podría ser el proyecto conocido como *Urban Space Station* del estudio de arquitectura OSS, donde se incluye el profesor de la ETSAM Ángel Borrego Cubero.

las veces de aislante térmico) por una red de tuberías, que se proyectan en hormigón<sup>42</sup>. Todavía a día de hoy no se conoce el alcance que tendría este sistema, y por ello se ha determinado que para su mejor eficacia, éste debería darse en combinación con un sistema de calefacción eléctrica. Es necesario apuntar que todas las consideraciones relativas a la obtención de calor para la calefacción son perfectamente extrapolables a la generación de ACS. Falta señalar que la localización de estos sistemas captadores de energía se plantea en el exterior de los túneles.

### **c. Estructura y crecimiento de la ciudad.**

Una vez se tienen claros qué elementos se sitúan fuera del túnel y cuáles no, se puede realizar una estructuración de los elementos interiores. Partiendo desde el acceso y a lo largo de toda la longitud del túnel, encontramos diez franjas perfectamente diferenciadas: la primera corresponde al acceso, la segunda al cordón exterior de parques, la tercera a espacios de vivienda, la cuarta al cordón verde interior, la quinta, denominada ágora, se corresponde con el *skylight*, la sexta forma parte del cordón interior, la séptima son usos de vivienda, la octava es el cordón exterior, la novena es el sellado interior y la décima las plantas de extracción de agua. Es necesario resaltar que no se ha diferenciado una franja de espacios de trabajo específica, puesto que, en función de su naturaleza, éstos estarán dispersos por el túnel y mezclados entre los usos.

La primera franja, el acceso, comprende una variedad de elementos muy amplia, pero lo que la caracteriza es que conforma la frontera de la ciudad con el exterior. Dentro de este sector encontramos el sellado, un elemento masivo a base de hormigón de azufre y regolito que, mediante unos *airlocks*, permite el tránsito entre el exterior y el interior. Existirán dos tipos de *airlocks*, los de dimensiones humanas y otros, más grandes, que permitan la entrada de los *rovers* de transporte y cualquier otro objeto de gran tamaño. En la zona de la frontera encontramos una serie de usos

<sup>42</sup> La tecnología de impresión 3D que se emplea en diversos procesos, permite la creación de tuberías de hormigón con una sencillez abrumadora y además a porta la ventaja de que en caso de rotura, con simplemente desenterrar y volver a imprimir, quedaría solucionado el fallo.

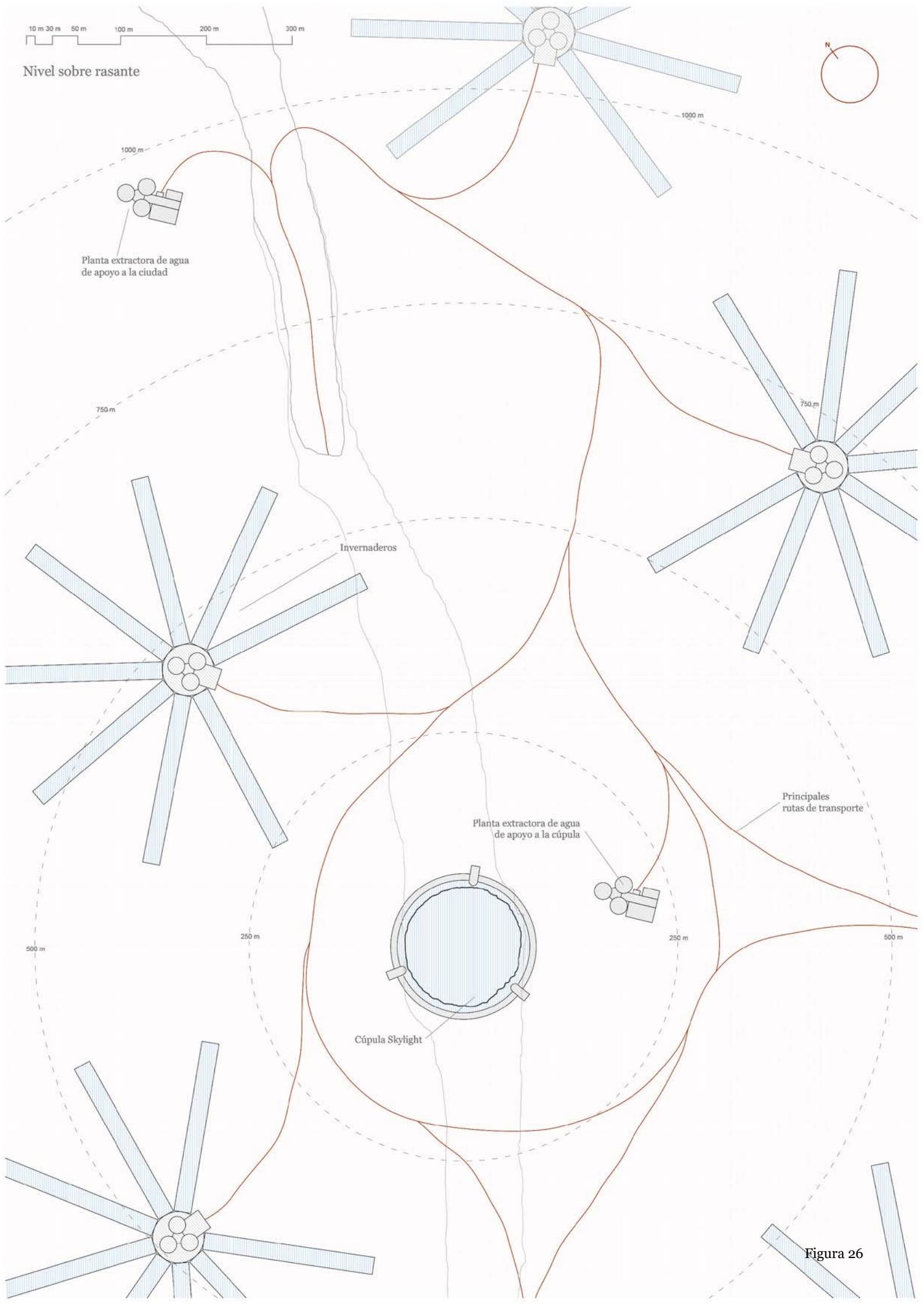


Figura 26

subyugados a dicho objeto, como son los talleres mecánicos y de carpintería y los laboratorios científicos. Es obvio que los talleres han de estar lo más cercanos al acceso como sea posible, para que cualquier elemento que pueda sufrir una avería sea reparado con cierta brevedad. La presencia de laboratorios científicos en este sector viene dada por su proximidad al exterior. Una de las razones por las que se pretende habitar Marte es por entender mejor la galaxia y el planeta, de forma que la localización de los laboratorios hacia el exterior facilitaría las labores de toma de datos, documentación del entorno, además de mejorar considerablemente el intercambio de información con el resto de estaciones científicas repartidas por las inmediaciones de la ciudad. Falta decir que en este sector se concentran las equipaciones necesarias para cualquier salida al exterior, los garajes para la maquinaria y los depósitos de material constructivo.

A continuación del acceso encontramos el cordón exterior de parques. Este sector está compuesto por los invernaderos interiores<sup>43</sup> y las áreas de investigación agronómica. Este sector tiene una extensión suficiente para poder desarrollar la cantidad necesaria de cultivos que se requieran, y además será donde se concentre la mayoría de los árboles. Dentro del cordón exterior encontramos las instalaciones necesarias para el buen desarrollo de las cosechas, como con las cámaras de sustrato y las aeropónicas, que estarán íntimamente ligadas a espacios de trabajo para los botánicos, ingenieros agrónomos y demás profesionales del sector. La segunda franja y la octava franja son en esencia lo mismo, aunque puedan producirse variaciones morfológicas.

