

PROGRAMA IBERDROLA INNOVA

XIII EDICIÓN 2021-2022

GUIA INTRODUCTORIA SOBRE EL TEMA “AGRICULTURA ESPACIAL”

DR. JOSÉ EDUARDO GONZÁLEZ PASTOR

Introducción

La agricultura espacial se refiere al cultivo de plantas que puedan emplearse para la alimentación de la tripulación de futuros vuelos espaciales de larga duración y de colonias humanas que se establezcan en otros cuerpos planetarios como la Luna o Marte. El suministro de alimentos es una de las limitaciones más importantes para el mantenimiento de pequeñas poblaciones humanas en estos ambientes. En el caso de la Estación Espacial Internacional, en órbita alrededor de nuestro planeta, es posible suministrar alimentos desde la Tierra con periodicidad, pero esto sería imposible en misiones de larga duración a otros planetas. Por otra parte, el transporte de toda la comida necesaria para la tripulación en este tipo de misiones sería prácticamente inviable. Por ejemplo, se ha calculado que se necesitarían casi 11.000 kg de comida para una tripulación de cuatro miembros en una misión de tres años en Marte, lo que supondría una carga excesiva y extremadamente costosa para un vuelo espacial. Por ello, se ha planteado la posibilidad de cultivar plantas de interés agrícola para reducir

considerablemente la cantidad de comida que se lleve desde la Tierra en esas misiones, y además supondría un aporte de alimentos frescos para la tripulación. Por otra parte, el cultivo de plantas sería relevante para establecer lo que se conoce como “Sistemas de Soporte de la Vida Autosostenibles” (Bioregenerative Life Support Systems- BLSS-) que sirvieran para mantener una comunidad humana de forma sostenida (sin necesidad de suministros externos de comida y oxígeno), en un ambiente hostil donde la vida no se puede desarrollar. Estos sistemas consisten en ecosistemas artificiales en los que se introducen plantas y microorganismos que permiten: i) producción de oxígeno, ii) fijación del dióxido de carbono, iii) purificación de agua, iv) reciclaje de residuos, y v) producción de alimentos. En estos sistemas se emplearían organismos fotosintéticos como plantas y algas que proporcionen biomasa para la alimentación y oxígeno, y también microorganismos que degraden y reciclen los compuestos de desecho generados por la actividad humana, así como los restos vegetales no empleados en alimentación.

