

# LOS EXPLORADORES ESPACIALES DEBEN SER AGRICULTORES

## Qué sabemos y qué necesitamos saber sobre el crecimiento de las plantas en el espacio

F. JAVIER MEDINA

La exploración espacial requerirá sistemas de soporte vital que incluyan plantas para proporcionar nutrientes, oxígeno, humedad y bienestar psicológico, y que sirvan además para eliminar desechos. En entornos extraterrestres, las plantas se han de adaptar a una gravedad diferente e incluso a la gravedad cero de los vuelos espaciales. En estas condiciones se alteran las características celulares y moleculares relacionadas con el desarrollo de las plantas y se producen cambios en la expresión génica. En la gravedad lunar, los efectos son comparables con la microgravedad, mientras que la gravedad de Marte provoca alteraciones más leves. Sin embargo, ya ha sido posible desarrollar y reproducir plantas en el espacio. Las investigaciones actuales tratan de identificar señales, como la luz, que reemplacen a la gravedad como impulsora del crecimiento vegetal. Contrarrestar el estrés gravitatorio ayudará a hacer posible la agricultura en hábitats extraterrestres.

Palabras clave: biología de plantas, Estación Espacial Internacional (ISS), microgravedad, meristemo radical, expresión génica.

### ■ INTRODUCCIÓN

El 10 de agosto de 2015, en los medios de comunicación de todo el mundo apareció la imagen de tres tripulantes de la Estación Espacial Internacional (ISS por sus siglas en inglés) mientras comían una lechuga cultivada a bordo. «Fue un pequeño bocado para el hombre, pero un gran salto para #NASAVEGGIE y nuestro #ViajeaMarte. #1AñoEnElEspacio», escribió el astronauta Scott Kelly en Twitter (StationCDR-Kelly, 2015) junto al vídeo en el que degustaban el tentempié (momento que recoge la foto de la Figura 1A). Se había convertido en el primer agricultor espacial.

Este evento fue el espectacular resultado del proyecto Vegetable Production System (conocido como «Veggie»), una instalación para el crecimiento vegetal que había logrado producir una pequeña cosecha de plantas de ensalada para proporcionar a la tripulación una fuente de alimento fresco y de calidad, en términos nutritivos

y de sabor. Además, el cultivo les sirvió como actividad relajante, lejos de los procedimientos rutinarios de mantenimiento de la Estación, y para su propio bienestar fisiológico. Veggie proporciona luz y nutrientes, pero utiliza el entorno de la cabina para controlar la temperatura y el intercambio de gases (Figura 1B).

«Cuanto más nos alejamos y más tiempo pasamos los humanos fuera de la Tierra, mayor es la necesidad de poder cultivar plantas para obtener alimento, reciclar la atmósfera y conseguir beneficios psicológicos», dijo Gioia Massa (NASA, 2015), la especialista científica de la

instalación Veggie. «Creo que los sistemas vegetales serán componentes importantes de cualquier escenario de exploración de larga duración», concluyó. Todos los implicados en futuras iniciativas de exploración espacial comparten las declaraciones expresadas por la Dra. Massa, desde los científicos hasta los gestores y los

**«La biología vegetal espacial está progresando rápidamente, desde que se construyó y comenzó a operar la Estación Espacial Internacional»**

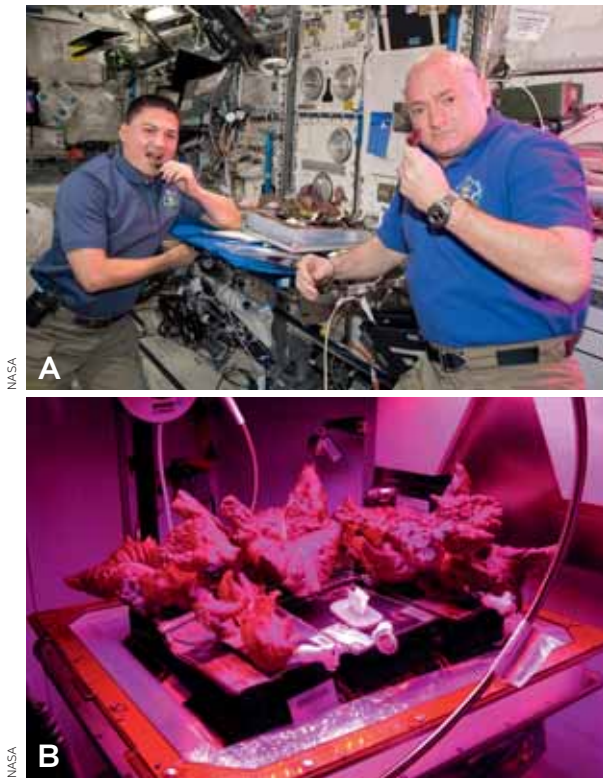


Figura 1. A) Los astronautas de la NASA Scott Kelly (derecha) y Kjell Lindgren (izquierda), degustando una lechuga de hoja de roble recién recogida de su cosecha espacial como parte del experimento Veg-01. B) Instalaciones del Vegetable Production System de la NASA («Veggie») en la Estación Espacial Internacional. La imagen muestra almohadillas que contienen lechugas de hoja de roble durante el experimento Veg-01.