Tras atravesar el cinturón verde exterior, aparece el primer sector de viviendas. Éste sector es, junto con los cinturones de cultivo, uno de los usos más extensos en planta, puesto que se busca obtener un buen grado de privacidad sin detrimento de las relaciones interpersonales. Se proyecta como un área de viviendas unifamiliares, que gozan de una serie de patios privados y que responden a una organización de barrio, concentrando en su seno usos de ocio y comercio a pequeña escala que focalicen la vida del barrio. En estos núcleos se incluye la presencia de escuelas para la educación de la población joven. La educación toma una relevancia transcendental, ya que los habitantes de este planeta no solo deben ser formados de la misma forma que los habitantes de La Tierra, sino que su nivel de especialización debe ser mucho mayor<sup>44</sup>. Dentro de estos barrios serán necesarios focos verdes, pequeñas áreas donde se aglutinen vegetales productores de oxígeno, como los CAM, de manera que estos espacios desahoguen en cierta medida los barrios. Dentro de los núcleos de barrio se disponen las instalaciones de comedor y cocina, ya que constructivamente es mucho más eficiente concentrar estos usos en un punto que permitir el desarrollo de estas actividades en cada una de las viviendas. Se ha de remarcar la importancia de que los habitantes no vivan en sectores próximos a sus áreas de trabajo, para potenciar la independencia entre la vida laboral y la familiar. Es necesario apuntar que esta estructuración de usos residenciales se corresponde con la tercera y la séptima franja de la ciudad.

<sup>43</sup> Véase capítulo de *Requerimientos agronómicos*, concretamente el apartado de metodología de cultivos.

<sup>44</sup> Robert Zubrin y otros impulsores de la colonización de Marte apuntan en sus obras la importancia de la especialización de los habitantes de dichas colonias. Concretamente en *The Case of Mars* se expone un posible plan de colonización donde la población se compone de una serie de profesionales concretos.



Una vez se ha atravesado el sector de vivienda, se desemboca nuevamente en un cordón vegetal, que en esencia, comparte su estructuración con el cinturón exterior, pero se diferencia de éste en que ahora predominan las plantas de pequeño desarrollo, con un número de árboles menor en relación con el resto de zonas de cultivo que se concentran en los límites de la franja urbana. En este sector, la proporción de cámaras de sustrato e invernaderos interiores se combinan en una relación de 50-50 o 60-40. El objetivo de esta distribución de cultivos es la de proporcionar un espacio verde de conexión, donde los habitantes sea conscientes de la importancia de estas instalaciones a la vez que disfrutan de la riqueza vegetal de su ciudad y forman parte de ella. Las franjas cuarta y sexta pertenecen a este grupo.

Tras avanzar por el cordón interior se llega al corazón de la ciudad, el ágora. Este sector se corresponde con el *skylight* del túnel y es donde se concentran las entidades que permiten la vida en la ciudad, como por ejemplo, el gobierno, el hospital y los centros superiores de enseñanza. Es en esta zona de la ciudad donde se produce la mayor interacción de los habitantes, motivado por la concentración del sector servicios. Este espacio se diseña a modo de núcleos satélite entorno al centro, donde se encuentra el gobierno y la plaza principal. Esta plaza es lo que caracteriza este núcleo central, más que el hecho de que el gobierno resida allí. Este área se proyecta como la conjunción de diversos vegetales que requieran poca agua, de forma se asegure un corazón verde de manera permanente. Se plantea incluso un pequeño sistema de canales para irrigar las áreas con plantas y favorecer, de esta manera, el bienestar de los visitantes de este espacio. A continuación del parque central encontramos los núcleos satélite donde se suceden las diversas secciones del hospital, las escuelas superiores, los despachos profesionales, los medios de comunicación internos, así como los espacios de ocio y diversión. Es importante señalar que el ágora atraerá a los habitantes debido a su iluminación natural, y por tanto, debe ser el espacio más cuidado en cuanto a detalles. Ahondando en la configuración del *skylight*, hay que resaltar la incorporación de una serie de plataformas construidas en bambú y hormigón que permitan el ascenso de los habitantes hasta la superficie. Una vez allí, encontramos un espacio de pasarela sobre el cual se coloca la cubierta de hielo que protege el interior frente a la radiación. En este espacio tendrán lugar labores de acceso a la comunidad y en él se encontrarán localizadas (en el exterior de la cubierta) las instalaciones necesarias para el mantenimiento de la cubierta.

A continuación del ágora y en dirección al interior del túnel se suceden los sectores seis, siete y ocho, hasta llegar a la franja nueve, denominada sellado interior. Al igual que la primera franja establecía una frontera necesaria entre el interior y el exterior, ésta, sin embargo, simplemente cierra el conjunto, de manera que se pueda aclimatar el complejo de la ciudad de una forma más eficiente sin tener que calentar el tubo entero. De la misma forma que en el primer acceso, aquí también encontraremos *airlocks*, al igual que espacios de taller y garaje para maquinaria. Este sellado dispone de estos usos para poder trabajar en el décimo sector de forma adecuada. Una peculiaridad que diferencia el sellado interior del exterior es la presencia de las plantas de licuado del hielo incluidas en el propio muro, donde además se llevan a cabo labores de control de la calidad del agua. En la cara interior del muro y a continuación de las plantas licuadoras encontramos las reservas de agua de la ciudad.

La última franja de la ciudad se corresponde con la extracción de agua. En este punto se plantean dos opciones que se diferencian por la presencia de hielo puro en el interior del túnel en la primera y su ausencia en la segunda. En ambos casos, lo único que cambia es el sistema de extracción, ya que el primero simplemente requerirá trabajos de corte y transporte del hielo hasta el sellado interior, donde puede almacenarse por la cara no climatizada del mismo, para transformarlo en agua líquida con arreglo a la demanda. En el segundo de los casos, lo que habrá en el interior del túnel serán robots encargados de extraer agua del sustrato y de transportarla hasta el acceso. Si se diese este caso, el sellado exterior de la ciudad dispondría, además, de otro batallón de robots productores de agua y de una planta de licuado.

Finalmente, solo queda establecer un criterio de cantidad de habitantes por urbe. Es obvio que todos los diferentes sistemas que permiten la vida se dimensionan en función del volumen de habitantes que allí residen y del tamaño del túnel. En este trabajo se viene aplicando el criterio de que la ciudad no dispondrá de más de 10.000 habitantes, número que permite una urbe de tamaño considerable donde la gente tenga la sensación de vivir en una gran ciudad, sin que ésta demande unas cantidades de recursos desproporcionados. Además, a priori parece plausible que un túnel sea capaz de dar cobijo a semejante número de habitantes. Por ello, en esta investigación se plantea que cuando una ciudad esté próxima a alcanzar este número de habitantes, rápidamente se pongan en marcha los mecanismos necesarios para fundar una nueva y se pueda así poblar el planeta entero.

## 9. Soluciones arquitectónicas de la ciudad.

### a. **Materiales de construcción.**

Se viene avanzando a lo largo de todo el trabajo que el material de construcción que principalmente se empleará en la futura ciudad marciana es el **hormigón de azufre**. Este material no se ha descubierto recientemente, sino que ya en la década de los años setenta se comenzó a estudiar debido a sus excelentes propiedades, como el alto grado de reciclaje (el 100% de estos hormigones son perfectamente reutilizables), sus propiedades químicas frente a los ácidos que atacan al hormigón convencional, así como las excelentes propiedades mecánicas. Hoy en día este material no se emplea en la construcción salvo situaciones muy excepcionales, principalmente por su vulnerabilidad frente al fuego, debido a que el elemento principal, el azufre, funde a 140°C. No obstante, en la actualidad se suele dar con mucha asiduidad, por ejemplo, en labores como el refrendado de probetas para ensayos mecánicos, en el refuerzo de estructuras portuarias bajo el nivel del mar y en la creación de redes de saneamiento urbanas enterradas.