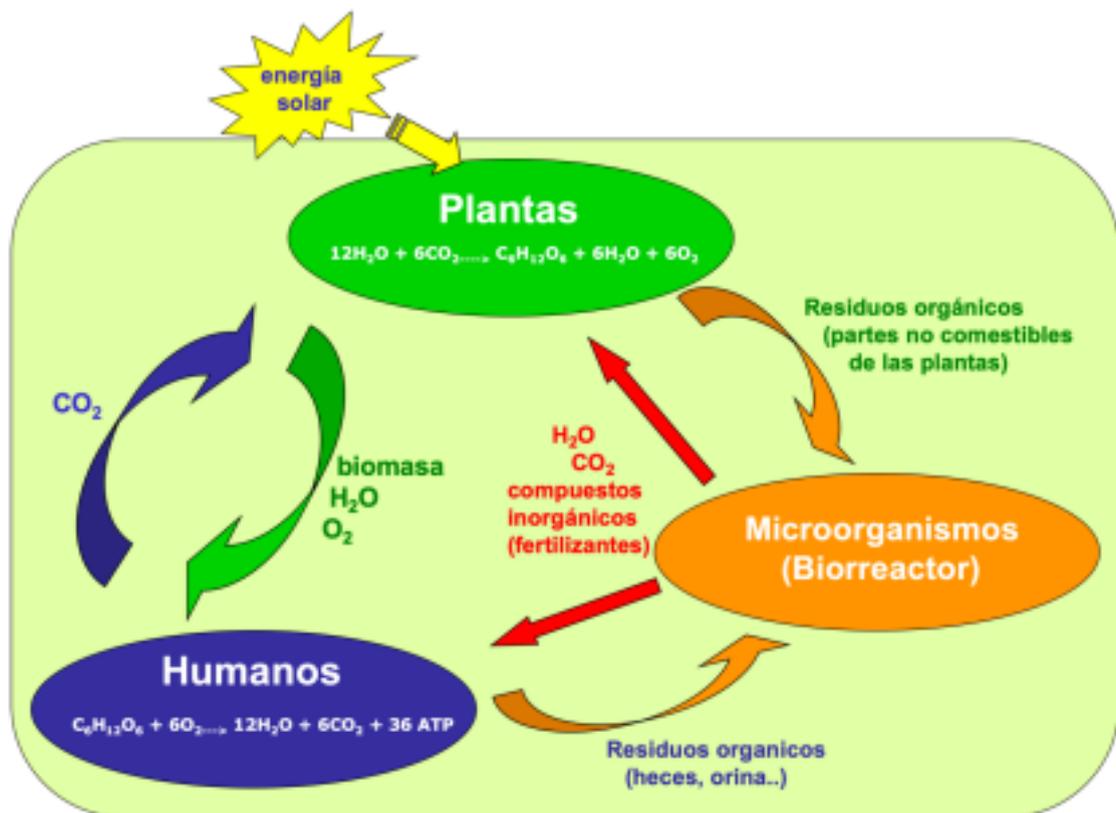


Figura 1. Esquema de un Sistema de Soporte de la Vida Autosostenible, con el único aporte externo de energía solar.

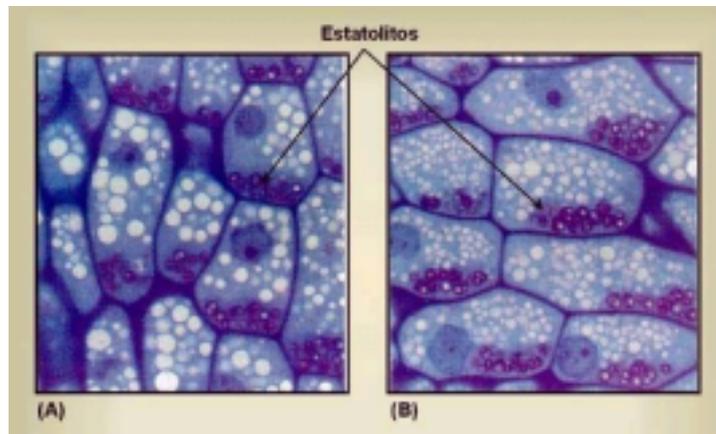
Este interés en el cultivo de plantas fuera de nuestro planeta, ha motivado a las principales agencias espaciales como la NASA, ESA y CNSA a promover diversas investigaciones para estudiar como el desarrollo de las plantas se puede ver afectado por las diferentes condiciones que existen en el espacio y en la Luna y Marte, que son los principales cuerpos planetarios en los que se ha propuesto el establecimiento de colonias humanas.

Problemas del cultivo de plantas en condiciones diferentes a las de la Tierra Las plantas han adaptado su desarrollo a las condiciones de nuestro planeta, en el que llevan habitando desde hace millones de años. Por tanto, su crecimiento en otras condiciones como las del espacio o de otras superficies planetarias se puede ver seriamente afectado, principalmente por dos condiciones para las que no están adaptadas: i) alteraciones en los niveles de gravedad y ii) radiación cósmica.

i) Alteraciones en los niveles de gravedad. Las plantas, como la mayor parte de los organismos de nuestro planeta, han evolucionado para adaptarse a una determinada fuerza de la gravedad que es específica de la Tierra y se denomina g . Esta fuerza se ha mantenido constante desde que se formó nuestro planeta. Las plantas presentan tropismos, que son movimientos respecto a un estímulo direccional. Concretamente, el gravitropismo hace que las raíces crezcan hacia la atracción de la gravedad y los tallos en contra. En las raíces de las plantas existen unas células especializadas que se denominan estatocistos, y dentro de ellas hay unos orgánulos que detectan la gravedad y se denominan estatolitos. Estos orgánulos se desplazan libremente por el citoplasma dependiendo de la dirección de la gravedad y cuando sedimentan

en la pared de la célula activan un gradiente de la hormona auxina, que es responsable de estimular el crecimiento de la raíz en dirección contraria a la gravedad (**Figura 2**). Si las plantas se desarrollan en ausencia de gravedad, como en los vuelos espaciales (microgravedad o gravedad cero), o con niveles de gravedad reducidos, como en Marte (0.375 *g*, 38% de la que tiene la Tierra-) o en la Luna