dirigentes de las agencias espaciales más importantes del mundo.

Sin embargo, ¿quiere esto decir que se han superado todos los obstáculos para el crecimiento exitoso y continuo de las plantas en el espacio?

La respuesta es «no», al menos desde la perspectiva de la investigación biológica vegetal; o, a lo sumo, «todavía no». Los investigadores creen que los resultados iniciales de Veggie, seguidos por otros logros recientes, plantean nuevas preguntas y retos para el trabajo científico. Es cierto que una planta vascular creció en el espacio hasta una etapa adulta mostrando la misma forma, características y composición que su especie muestra en la Tierra. No obstante, no sabemos cómo superó esa planta las alteraciones celulares y moleculares provocadas por la exposición al entorno espacial que se han observado en numerosas ocasiones (Herranz y Medina, 2014). El profesor Marco y su equipo (Marco,

Husson, Herranz, Mateos y Medina, 2003) ya descubrieron esta paradoja tras realizar experimentos pioneros con *Drosophila*, la mosca de la fruta, que revelaron que, al parecer, el desarrollo se completó de forma normal pese a la presencia de cambios celulares y moleculares. Encontrar las claves para solucionar esta paradoja es uno de los desafíos más emocionantes de la investigación actual en biología espacial.

## ■ EL ENTORNO ESPACIAL: RADIACIÓN Y GRAVEDAD

Muchos objetos orbitan alrededor de la Tierra, la Luna, Marte y otros cuerpos más lejanos, en un entorno que, desde la perspectiva terrestre, es hostil y peligroso para la vida. Ciertamente, el único objeto en órbita que alberga vida terrestre fuera de nuestro planeta es la ISS (y las naves relacionadas con su mantenimiento).

La Tierra es el único planeta del sistema solar dotado de una atmósfera compatible con la existencia de seres vivos. La atmósfera y la magnetosfera de la Tierra protegen a los seres vivos de las condiciones hostiles del espacio exterior, que incluyen el vacío, la radiación y la temperatura. Tanto las astronaves como cualquier hábitat que se establezca en la Luna o Marte deben estar protegidos contra estos factores y replicar la atmósfera terrestre en su interior.

La radiación cósmica merece especial consideración como un factor ambiental crucial durante las misiones espaciales. La radiación provoca daño celular que puede llegar a ser letal o afectar a la fisiología de los tejidos y órganos. La exposición a altas dosis de radiación es un grave peligro para los exploradores espaciales y esto se tuvo en cuenta en la construcción de las astronaves, que implementaron escudos protectores. Sin embargo, la exposición a dosis menores de radiaciones más penetrantes, que van acumulándose tras atravesar las protecciones, induce un estado de estrés en los

organismos. Esto supone un riesgo para misiones a largo plazo como un viaje a Marte.

El otro factor importante del entorno espacial es la alteración gravitatoria. La gravedad es la fuerza de atracción existente entre dos objetos. De acuerdo con la ley de gravitación universal de Newton, esta fuerza es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros. Por lo tanto, la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra es de  $9,8 \text{ m/s}^2$  ( $1 \text{ g}$ ), y se reduce hasta  $9,0 \text{ m/s}^2$  ( $0,9 \text{ g}$ ) en una órbita terrestre baja,

**«La radiación cósmica merece especial consideración como un factor ambiental crucial durante las misiones espaciales»**



como la distancia a la que orbita la ISS (a unos 400 km de la Tierra). Solo se podría alcanzar una reducción de  $10^{-2} g$  a una distancia de unos 200.000 km de la Tierra, sin considerar la influencia de otros objetos.