A pesar de que el material se conocía y se empleaba, no se tuvo en cuenta como potencial material de construcción para el caso de Marte. Es cierto que para la luna se tomó en consideración desde mediados de los años noventa<sup>45</sup>, pero no es hasta principios del año 2016 cuando se empiezan a publicar estudios y artículos científicos donde se comprueba numéricamente la viabilidad de utilizar este material en Marte. Anteriormente se comentó el trabajo de la investigadora Lin Wan, doctora en «*structural engineering and infrastructure materials*», donde se documenta el aumento considerable de las propiedades mecánicas de este tipo de hormigón en combinación con áridos marcianos. En el trabajo de la doctora Wan se llega incluso a determinar cuál es la proporción de conglomerante y agregados más adecuada para alcanzar la mayor resistencia<sup>46</sup>.

En los capítulos iniciales, donde se hablaba de este material, se apuntó que el refinado del sulfuro en el planeta de destino no es una dificultad inabordable. De hecho, es perfectamente realizable. El problema surge en el momento de la construcción. La vía que actualmente se emplea en La Tierra para la construcción con cualquier tipo de hormigón se basa en verter el material en un encofrado y mantenerlo inmóvil hasta que

<sup>45</sup> Véase trabajos como *Production of Lunar Concrete Using Molten Sulfur*, Husam A. Omar y Mohsen Issa, 1994; o como *Feasibility and Applications of Sulfur Concrete for Lunar Base Development*, Ignasi Cassanova, 1997.

<sup>46</sup> En el trabajo llevado a cabo por el equipo de la Universidad de Northwestern se demuestra que una mezcla de sulfuro y áridos marcianos del 50-50 consiguen alcanzar una resistencia a compresión de 20 MPa.

se produzca por completo el fraguado del mismo. El proceso de fraguado, debido a la temperatura ambiente en Marte se realizaría mucho más rápido, sin embargo, la presión atmosférica impide que se pueda realizar la acción del vertido, a no ser que tanto el vertido como el fraguado se produjese en un ambiente controlado. Esta situación, obviamente convierte al hormigón de azufre en un material nada práctico para su empleo en Marte. Es en este punto donde la tecnología de impresión 3D nos permite construir sin tener que recurrir al estado líquido del elemento.

Las técnicas más comunes de impresión en hormigón funcionan como si de una manga pastelera automatizada se tratara. Son instrumentos que vierten hormigón de rápido fraguado formando hiladas superpuestas que dan lugar a una forma concreta. Sin embargo, existe una técnica denominada *Sinterizado Selectivo por Láser*, una tecnología basada en la proyección de un láser sobre una superficie en la que se disponen capas de polvo del material con el que quiere construir<sup>47</sup>. Este láser consigue, en cuestión de milisegundos, fundir la capa de polvo adquiriendo ésta la forma deseada. Posteriormente y gracias a las sucesivas repeticiones del proceso se obtiene el objeto buscado. Esta tecnología, de radical novedad, actualmente monta en el mismo objeto todos los elementos necesarios para la impresión, que son 3 principalmente. El primero es un rodillo conectado al depósito de polvo, que es el encargado de dispersar una capa de este material, sobre la superficie de impresión. Dicha superficie consta de una plataforma unida a un pistón, que disminuye la distancia necesaria para poder aplicar una nueva capa de polvo. Por último está el láser, calibrado de tal forma que solo afecte a la capa de polvo más superior. La impresora a día de hoy está muy limitada en dimensiones, sin embargo, numerosas entidades trabajan para, en un futuro, poder construir elementos muy diversos. La dificultad radica, principalmente, en poder separar el rodillo de la plataforma del láser para montarlos en uno o varios robots, de tal forma que se puedan imprimir grandes áreas de manera completa y rápida. Como consecuencia de la SSL, la dificultad de construir en Marte se reduce a refinar azufre, obtener áridos, molerlos y cagarlos sobre los depósitos de los rodillos.

Antes de comentar cualquiera de los materiales de construcción pensados para Marte, se ha de apuntar que el hormigón de azufre, junto con la tecnología SSL, permiten la creación desde viviendas hasta canalizaciones de agua para el regadío, con la ventaja de que, en caso de rotura de algún elemento, con simplemente repasar la zona mediante polvo y láser se puede arreglar en cuestión de minutos.

El segundo de los materiales de construcción pensados para la futura ciudad, es el plástico, concretamente el **PHB**. Según apuntan las agencias espaciales, no se conocen trazas de petróleo o similares que permitan la obtención de plásticos en el planeta. Sin embargo el PHB es un plástico obtenido a través de bacterias, seres vivos que no requieren de mucha oxigenación para sobrevivir y que se alimentan de carbono. El descubrimiento de esta fuente de producción de plásticos se remonta a escasos 6-7 años, y desde entonces se han estudiado intensamente para poder paliar la enorme demanda de plásticos que hay en La Tierra. Entre las cualidades del PHB se encuentran su alta biodegradabilidad y que no es perjudicial para la salud de los seres humanos.

<sup>47</sup> La tecnología de Sinterizado Selectivo por Láser (LSS por sus siglas en inglés), es capaz de imprimir en casi cualquier tipo de elemento, desde plásticos, a metales e incluso cerámicas. La única condición que se le exige a los materiales de impresión es poder ser convertidos en polvo. Tanto el azufre como los áridos pueden ser perfectamente molidos hasta la dimensión de grano que se deseé.

Los estudios y trabajos más recientes sobre las bacterias productoras de plástico han obtenido resultados abrumadores, como por ejemplo, la generación de 0,85 g de PHB por cada gramo de bacterias. Concretamente, la conocida como *Azotobacter*<sup>48</sup> es una bacteria que, aparte de producir PHB, genera grandes cantidades de biomasa y, además, amonio de manera natural, que podría emplearse como fertilizante en la futura comunidad.

El potencial de este material en el entorno marciano es increíble si se tiene en cuenta la gran cantidad de carbono presente en la atmósfera, la facilidad de cultivo de las bacterias en cuestión y la tecnología 3D<sup>49</sup>. El transporte de los organismos unicelulares es increíblemente económico, puesto que se reproducen a tal velocidad que se puede transportar un pequeño recipiente lleno de bacterias y dejar que en el destino se multipliquen. La única limitación para la producción de estos plásticos radica únicamente en la capacidad de cultivo de las bacterias en la ciudad. Sin embargo, la obtención de plásticos en las primeras etapas de la colonia no será necesaria, lo que permitiría una elevada optimización de los recursos.

El tercer elemento de construcción propuesto en la hipótesis de trabajo es el **bambú**. De todos los materiales planteados es éste el que más recursos requiere, sobre todo de agua. Se ha elegido el bambú por sus excelentes propiedades mecánicas, su rápido crecimiento, su tamaño y su facilidad de cultivo. Como anteriormente se comentó, la única desventaja de este material son las cantidades de agua que requiere. Sin embargo, esto no debería constituir un problema puesto que el agua ha sido eliminada de la mayoría de procesos y elementos para poder afrontar esta demanda. El bambú, si todo sigue su cauce y es modificado genéticamente, podría cultivarse en invernaderos exteriores o incluso sin la necesidad de invernaderos, lo que hace de él una planta excelente tanto para la construcción como para la terraformación. Es más, al igual que sucede con las *Azotobacter*, bastaría con importar una pequeña cantidad del vegetal y permitir que este se cultivase en destino para conseguir una independencia comercial con La Tierra, reduciendo así los costes de importación de materiales.