(0.166 *g*, 16,6% de la que tiene la Tierra-), el gravitropismo no funciona correctamente, ya que los estatolitos no se desplazarían correctamente dentro de la célula para detectar la gravedad, y eso conduce a un desarrollo anómalo de las plantas. Este efecto es más acentuado en el caso de microgravedad, ya que los estatolitos no sedimentarían en las paredes, sino que estarían moviéndose libremente dentro de la célula.



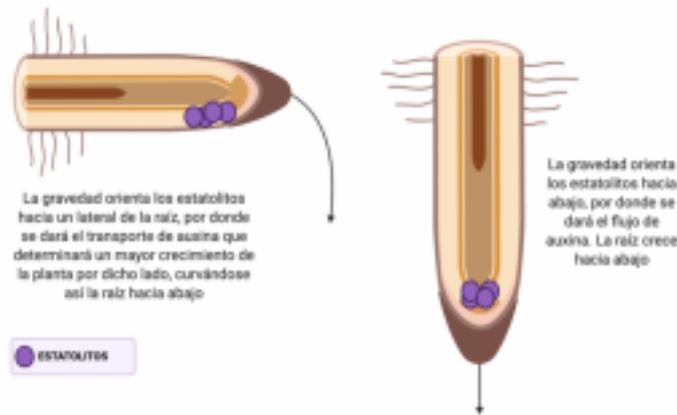


Figura 2. Imagen superior: células estatócitos y en su interior se encuentran los estatólitos, en su orientación normal (A) y después de que la raíz se haya colocado horizontalmente. Se observa como la posición de los estatólitos en el interior de las células cambia al variar la posición de la raíz. **Imagen inferior:** la posición de los estatólitos determina el flujo de auxina y por tanto el crecimiento de la raíz.

ii) Radiación cósmica. La radiación cósmica consiste en partículas subatómicas procedentes del espacio, principalmente protones y núcleos atómicos acompañados de emisiones electromagnéticas, que tienen una energía muy elevada debido a su gran velocidad cercana a la de la luz. Por ello, esta radiación cósmica es muy penetrante y es muy difícil de blindar. Nuestro planeta está protegido de la radiación cósmica principalmente procedente del sol gracias a la denominada magnetosfera, causada por el campo magnético de la Tierra, y que hace que las partículas cargadas reboten de un polo a otro, generando dos cinturones gigantes por los que circulan protones y electrones energético. La vida en la Tierra se ha adaptado a niveles más bajos de la radiación cósmica que procede del espacio y de las erupciones solares, debido a la presencia de la magnetosfera. Esta protección no existe en los vuelos espaciales, ni tampoco en las superficies de la Luna o Marte, que carecen de esta capa. Por tanto, las plantas al igual que los seres humanos estarían expuestos en estas misiones espaciales a dosis elevadas de este tipo de radiación, que producirían diversos efectos adversos en las células, como la generación de iones y radicales libres, que romperían enlaces químicos de las

macromoléculas relevantes para la vida, como el DNA, produciendo mutaciones en los genes. Además de la radiación cósmica, en la Tierra estamos protegidos de la radiación ultravioleta C (UV-C), que no puede llegar a la superficie de la Tierra gracias a la atmósfera. La radiación UV-C es mucho más peligrosa que la UV-B y la UV-A que son las que si llegan a la superficie de nuestro planeta. Las plantas se han adaptado a las dosis terrestres de UV-B y UV-A, pero no podrían sobrevivir a las dosis de UV-C de otros cuerpos planetarios. No obstante, es fácil blindarse frente a la radiación UV-C mediante filtros que la apantallen, por lo que esta condición no sería un problema para el desarrollo de las plantas en las misiones espaciales.