Entonces, ¿por qué cuando los astronautas están en la ISS o en otras astronaves alrededor de la Tierra experimentan la «gravedad cero»? En la ISS esto ocurre debido a que está en órbita, es decir, en una caída libre sin fin alrededor de la Tierra. La gravedad arrastra a los objetos en órbita hacia el centro de nuestro planeta, pero la alta velocidad del movimiento lateral evita la caída y mantiene el objeto a una distancia constante. El resultado de la fuerza centrífuga producida por la órbita y la fuerza de la gravedad hacia la Tierra es la «ingravedad» o la «microgravedad». En términos más coloquiales, la llamamos «gravedad cero» (gravedad efectiva  $<10^{-3} g$ ). Un vehículo espacial que orbita la Tierra se encuentra en este estado. No obstante, en la superficie lunar o marciana la fuerza de la gravedad depende de la masa de cada satélite o planeta y es de 0,17 *g* en el caso de la Luna y de 0,38 *g* en el de Marte.

El cambio de gravedad que existe en el entorno espacial en comparación con la Tierra es especialmente importante para la exploración espacial. En la práctica, solo es posible contrarrestar físicamente este cambio mediante una centrifugación continua, que hasta el momento no se ha considerado una opción eficiente y asequible. Por lo tanto, la estrategia es conocer sus efectos en los seres vivos e intentar mitigar las alteraciones fisiológicas mediante el uso de mecanismos biológicos que acaben conduciendo a la adaptación de los seres vivos al nuevo entorno.

#### ■ LA GRAVEDAD HA MODELADO EL PLANETA TIERRA, LA VIDA Y LAS PLANTAS

Entre los factores ambientales que afectan a los seres vivos, la gravedad es el único cuya presencia ha sido constante a lo largo de la historia de la vida en la Tierra. No solo la evolución biológica, también los procesos geológicos que han impulsado la formación del planeta Tierra se han producido en presencia de un vector de gravedad constante, que de hecho sigue operando hoy en día. La morfología y las funciones de los seres vivos terrestres están muy influenciadas por la gravedad, y en la biodiversidad de la Tierra se pueden encontrar muchos órganos, sistemas y procesos diferentes destinados a detectar y responder a la gravedad,

así como a utilizar la gravedad en beneficio de sus funciones biológicas.

En el caso concreto de las plantas, la colonización de los entornos terrestres por los ancestros de las plantas acuáticas, que se produjo hace cerca de 400 millones de años, marcó un hito crucial. Para emerger del mar y crecer en tierra firme, las plantas tuvieron que desarrollar un cuerpo rígido capaz de resistir la fuerza de la gravedad y mantener a la planta en pie. El éxito radicó en la creación de paredes protectoras que afectaban a áreas extensas del cuerpo de la planta, como las capas de lignina, que también ayudaban a evitar la desecación. Posteriormente, las plantas diferenciaron órganos aéreos especializados para maximizar la exposición de las hojas a la luz del sol y la eficiencia de la fotosíntesis, y raíces y pelos absorbentes para capturar el agua y los minerales del suelo. Las plantas utilizaron la gravedad para esta diferenciación y desarrollaron el gravitropismo para gestionar su crecimiento de acuerdo al vector gravedad. Por tanto, las raíces muestran gravitropismo positivo al crecer hacia el centro de la Tierra, mientras que los tallos tienen gravitropismo negativo y crecen hacia la luz del sol.

### «El viaje espacial es un gran hito en la historia evolutiva de las plantas: por primera vez, se enfrentan a la ausencia de gravedad»

En este contexto, el viaje espacial es otro gran hito en la historia de las plantas: por primera vez, se enfrentan a una condición ambiental (la microgravedad) que nunca han experimentado, no solo en términos ontogénicos sino también filogenéticos. Los primeros experimentos espaciales, de hace más de cincuenta años, mostraron que las plantas

podían sobrevivir y crecer en el espacio, aunque pronto se observaron alteraciones (Perbal, 2001). Los resultados en ocasiones eran confusos, en la mayoría de casos debido a deficiencias en el diseño experimental y en los aparatos utilizados para hacer germinar semillas y para cultivar las plantas. Las mejoras en las instalaciones de cultivo, como en el caso de Veggie, nos han permitido concluir que la microgravedad en sí misma no impide el crecimiento y reproducción de las plantas. Por lo tanto, sigue abierta la cuestión de qué mecanismos utilizan las plantas para superar las alteraciones y alcanzar una adaptación funcional. Cualquier posible respuesta a esta pregunta debería tener en cuenta que durante su evolución las plantas han desarrollado una gran plasticidad para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes, debido a su condición sésil. Esta plasticidad se basa en la existencia de tejidos meristemáticos y en la alta redundancia de genomas y familias de genes que contienen.