Finalmente, solo queda tratar el tema del **hielo**, el último de los materiales constructivos necesarios para el levantamiento del asentamiento. Aun teniendo la necesidad imperiosa de aprovechar al máximo el empleo del agua, el hielo se contempla como fuente constructiva en casos muy determinados, en definitiva, aquellos donde se requiera la entrada de luz y, a la vez, protección frente a la radiación. Esta cualidad deriva del elemento principal que compone el agua, el hidrógeno, un gas cuya estructura se reduce a un protón y un electrón. Justamente, las partículas que conforman la radiación son protones, y como bien apunta la NASA, la única manera eficaz de frenarlos es mediante partículas de su mismo tamaño: hidrógeno. La cuestión que quedaría por determinar es, entonces, la cantidad de hielo necesaria para poder alcanzar los niveles suficientes de protección frente a la radiación que requiere el ser

<sup>48</sup> El equipo formado por Carlos Felipe Peña y Daniel Segura, investigadores del IBt de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), están trabajando sobre esta bacteria y son los principales responsables de los avances en este campo.

<sup>49</sup> A diferencia de los plásticos refinados a partir del petróleo, el PHB se obtiene en forma de polvo granular, lo cual es extraordinariamente combinable con cualquier técnica de impresión plástica 3D.

humano. Para ello, hemos de tener en cuenta que llegan 3 mSv/año<sup>50</sup> de radiación cósmica a la superficie terrestre, mientras que en Marte se alcanzan con facilidad los 300 mSv/año. Los ganadores del concurso *3D printed Habitat Challenge*, con el proyecto *Mars Ice House*, hicieron un cálculo de que 20 cm de hielo son suficientes para frenar la radiación incidente. En el presente trabajo, se establece que si 20 cm de hielo son suficientes, una protección de 60 cm sería más que adecuada y no muy pesada para la hipótesis de trabajo elegida. El cálculo anterior hace referencia a la cubierta del *skylight*, una cúpula de hielo impreso sobre una estructura de bambú, que descansa sobre el suelo. Se decide ampliar de 20 a 60 cm la capa de protección puesto que, debido a la forma de la cúpula, un aumento de su masa permite consolidar la estructura de una manera más adecuada. Esta cúpula de 60 cm de grosor sería construida empleado robots de impresión 3D que, periódicamente, conforme el planeta se calienta irán realizando labores de manutención de la misma, hasta que finalmente no sea necesaria. La cúpula es capaz de mantenerse por su propio peso, de ahí su la forma. Sin embargo, los anillos y la unión con la base aseguran su óptimo comportamiento. Otra de las ventajas que aporta el bambú es su resistencia a la tracción, de forma que se puede generar una especie de “hielo armado”, mejorando las cualidades mecánicas de la cúpula<sup>51</sup>.

En principio, el empleo de estos cuatro materiales permitiría el desarrollo de la ciudad. Empleados todos en conjunción y de manera adecuada, se puede llegar incluso a poblar cualquier parte del planeta.

### **b. Criterios de diseño de los espacios.**

No es objeto de este trabajo diseñar un espacio de manera detallada, sino más bien determinar una serie de criterios clave en base a los cuales deben realizarse los futuros diseños, si bien la gran mayoría ya se han avanzado en anteriores apartados. Con este propósito se han analizado estudios psicológicos de comunidades reducidas y aisladas, de los cuales se destacan cuatro factores primordiales.

El primero de ellos son las relaciones entre humanos. Está comprobado que cuando una persona se encuentra viviendo en espacios confinados, controlados y rodeado de un número reducido de personas, ésta puede desarrollar depresión, insomnio, ansia, fatiga e inestabilidad emocional. Por ello, entidades del calado de Mars One estudian muy de cerca los retos psicológicos a los que se enfrentaran los primeros habitantes del planeta. Está claro que en una ciudad consolidada, las

<sup>50</sup> Los Sievert, es la unidad que mide la cantidad de radiación que absorbe la materia viva. Un Sievert es equivalente a un Julio entre kilogramo (J/kg). Como escala de magnitud hemos de recalcar que la exposición a 10 Sv conlleva la muerte en cuestión de minutos.

<sup>51</sup> Las cúpulas experimentan unos esfuerzos circunferenciales de tracción conforme se acerca a la base. Una manera de contrarrestarlos es aumentando la sección a medida que esta llega al suelo y la otra y más económica, desde el punto de vista del material, es introduciendo cerca de la base unos anillos de tracción que soporten estos esfuerzos.

consecuencias del aislamiento se verán reducidas pero no extintas, pudiendo desarrollarse algún trastorno de los mencionados en cualquiera de los habitantes. Ya se avanzó con anterioridad que uno de los mejores sistemas para evitar estos trastornos es fomentando la interacción entre los habitantes. Se expusieron posibles vías como la creación de núcleos de barrio, de parques, de corredores verdes y demás espacios de relación. Pero no todo se reduce a generar este tipo de espacios, si no que las relaciones humanas se pueden potenciar mediante actividades intelectuales y culturales, haciendo a los habitantes partícipes de la vida política de la ciudad y, sobre todo, aportando un nivel de normalidad adecuado, de forma que se perciba la ciudad marciana, a miles de kilómetros de distancia, como una más de La Tierra. Esto no hace más que redundar en la importancia de mantener un fluido intercambio de información entre ambos planetas.

Así como un buen nivel de relaciones es muy importante, igual de importante es un adecuado nivel de privacidad. Los seres humanos en muchas ocasiones necesitamos momentos de soledad, en los que focalizar nuestra mente en labores de trabajo, cuestiones relevantes para nuestra vida, etc. Esta necesidad se convierte en algo capital, cuando el sujeto en cuestión vive en un tipo de ciudad donde casi todo ocurre en espacios de pública concurrencia, como los comedores, las plazas, los parques, los centros de barrio y demás instalaciones. Esta situación puede derivarse en conductas agresivas e incívicas por parte de los habitantes. Para ello se dispone de un sector residencial basado en la estructura de vivienda familiar, donde cada individuo posea un espacio reservado para sí mismo. Estas viviendas pueden ser compartidas por todo tipo de colectivo social, desde familias tradicionales a grupos de amigos que comparten piso, y se las dota de espacios privados, como pequeños patios y salones. De igual forma, en los espacios de trabajo se dispone de despachos individuales para aportar un mayor grado de concentración y soledad. Como el tandem público-privado es tan importante, en la estructura de ciudad presentada el capítulo referente a urbanismo se pretende hallar una adecuada combinación de espacios privados y espacios públicos.

Analizando los diferentes espacios habitables de la ciudad se tiene que pensar en su intrínseca relación con las plantas, no solo a nivel urbano sino a nivel más de edificio. Escogiendo, por ejemplo, el caso concreto de una vivienda, ésta se ha de diseñar de forma que los patios o los espacios más públicos dentro de la misma sean principalmente verdes, mediante el uso de plantas CAM, si éstos fueran interiores, o mediante cualquier otro vegetal, si fuesen exteriores, de forma que siempre que se mire a través de un hueco se pueda tener la visión de un entorno “natural” y agradable. Si por el contrario tomásemos como referencia un espacio de trabajo, se plantea la posibilidad del uso de minicámaras de sustrato para realizar las comunicaciones del edificio, de forma que cuando un profesional requiere salir de su espacio de trabajo al aseo deba realizar esta transición a través de un pasillo verde. Con este tipo de conexiones se logra facilitar al cerebro una vía de escape que alivie la fatiga laboral. Sin embargo, en el caso de los profesionales de la agricultura, estas conexiones pueden hacerse a través de otro tipo de elemento que permita a la mente evadirse por unos instantes, como espacios al “aire libre” y pequeños salones de relax.