Además de los problemas ocasionados por la alteración de la gravedad y la ausencia de protección frente a la radiación cósmica, existen otras condiciones que pueden dificultar el cultivo de plantas en la superficie de otros cuerpos planetarios como la Luna y Marte: i) la presencia de compuestos tóxicos en el suelo. Por ejemplo, en Marte se ha detectado la existencia de sales de perclorato, un compuesto abundante en salmueras (agua con elevada cantidad de sal). Además, también se han encontrado metales tóxicos en los regolitos de la Luna y Marte, que podrían acumularse en los tejidos de las plantas si se empleasen en el suelo de cultivo; y ii) escasez en los suelos de algunos nutrientes esenciales para las plantas, como el nitrógeno. En nuestro planeta el suelo está enriquecido en nutrientes que proceden de la descomposición de otros organismos, principalmente plantas.

Experimentos de crecimiento de plantas en el espacio y en simuladores en la Tierra

Para investigar la posibilidad de cultivar plantas en el espacio y en otros cuerpos

planetarios, las agencias espaciales de diversos países han promovido la realización de diversos experimentos tanto en el espacio (Estación Espacial Internacional y la Luna) como en nuestro planeta mediante simulaciones de las condiciones espaciales o de la Luna y Marte. A continuación, se describen algunos de los experimentos más relevantes.

1. Seedling Growth

Este proyecto ha sido financiado por la NASA y la ESA (Agencia Espacial Europea) y ha consistido en una serie de experimentos realizados en la Estación Espacial Internacional. Por parte de la ESA, ha liderado los experimentos denominados **ROOT** el Dr. Javier Medina del Centro de Investigaciones Biológicas “Margarita Salas” de Madrid y de la NASA el profesor John Kiss fue responsable del conjunto de experimentos denominado **TROPI**. En resumen, en Seedling Growth se ha investigado el proceso de germinación de semillas (6 días) de la planta modelo *Arabidopsis thaliana* en diversas condiciones de luz y niveles de gravedad. Concretamente se analizó el crecimiento de las semillas en presencia de luz LED (roja o azul) y se demostró que la luz roja producía un fototropismo positivo en las raíces, compensando el efecto de la microgravedad que produce un crecimiento desorganizado de las raíces (se desarrollan en todas las direcciones) (**Figura 3**). Por otra parte, se probó el efecto de la microgravedad (la condición de la Estación Espacial Internacional) y de varios niveles de gravedad, entre ellos los de la Luna y de Marte, mediante clinostatos 2D, un instrumento que altera la percepción de la gravedad (**Figura 4**). Entre otros resultados interesantes, se observó que las condiciones de gravedad de Marte causaban una respuesta adaptativa de las plantas, no produciendo un efecto negativo sobre la germinación. En paralelo, se realizaron experimentos de control en la Tierra, con clinostatos 2D, que permitieron contrastar los resultados

obtenidos con los experimentos realizados en el espacio. Las semillas germinadas se analizaron en el laboratorio de mediante diversas técnicas (morfología, histología, expresión de genes, etc).

Figura 3. Imágenes de semillas germinadas de *Arabidopsis thaliana* crecidas en la Estación Espacial Internacional. En la parte superior se muestran los dispositivos en los que se germinan las semillas (en un medio sólido artificial), que van en un instrumento denominado “European Modular Cultivation System” que permite un control riguroso de las condiciones ambientales. En la parte inferior se muestran dos imágenes, la de la izquierda con semillas germinadas en microgravedad (se observa el crecimiento desorganizado de las raíces) y en la de la derecha las que han germinado en gravedad similar a la de la Tierra (1g) simulada mediante un clinostato 2D.