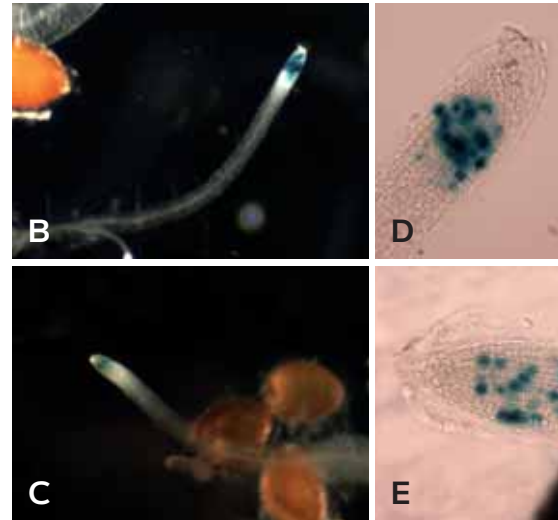
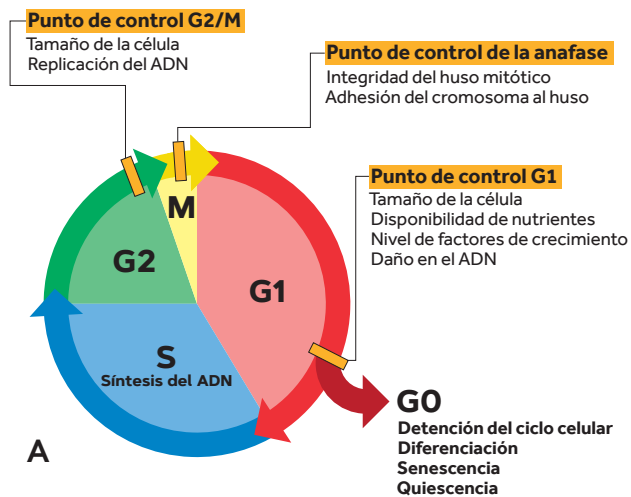


Figura 2. A) Representación esquemática del ciclo celular. Se representan las cuatro fases de que consta (G1, S, G2, y M, o mitosis), así como los puntos de control en los que se llevan a cabo los procesos reguladores. En cada punto de control se indican los procesos y parámetros específicos que se han de comprobar. Cuando las células dejan de progresar a lo largo del ciclo celular, entran en la fase G0. El destino de las células G0 es variable y se indican los principales destinos alternativos. B, C) Visualización en el meristemo de la raíz de la expresión de la ciclina B1, una proteína que actúa en el punto de control G2/M del ciclo, detectada mediante la construcción genética reportera *cycB1:GUS*, observada con un estereoscopio binocular. Las plántulas se cultivaron en condiciones control 1 g (B) o en microgravedad simulada (C). D, E) Visualización de la expresión de la ciclina B1 como en las imágenes anteriores, pero observada a más aumento, mediante un microscopio óptico. La expresión del regulador del ciclo celular se reduce mucho en microgravedad simulada.

## ■ CONSECUENCIAS DE LA MICROGRAVEDAD PARA LAS PLANTAS

El meristemo de la raíz es un tejido esencial para el desarrollo y la respuesta al estrés de las plantas. Es una reserva permanente de células totipotentes indiferenciadas que generan células diferenciadas para el desarrollo. La función de las células meristemáticas es realizar un ciclo continuo de crecimiento y división: el ciclo celular. La división celular por mitosis produce dos células hijas, que pasan por la interfase hasta la siguiente división. Las fases G1 y G2 de la interfase están separadas por la fase S, caracterizada por la replicación de ADN (Figura 2). El crecimiento de las células meristemáticas durante la interfase no solo afecta al tamaño de la célula, sino que también implica un aumento en su contenido proteico, para hacer posible la siguiente división celular (Perrot-Rechenmann, 2010). Dado que las proteínas se sintetizan en los ribosomas, la biogénesis de los ribosomas y el nucleolo son marcadores fieles del crecimiento de las células meristemáticas. En general, la función de las células meristemáticas está basada en una estricta coordinación entre las tasas de proliferación y crecimiento celular, llamada «competencia meristemática» (véase Herranz y Medina, 2014).