Como cuarto aspecto relevante a nivel psicológico se encuentran las relaciones laborales-familiares. Al decir familiares se entiende cualquier actividad fuera del ámbito del trabajo. Este punto es quizás uno de los más cruciales a la hora de aportar

normalidad a la vida de los habitantes, ya que será el factor que determine el alto o bajo nivel de relaciones humanas. La arquitectura puede contribuir a ello diseñando un tipo de ciudad donde las áreas de trabajo estén drásticamente segregadas de las de vivienda. Si hubiese que ser más radical incluso, en el ejemplo planteado del túnel se debería recomendar que los habitantes cuyos lugares de trabajo se encuentren en el centro de la ciudad vivan lo más cercano posible a los accesos a la misma, y aquellos que trabajen próximos al sellado interior deberían tener su residencia en el sector más alejado del acceso exterior. De esta manera pueden asegurarse las interacciones entre habitantes y la desconexión de la mente de los asuntos laborales. El único problema que puede plantear esta solución es que se generen guetos de colectivos profesionales. De ahí que se deba poner especial énfasis en intentar alcanzar la mayor interacción posible de profesionales dentro de un barrio residencial, abriendo de esta manera el abanico de relaciones que establece un individuo. Como culmen de esta teoría encontraríamos la posibilidad de, en un futuro, vivir en una ciudad y trabajar en otra, aunque para poder llegar a este estadío se requieren muchos años y muchos avances en el tema del transporte interplanetario.

### **c. Análisis de las fases constructivas.**

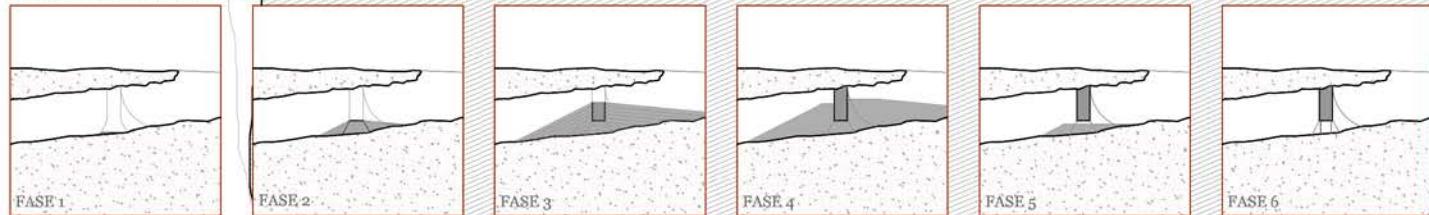
En el presente apartado se persigue explicar los procesos constructivos más complejos que puedan surgir en la ciudad, con el objetivo de establecer si la tecnología anteriormente explicada y las técnicas constructivas disponibles permiten una construcción estable, sólida y segura.

Los sellados tanto interiores como exteriores emplearan el regolito depositado de manera natural en los *skylights*, por lo que no se requerirá de maquinaria excavadora, sino que los robots-rodillo serán los que realicen estas labores de movimiento de tierras. Ha de entenderse que no se puede enviar un numero ingente de robots de construcción, por lo que se enviará el número que se considere apropiado, por parte de las agencias espaciales, para la construcción de los accesos exterior e interior. Las labores de construcción de los sellados no son simultáneas, sino que se suceden en el tiempo, a la vez que la construcción de la gran cúpula del *skylight*, iniciándose primeramente el arranque de hormigón de la cúpula y posteriormente los sectores de acceso.

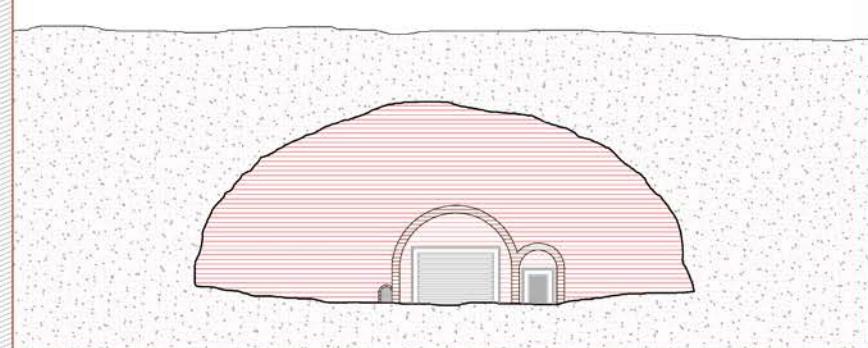
Continuando con los sellados, se ha de recalcar que se componen de regolito y hormigón, ambos impresos mediante SSL. Los robots semiautónomos que se pretenden emplear en la construcción de toda la ciudad son de dos tipos principalmente: robots que aportan el material<sup>52</sup> (rodillos) y robots láser que darán la cohesión buscada. Con

<sup>52</sup> Se plantea la posibilidad de que los robots encargados de distribuir el material estén equipados con un sistema de aspiración, de manera que se pueda reutilizar en futuros trabajos el material sobrante de las fases anteriores.

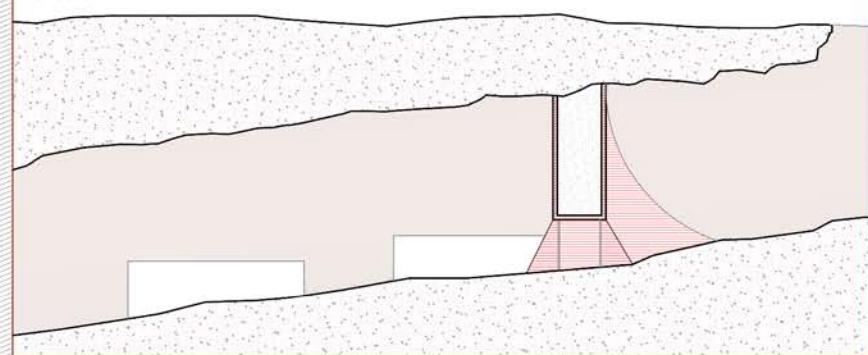
Secuencia fases constructivas del sellado exterior.



ALZADO: Sellado exterior



SECCIÓN AA



Punto de vista alzado

AA

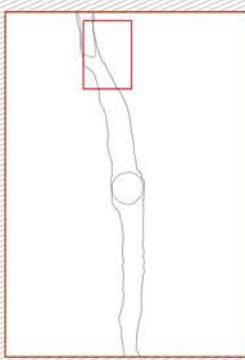


Figura 28

0 5 10 15 20 30 40 50 m

motivo de la técnica empleada, una vez concluya cada fase del trabajo, se deberá retirar el material sobrante, pudiendo ser reutilizado en los posteriores pasos. La primera fase se basa en la creación de unas bóvedas de hormigón, reforzadas mediante contrafuertes, que posteriormente albergaran los *airlocks* de acceso y los cuartos donde se instalaran las unidades de tratamiento del aire del *Life Support System*. Se plantea el uso de bóvedas de cañón, ya que a priori parecen las más adecuadas. Sin embargo, ya que el LSS nos permite diseñar cualquier tipo de bóveda, si por motivos de esfuerzos se requiriese otra morfología de bóveda, esta puede adoptar la forma más óptima.