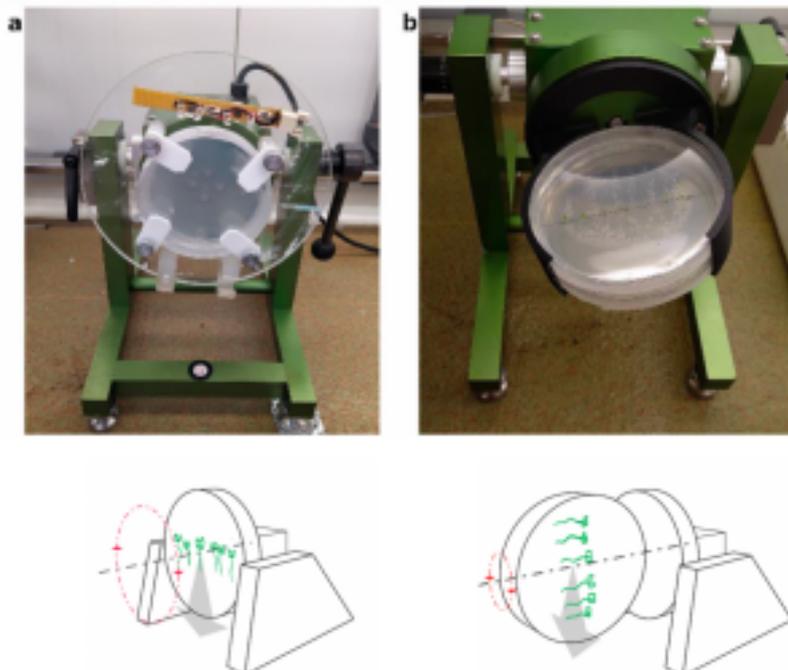


Figura
4. Clinostatos 2D: a) orientación vertical y b) orientación horizontal. En estos instrumentos las

plantas que van creciendo en un medio sólido, van rotando de tal forma que varía de forma constante la posición de la planta respecto a la dirección de la gravedad, produciendo un efecto similar al de la ausencia de gravedad (microgravedad).

2. Veggie

Es un sistema de producción de vegetales, que consiste en un módulo invernadero instalado en la Estación Espacial Internacional (**Figura 5**). Este sistema se pensó para que los astronautas pudieran comer alimentos frescos en alguna ocasión, ya que es de pequeño tamaño y la producción es muy limitada, y además para investigar si era posible el desarrollo normal de plantas en condiciones de microgravedad. Las semillas se siembran en unas almohadillas estériles, para evitar la contaminación con hongos y bacterias, y son iluminadas con luces LED rojas y azules. En ausencia de gravedad (microgravedad), las plantas pueden usar otros factores ambientales como la luz para orientar y guiar su crecimiento, de esta forma se compensa el efecto de la ausencia de gravedad en el desarrollo de las mismas. Además, Veggie tiene un sistema de riego y de fertilización automático y el aire es el mismo que el de la cabina del módulo espacial. Empleando este sistema, se han cultivado distintas especies de plantas como tres variantes de lechugas, col china, mostaza, kale y de Zinnia, una planta ornamental. Además de Veggie, la NASA ha desarrollado un módulo similar denominado Advanced Plant Habitat, con luces LED y un sustrato de arcilla porosa con fertilizante de liberación controlada para entregar agua, nutrientes y oxígeno a las raíces de las plantas. A diferencia de Veggie, es un sistema cerrado y automatizado con cámaras y más de 180 sensores que están en contacto interactivo constante con un equipo en tierra en Kennedy Space Center, por lo que no necesita mucho cuidado diario por parte de la tripulación. En esta cámara se ha grabado el crecimiento de una planta modelo que se emplea para investigar en el laboratorio, *Arabidopsis thaliana*, y se están llevando experimentos para

estudiar qué ocurre en esta planta a nivel de expresión de genes, proteínas y metabolitos en respuesta a la microgravedad.

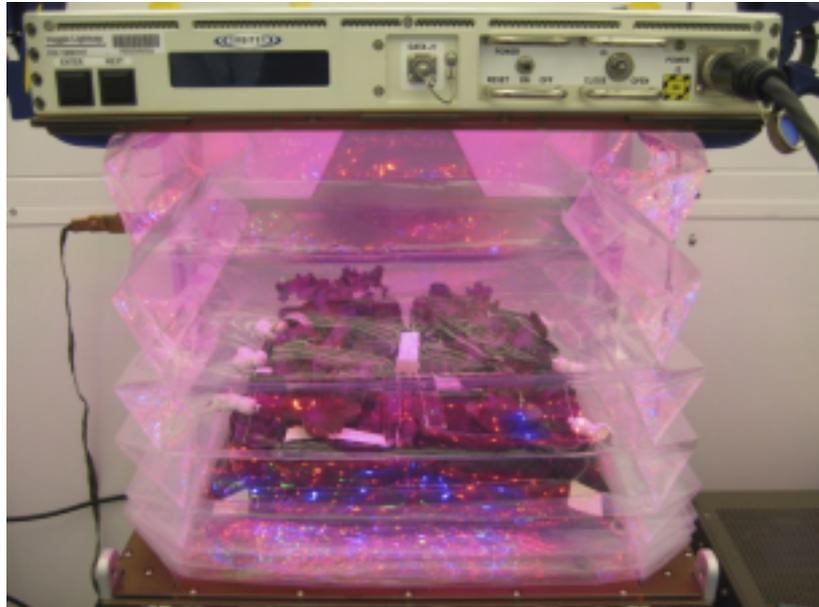


Figura 5. Sistema de cultivo Veggie en la Estación Espacial Internacional.

3. Lunar Micro Ecosystem (China National Space Administration) El aterrizador o

módulo de descenso (Lander) Chang'E-4 llegó a la cara oculta de la luna en enero de 2019, y entre su equipamiento llevaba una mini biosfera cilíndrica denominada Lunar (2.6 kg) denominada Lunar Micro Ecosystem (LME), que ha sido el primer experimento biológico realizado en la Luna. Se eligieron 6 organismos para el experimento: semillas de algodón, patata, colza y *Arabidopsis thaliana*, levaduras y huevos de mosca de la fruta (*Drosophila melanogaster*). Dentro de la biosfera se mantuvieron todas las condiciones de la Tierra, así que la única diferencia era la gravedad reducida de la Luna y la radiación. Los científicos esperaban que todas estas formas de vida lograrán crear un microecosistema, con plantas produciendo oxígeno y alimentos, moscas de la fruta como consumidoras y las levaduras descomponiendo la materia de desecho. Solamente se observó la germinación en la luna de las semillas de algodón, ninguno de los otros organismos reaccionó al experimento. Además, todos los organismos

murieron congelados en poco tiempo, ya que el LME no tenía un sistema de calentamiento, y en cuanto llegó la primera noche lunar (14 días de la Tierra), las temperaturas disminuyeron hasta -190°C .

Biología sintética para optimizar el cultivo de plantas en condiciones espaciales

La biología sintética se define como la aplicación de la ciencia, la tecnología y la ingeniería para facilitar y acelerar el diseño, la fabricación y/o la modificación de material genético en organismos vivos. En biología sintética se emplean métodos más rápidos y sencillos para producir organismos modificados genéticamente (OMG) mediante la introducción o eliminación de genes de un organismo o la combinación de estructuras genéticas modulares para crear seres vivos con funciones nuevas. La ESA ha financiado la formación de un grupo de trabajo sobre Biología sintética aplicada a la exploración espacial, del que formó parte. Una de las investigaciones que apoyo consiste en modificar plantas de interés agrícola para que resistan a mayores dosis de radiación, y a otros tipos de estrés que se pueden encontrar en Marte o la Luna, como la presencia de compuestos tóxicos (perclorato, metales, etc). Concretamente, en nuestro grupo investigamos que mecanismos moleculares emplean los microorganismos para adaptarse a las condiciones de diversos ambientes extremos en la Tierra. Por ejemplo, estamos interesados en los que habitan en zonas muy expuestas a radiación UV-B como las lagunas hipersalinas del altiplano andino (Argentina y Chile) y en el desierto de Atacama (Chile) (**Figura 6**), que se encuentran a una gran altitud y la radiación UV es más elevada. La idea es modificar plantas para que expresen genes que confieran resistencia a radiación obtenidos de microorganismos de estos ambientes.



Figura 6. Salar de Maricunga, en el desierto de Atacama (Chile). Existen numerosas especies de microorganismos extremófilos que habitan en estas lagunas con una salinidad muy elevada (superior al 20% de sal, varias veces más elevada que la del agua de mar, que es un 3.5%) y que además resisten a dosis altas de radiación UV y al compuesto tóxico perclorato, muy abundante en Atacama.

Temas de reflexión y preguntas abiertas

¿Qué especies vegetales podrían ser las más apropiadas para la alimentación humana en Marte o la Luna y en los vuelos espaciales de larga duración? Por ejemplo, un buen criterio en el caso de los vuelos espaciales en los que hay menos espacio para cultivar plantas, sería que tuviesen un crecimiento relativamente rápido y que un mayor porcentaje de la planta sea comestible.