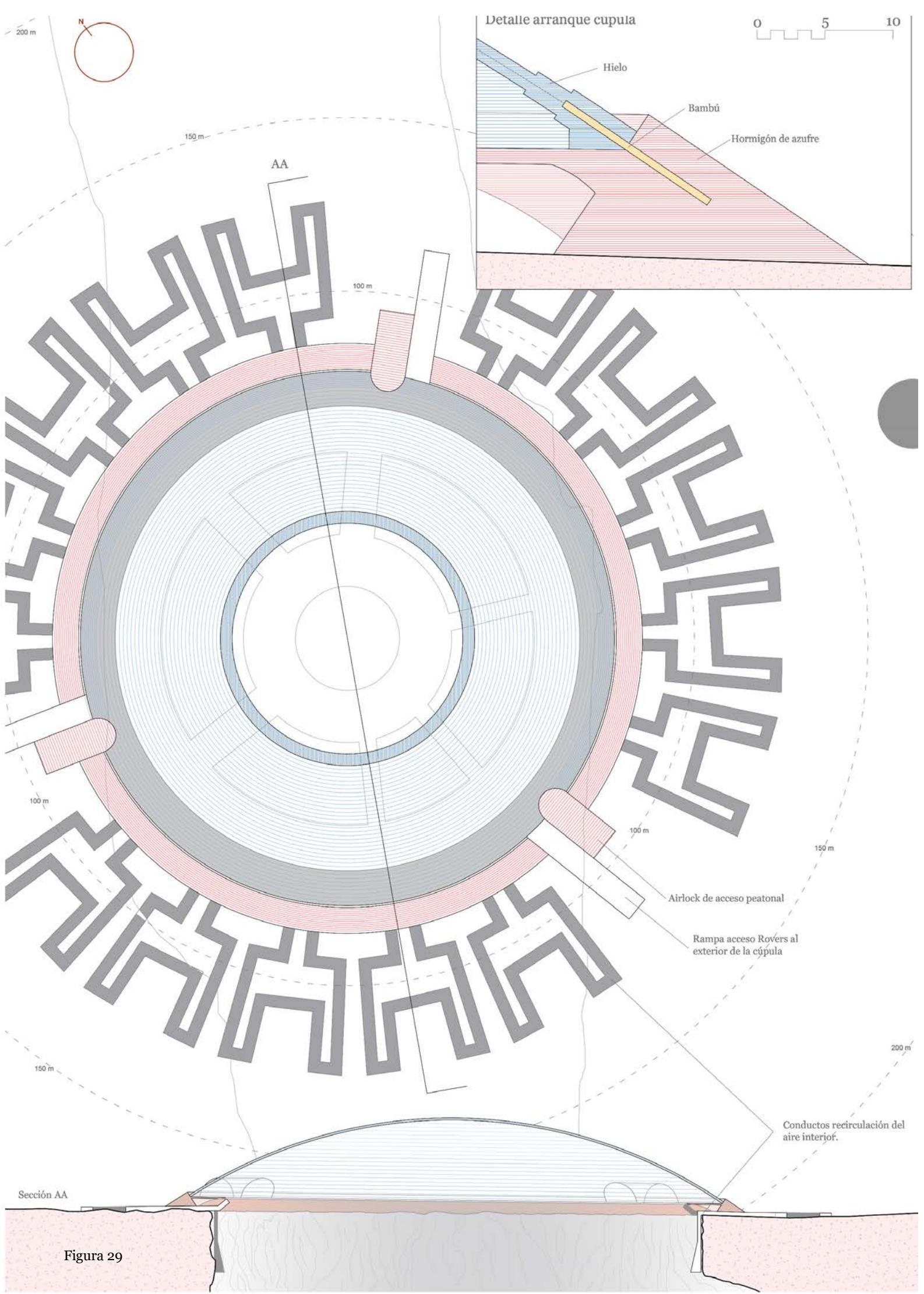
Al término de las bóvedas se procederá al relleno del muro. Para ello se dispone un sistema basado en un conjunto de rampas que permitan a los robots alcanzar la altura necesaria para poder ir imprimiendo el muro. Éste constará de unos cajones verticales de hormigón llenos de regolito, lo que mejorará su comportamiento estructural frente a los empujes internos de la sobrepresión. En caso de ser necesario, el exterior del muro puede reforzarse, pero si éste dispone de la anchura suficiente, estas ayudas no serán necesarias. El punto crítico se corresponderá con la culminación del muro, para lo que será necesario que los robots-rodillo empleen el sistema de aspirado para poder proyectar el relleno desde el exterior del muro hacia el interior, pudiendo después el robot-láser proyectar el rayo y darle consistencia. Con el muro finalizado, se procederá a la instalación de los *airlocks* y todo el sistema de iluminación y climatización, para poder presurizar la ciudad cuanto antes.

Se ha de destacar la previsión de pequeños túneles que permitan a los robots de construcción pasar del interior al exterior de la ciudad sin necesidad de abrir las compuertas principales. Para ello, se ha diseñado un garaje de robots dentro del muro capaz de presurizarse, de forma que cuando se necesita sacar algún robot, se pueda hacer de manera rápida, sin esperar turnos para pasar por una única compuerta de presurización.

El otro gran elemento con mucha presencia en la ciudad es la cúpula de hielo, cuya construcción, también mediante tecnología 3D, difiere de la de los sellados en que esté elemento necesita de un aporte de material desde La Tierra. El bambú empleado en los anillos de tracción tiene que importarse 100%, ya que sin la cúpula no se pueden establecer los humanos, y sin ellos no puede darse la agricultura. En lo relativo a la construcción encontramos 3 etapas: la primera se corresponde con la base y cimbra, la segunda con los anillos de bambú y la última con la culminación.

La base, que se construye en hormigón, tal y como se muestra en las ilustraciones, se trata de un anillo apoyado en el terreno y con una cara perpendicular a la pendiente de la cúpula. Dicha cara perpendicular posee una serie de orificios donde se introducirán estacas de bambú de unos 2,5 metros de longitud, que serán el elemento de unión entre el hielo y el hormigón. Una vez se tiene consolidado el arranque, se despliega la cimbra hinchable<sup>53</sup>, que permitirá a los robots desplazarse con libertad para proyectar el hielo. El elemento de base corrido dispone de unos accesos al exterior con su consecuente cuarto de instalaciones para el LSS, y además se aprovecha la cara superior de los accesos para proyectar un paseo perimetral que permita a los

<sup>53</sup> A pesar de que a lo largo del trabajo se ha apuntado a los inflables como una opción cara, es cierto que en el caso de una cimbra que deba cubrir 140 metros de luz, este sistema se convierte en el más barato. Además que una vez retirada la cúpula, puede reutilizarse para futuras operaciones de cimbrado, en otras partes del planeta.



habitantes contemplar el exterior a través del hielo. Encima de esta “cimentación” sobre rasante se comienza a imprimir hielo dándole la forma proyectada. En esta segunda etapa de construcción se aprovechará para introducir en el hielo los anillos de bambú. Las uniones entre troncos de bambú no tienen por qué hacerse mediante atado si se solapan lo suficiente. En la hipótesis que se plantea se han solapado 1,5 metros para poder así asegurar su comportamiento solidario. Una vez hemos pasado a la tercera etapa, ya solo queda continuar poniendo capas y capas de hielo hasta la culminación de la cúpula. Cuando esta se haya rematado, se procederá al desinflado de la cimbra y a la construcción de la pasarela peatonal, por debajo de la cual discurre el sistema de refrigeración del aire que permite que la cúpula no se derrita conforme se alcanzan los 21°C en el interior del túnel.

Es de vital importancia que el sistema de climatización de la ciudad sea capaz de hacer la extracción de aire del interior con la suficiente potencia para el que sistema de refrigeración por aire de la cúpula haga que el entorno de esta se mantenga a una temperatura inferior a los 0°C. En caso de no ser eficaz este cambio de temperaturas, la cúpula podría derretirse y requerir constantes labores de reparación y manutención, que serán más costosas en consumo de recursos que las labores de climatización. El gasto por enfriamiento del aire para la cúpula es casi nulo, si tenemos en cuenta que la temperatura exterior permitiría enfriar un aire recirculado desde el interior de manera extremadamente veloz. Estas conducciones de aire pueden hacerse en hormigón de azufre, de manera que todo el coste adicional recaería en la instalación de ventiladores que muevan el aire interior por el circuito. Este sistema de refrigeración se basa en el empleo de unas toberas de largo alcance que permitan cubrir una distancia de 50 metros (algo no muy lejano de la realidad, ya que actualmente las toberas de mayor alcance que existen se acercan a los 40 m). Estos elementos estarán dirigidos al centro de la cúpula, de forma que se genere un flujo de aire frío descendente por el centro del agujero, lo cual empujaría el aire caliente ascendente al perímetro. Es en este punto donde se sitúa la admisión de aire del sistema de las toberas, garantizando así un gradiente de temperatura entre la base del agujero y la cúpula. Se consideraron otras posibles vías de generar un gradiente de temperatura suficiente, como por ejemplo, la creación de una cortina de aire frío a escasos metros de la superficie que impidiese un flujo de aire caliente desde abajo. No obstante, esta vía acabó por considerarse poco coherente, debido a la maquinaria necesaria para abarcar tal superficie.