Hasta ahora, los experimentos en el espacio han analizado exhaustivamente los efectos de distintos tipos de gravedad y microgravedad sobre los primeros días de la germinación de las semillas de la planta modelo *Arabidopsis thaliana*, y además se han podido crecer en microgravedad plantas de pequeño porte como lechugas e incluso se obtuvo la floración de una planta ornamental (Zinnia). Sin embargo, es necesario realizar experimentos con otras plantas de interés agrícola más complejas, para averiguar si también se pueden desarrollar correctamente,

formando flores y frutos en condiciones espaciales. Además, hay que realizar experimentos para analizar los efectos de la radiación cósmica sobre el material genético de las plantas (producción de mutaciones), y sus efectos sobre el desarrollo de las plantas, ya que la radiación puede activar respuestas de estrés que afecten a su crecimiento.

¿Cómo proteger los cultivos frente a la radiación y otros tipos de estrés producido por diferentes tipos de gravedad/microgravedad y la presencia de compuestos tóxicos en los sustratos de cultivo que se pudiesen emplear en la Luna o Marte? Una posibilidad es la de modificar mediante biología sintética las plantas para que se adapten mejor a esas condiciones. Por otra parte, también se están buscando algunas especies vegetales como la planta de patata que sean naturalmente más resistentes a sequedad, radiación, etc, que es el tipo de investigaciones que realiza el Centro Internacional de la Papa (Perú), en colaboración con la NASA.

Existen en Perú cerca de 5000 variedades de patata, y el objetivo es probar cuales de ellas se adaptan mejor a desarrollarse en lugares áridos y hostiles que simulen las condiciones de Marte.

¿Es factible diseñar un Sistema de Soporte de la Vida autosostenible? Mediante estos sistemas, se pretende reproducir un ecosistema cerrado, con el único aporte externo de energía solar, en el que todos los organismos vivos se puedan desarrollar correctamente. Los ecosistemas naturales disponen de millones de especies diferentes, considerando la enorme diversidad de microorganismos, y cada uno desempeña una función específica y necesaria para el buen funcionamiento del ecosistema. ¿Será posible recrear un ecosistema con un número limitado de especies de vegetales y microorganismos? En esta dirección se han realizado en la Tierra algunos experimentos a gran escala, como Biosphere

2, en Arizona, una estructura de 1,27 hectáreas construida para generar un ecosistema artificial cerrado que sirviera para mantener una reducida población humana. En su interior se reproducían algunos ecosistemas, como la selva, un océano, un arrecife de coral, un manglar, una sabana, un desierto, y tierras cultivables, además de alojamientos para la colonia de humanos. Se hicieron varios experimentos en los que se confinaron 7-8 personas, durante periodos largos, pero se tuvieron que interrumpir en varias ocasiones por problemas de diversa índole, como el desequilibrio de los gases (disminución del oxígeno, enfrentamientos de la tripulación, etc). Por otra parte, la ESA está desarrollando el proyecto MELISSA, un prototipo de ecosistema cerrado, que de momento se está probando con una “tripulación” de ratas, y que consta de diversos compartimentos con plantas y microorganismos para realizar las funciones de degradación de compuestos de desecho, nitrificación, purificación del aire (plantas y microalgas), producción de comida (plantas) y el módulo donde habitan los animales.

Bibliografía

https://en.wikipedia.org/wiki/Space_farming

<https://elpais.com/ciencia/2020-11-07/los-agricultores-del-espacio.html>

<http://www.patatamarciana.com/agricultura-espacial>

<https://cordis.europa.eu/article/id/229928-next-generation-space-farming-is-on-its-way/es>

<https://techport.nasa.gov/view/10498>

https://en.wikipedia.org/wiki/Plants_in_space

<https://www.britannica.com/science/synthetic-biology>

https://en.wikipedia.org/wiki/Biosphere_2

<https://ecotechnics.edu/2018/09/25049/>

http://www.esa.int/spaceinvideos/Videos/2010/05/Melissa_-

[_Micro_ecosystem_in_space/](#)

<https://www.melissafoundation.org>

<https://www.melissafoundation.org/page/melissa-pilot-plant>

https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Life_support_pilot_plant_paves_the_way_to_Moon_and_beyond