Por último, solo queda comentar un detalle relevante:, la construcción de los forjados para cualquiera de las edificaciones interiores. Estos se plantean como la combinación de bambú y hormigón, aunque en el primer estadio, donde el bambú aún no se ha desarrollado lo suficiente como para consumirse en gran cantidad, las construcciones serán todas abovedadas, de forma que todos los esfuerzos se conviertan en compresiones. Se entiende, por tanto, que no se construirán edificios de más de una planta hasta que se disponga de bambú, y que no existirán ascensores para poder subir al *skylight* desde la ciudad, por lo que la comunicación con éste se realizará a través del acceso exterior de la ciudad. En las ilustraciones se muestran algunos ejemplos de los temas relativos a la construcción de forjados, tanto en el caso de las cubiertas abovedadas como en el de los forjados de piso y cubierta planos.

## **TERCERA PARTE**



## *10. Conclusiones del trabajo.*

Alcanzado el final del trabajo estamos en disposición de analizar con el mismo juicio crítico con el que se venían sometiendo a examen las aportaciones de otros autores al trabajo, las conclusiones del mismo.

Primero se llevó a cabo un análisis de si Marte es verdaderamente una opción habitable en las cercanías de nuestro planeta. Posteriormente se procedió al entendimiento de la problemática que se deriva de las condiciones ambientales existentes, así como de la orografía de su superficie. Este ejercicio permitió determinar que la solución de habitar un túnel de lava, no solo proporciona un ahorro de materiales de construcción y maquinaria de excavación, sino que a su vez permite un alto grado de protección frente a la radiación y la temperatura exterior. Se ha comprobado que los escasos inconvenientes de esta situación frente a las demás presentadas son fácilmente abarcables, empleando para ello materiales de manufactura marciana, como son el hormigón de azufre, el hielo y el plástico PHB. Cómo apoyo de la teoría de la construcción in situ, se ha localizado técnicas de impresión que con unos leves ajustes permitiría una construcción rápida y eficiente en el destino.

El estudio en materia de energía permitió esclarecer cuales son las fuentes más apropiadas, e incluso se llegó a dar un ratio de lo que dicha instalación debería de cumplir. Así mismo, se ha intentado demostrar la viabilidad técnica del cultivo en Marte. La razón por la que gran parte del esfuerzo de investigación se puso en los vegetales, es la inviabilidad de mandar recursos alimenticios desde La Tierra, así como las enormes dificultades que implica la instalación de granjas en el planeta. Con objeto de no caer en errores nutricionales, se analizaron las diferentes dietas veganas intentando con ello, no solo determinar si una alimentación de este estilo es suficiente para el buen desarrollo de un ser humano, sino que también permitió esbozar qué organismos vegetales tendrían prioridad en el proceso colonizador. Se considera haber afrontado el problema del alimento de una manera hábil, pues se diseñó y planificó de tal manera que un mismo grupo de elementos, deriven en materia de construcción, alimento, fuente de oxígeno y, además, beneficie a la salud mental de los habitantes. Ejemplo de ello es por ejemplo la recurrente combinación de elementos vegetales entre las labores del día a día, que funcionando como focos de convergencia de la vida pública, mantienen el aire respirable, generan espacios y delimitan funciones. Es importante no olvidar la gran relevancia de las plantas en este trabajo, pues sin ellas ninguno de los otros apartados tratados tendría sentido.

Se considera que tras el empleo de determinadas tipologías constructivas se ha llegado al planteamiento de unas soluciones al alcance de la mano de los humanos que allí vivan. Tanto a nivel de creación como a nivel de mantenimiento de las instalaciones. Es necesario recalcar, también, que aunque los sistemas de construcción planteados son posibles, en la hipótesis se trabaja con una evolución del modelo de impresión SSL que a día de hoy no existe.

Así como que se piensa se han alcanzado los objetivos planteados, es sin embargo verdad, que en el transcurso de la investigación se han ido sucediendo una serie de factores que no han sido desarrollados con la misma intensidad que el resto del mismo. Esto, a juicio del autor no es una lacra del trabajo, sino una oportunidad para que futuros investigadores amplíen el presente trabajo en determinados campos, consolidando cada vez más la hipótesis planteada.

De entre los aspectos a profundizar, se pueden destacar fácilmente, la falta de análisis de los sistemas externos a la ciudad. Como bien pueden ser los *Outposts* de telecomunicaciones, o las plantas de refinado de sulfuro. Junto con esto, se cuenta también la falta de estudio de los sistemas de irrigación exteriores basados en hielo y no en agua líquida. A parte de esos dos aspectos, también ha quedado en el tintero el análisis de unos sistemas de generación de energía, como es la cogeneración y sus derivados, que unidos a las instalaciones de producción de plástico y las cámaras de cultivo pueden aumentar la eficiencia energética de estas disminuyendo consecuentemente el coste de la instalación global. Así mismo, ha quedado por concretar, donde y como se produciría el PHB en Marte, explotando al máximo sus posibilidades; como es la producción de biomasa por parte de las bacterias que sintetizan el plástico. Quizás, incluso el propio autor, echó en falta un análisis más exhaustivo y pormenorizado de los elementos arquitectónicos y sus relaciones con el entorno del túnel. Sin embargo se entendió que este esfuerzo en las etapas en las que se encuentra la carrera marciana era un empleo de recursos en temas no tan inmediatos como pudieran ser las técnicas constructivas *in situ*. Del mismo modo sucedió con el diseño de las instalaciones, de las cuales se habla muy de soslayo, y tan solo a modo de apuntalamiento de ejercicios más amplios (como el caso de la cúpula). Otro de los aspectos que el autor reconoce hubiesen podido tener un mayor desarrollo, es la distribución de los sistemas de irrigación presentes en toda la ciudad, sin embargo, al igual que con el diseño detallado de los espacio arquitectónicos, se optó por dejar este apartado abierto a futuras ampliaciones del trabajo.

Finalmente y teniendo presente todas las consideraciones anteriormente realizadas, se concluye que se ha alcanzado el objetivo último del mismo; que no era otro que desterrar del campo de la ficción la viabilidad de que en el transcurso de pocas décadas se establezca el ser humano en Marte de forma independiente y permanente. Se entiende ha quedado claro que si a día de hoy el hombre no habita Marte, más que por dificultades técnicas y tecnológicas, es por restricciones de carácter económico. También se ha remarcado la importancia del diseño arquitectónico en la carrera por habitar fuera de La Tierra. Algo que todavía quedaba pendiente, a pesar de que algunos arquitectos tratasen el tema con anterioridad. Recuperando la temática de la introducción, se podría decir que la *apoikia* del siglo XXI está a unos pocos decenios de distancia, pues los medios existen y tan solo necesitamos una “invasión doria” que nos empuje a habitar nuevas tierras.

## BIBLIOGRAFÍA



**11.1. Bibliografía citada:**

CASANOVA, I. (1997): **Feasibility and Applications of Sulfur Concrete for Lunar Base Development.** Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona

KOZICKA, J. (2008): **Architectural problems of a Martian baso design as a hábitat in extreme conditions.** Gdansk University of Technology.

MONTANELLI, I. (1959): **Storia dei Greci.** Rizzoli Editore. Milán. (“Historia de los griegos”, Debolsillo, Madrid, 2016).

NASA. (2015): **NASA’s Journey to Mars: Pioneering Next Steps in Space Exploration.** NASA. Washington.

ONU (2015): **World Population Prospects: The Revision of 2015.** Organización de las Naciones Unidas. Nueva York.

PETROV, I. (2004): **A permanent settlement on Mars: The architecture of the Mars Homestead Project.** Massachusetts Institute of Technology.

TEAM JFEET. (2001): **Water Extraction form Martian Soil.** Colorado School of Mines. Colorado.

VOLTAIRE. (1756): **Poema del desastre de Lisboa.** (VILLAR A. “Voltaire-Rousseau entorno al mal y la desdicha”, Alianza Editorial, Madrid, 1995).

WAN, L.; WENDNER, R.; CUSATIS, G. (2016): **A Novel Material for In Situ Construction on Mars: Experiments and Numerical Simulations.** Northwestern University

*11.2. Bibliografía consultada:*

ADAN-PLAZA, S.; CARPENTER, C.; ELIAS, L.; GROVER, R.; HILSTAD, M.; HOFFMAN, C.; SCHNEIDER, M.; BRUCKNER, A. (2012): **Extraction of Atmospheric Water On Mars.** Universidad de Washington.

BATES, S.; MARQUIT, J. (2006): **The Benefits of Plants: a review of the literature and application to habitation systems for humans living in isolated or extreme environments.** Utah State University.

FELDMAN, W.; PRETTYAN, T.; MAURICE, S.; PLAUT, J.; BISH, D.; VANIMAN, D.; MELLON, M.; METZGER, A.; SQUYRES, S.; KARUNATILLAKE, S.; BOYNTON, W.; ELPHIC, R.; FUNSTEN, H.; LAWRENCE, D.; TOKAR, R. (2004): **Global distribution of near-surface hydrogen on Mars.** Journal of Geophysical Research vol. 109. Agu Publications. Washington.

HUSAM, A.; MOHSEN, I. (1994): **Production of Lunar Concrete Using Molten Sulfur.** University of South Alabama, Mobile.

LINNE, D.; KLEINHENZ, J.; BAUMAN, S.; JOHNSON, K. (2016): **Extraction and Capture of Water from Martian Regolith: Experimental Proof-of-Concept.** NASA Glenn Research Center.

ZUBRIN, R.; WAGNER, R. (1996): **The Case for Mars.** Editorial Touchstone, Nueva York.

*11.3. Recursos digitales:*

[astrobiology.nasa.gov/news/water-on-mars-the-story-so-far/](http://astrobiology.nasa.gov/news/water-on-mars-the-story-so-far/) (Water on Mars: The Story so Far, NASA).

[ode.rsl.wustl.edu/mars/indextools.aspx?displaypage=molapedr](http://ode.rsl.wustl.edu/mars/indextools.aspx?displaypage=molapedr) (Mars Orbital Data Explorer).

[www.forbes.com/sites/brucedorminey/2014/12/09/5-top-landing-sites-for-a-manned-mission-to-mars/#3c7477bd3c18](http://www.forbes.com/sites/brucedorminey/2014/12/09/5-top-landing-sites-for-a-manned-mission-to-mars/#3c7477bd3c18) (5 Top Landing Sites for a Manned Mission to Mars, Forbes, 2014).

[www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/mars\\_plants.html](http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2005/mars_plants.html) (Designer Plants on Mars, NASA)

[www.nasa.gov/content/ZINNIAS-FROM-SPACE-NASA-Studies-the-Multiple-Benefits-of-Gardening](http://www.nasa.gov/content/ZINNIAS-FROM-SPACE-NASA-Studies-the-Multiple-Benefits-of-Gardening) (Nasa).

[www.nasa.gov/feature/goddard/real-martians-how-to-protect-astronauts-from-space-radiation-on-mars](http://www.nasa.gov/feature/goddard/real-martians-how-to-protect-astronauts-from-space-radiation-on-mars) (Real Martians: How to Protect Astronauts from Space Radiation on Mars, NASA).

[www.nasa.gov/feature/jpl/mars-ice-deposit-holds-as-much-water-as-lake-superior](http://www.nasa.gov/feature/jpl/mars-ice-deposit-holds-as-much-water-as-lake-superior) (Mars Ice Deposit Holds as Much Water as Lake Superior, NASA).

[www.nasa.gov/image-feature/jpl/pia21136/scalloped-terrain-led-to-finding-of-buried-ice-on-mars](http://www.nasa.gov/image-feature/jpl/pia21136/scalloped-terrain-led-to-finding-of-buried-ice-on-mars) (Scalloped Terrain Led to Finding of Buried Ice on Mars, NASA).

[www.nasa.gov/missions/science/biofarming.html](http://www.nasa.gov/missions/science/biofarming.html) (Farming for the Future, NASA).

[www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-evidence-that-liquid-water-flows-on-today-s-mars](http://www.nasa.gov/press-release/nasa-confirms-evidence-that-liquid-water-flows-on-today-s-mars) (NASA Confirms Evidence That Liquid Water Flows on Today's Mars, NASA).

[www.nasa.gov/vision/earth/livingthings/25feb\\_greenhouses.html](http://www.nasa.gov/vision/earth/livingthings/25feb_greenhouses.html) (Greenhouses for Mars, NASA).

[www.news.illinois.edu/blog/view/6367/430749](http://www.news.illinois.edu/blog/view/6367/430749) (scientist tweak photosynthesis to boost crop yield, University of Illinois).

[www.northumbria.ac.uk/about-us/news-events/news/2015/03/breakthrough-in-energy-harvesting-could-power-life-on-mars/](http://www.northumbria.ac.uk/about-us/news-events/news/2015/03/breakthrough-in-energy-harvesting-could-power-life-on-mars/) (Breakthrough in energy harvesting could power 'life on Mars", Northumbria University, 2015).

[www.northumbria.ac.uk/about-us/news-events/news/2017/02/northumbria-research-could-power-life-on-mars/](http://www.northumbria.ac.uk/about-us/news-events/news/2017/02/northumbria-research-could-power-life-on-mars/) (Northumbria Research could power life on Mars, Northumbria University, 2017).

[www.sciencealert.com/tomatoes-peas-and-8-other-crops-have-been-grown-in-mars-equivalent-soil](http://www.sciencealert.com/tomatoes-peas-and-8-other-crops-have-been-grown-in-mars-equivalent-soil) (10 crops grown on Mars Soil).

[www.wur.nl/en/article/QA-with-Wieger-Wamelink.htm](http://www.wur.nl/en/article/QA-with-Wieger-Wamelink.htm) (FAQs con Wieger Wamelik, Wageningen University).

[www.wur.nl/en/newsarticle/EDEN-ISS-How-to-cultivate-vegetables-in-space.htm](http://www.wur.nl/en/newsarticle/EDEN-ISS-How-to-cultivate-vegetables-in-space.htm) (EDEN ISS project, Wageningen University).

[www.wur.nl/en/newsarticle/SpacefarmingResource4June15.htm](http://www.wur.nl/en/newsarticle/SpacefarmingResource4June15.htm) (Farming in Space, NASA).

[www.wur.nl/en/newsarticle/The-Martian-becomes-reality-at-least-four-crops-grown-on-simulated-Mars-soil-are-edible.htm](http://www.wur.nl/en/newsarticle/The-Martian-becomes-reality-at-least-four-crops-grown-on-simulated-Mars-soil-are-edible.htm) (4 crops grown on martian soil are edible, Wageningen University).

#### *11.4. Ponencias:*

[www.spacex.com/mars](http://www.spacex.com/mars) (Ponencia del CEO de SpaceX, Elon Musk, durante el *67th International Astronautical Congress*.