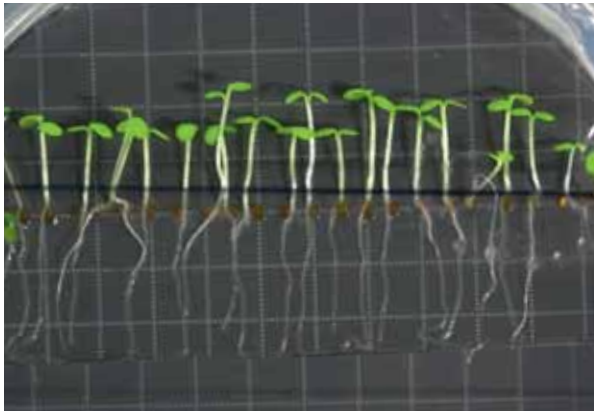
El experimento Root (“Raíz”), el primer experimento europeo de biología vegetal realizado a bordo de la ISS, mostró un notable aumento en la tasa de proliferación celular en los meristemos radicales de las muestras espacia-

les, acompañado de un descenso en la tasa de crecimiento celular, expresado como la producción de precursores prerribosómicos en el nucleolo (Matía et al., 2010). Algunos experimentos pioneros anteriores ya habían observado alteraciones en ciertos parámetros del ciclo celular (Perbal, 2001). Los análisis complementarios realizados en microgravedad simulada en instalaciones en tierra confirmaron estos desajustes inducidos por la microgravedad. En concreto, se han demostrado alteraciones en la regulación del ciclo celular que producen el acortamiento de la fase G2, la más activa en términos de producción de ribosomas, y, consiguientemente, la anticipación de la mitosis (Kamal, Herranz, Van Loon y Medina, 2019). Así pues, la condición ambiental de ausencia de gravedad provoca un estrés notable en la planta debido a la pérdida de la competencia meristemática (Herranz y Medina, 2014) (Figura 2).

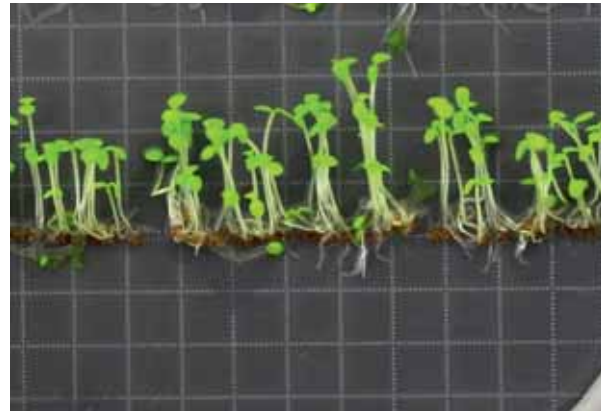
La competencia meristemática está conectada fisiológicamente con la percepción de la gravedad mediante la fitohormona auxina. La alteración de la gravedad provoca cambios en el equilibrio lateral de auxina de la raíz, lo que produce distorsiones y curvaturas y, consiguientemente, la pérdida de la orientación y la alteración del gravitropismo (Gadalla, Braun y Böhmer, 2018). Además, la auxina es un importante controlador de la actividad meristemática que regula el crecimiento y la proliferación celular (Perrot-Rechenmann, 2010). Se ha postulado la existencia de sensores celulares de gravedad adicionales, probablemente localizados en la pared



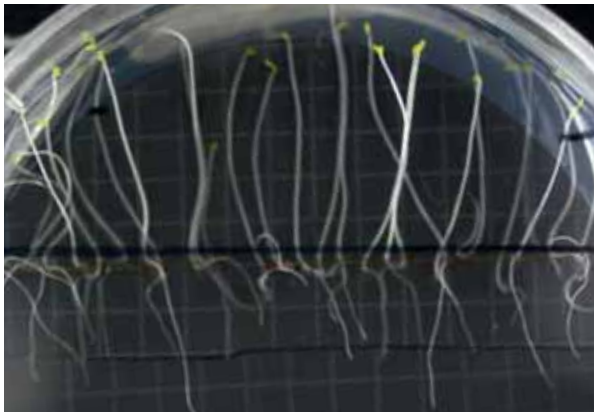
FUENTE DE LUZ



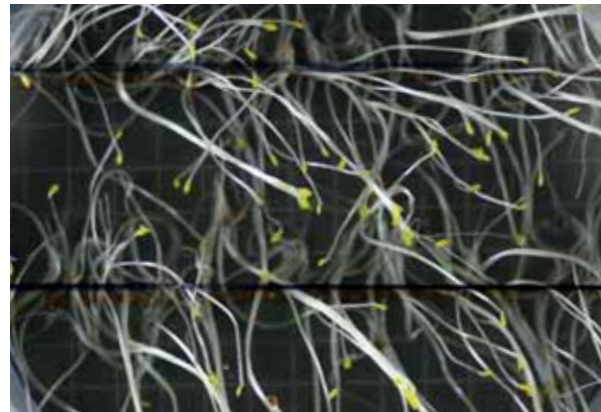
Luz  
Gravedad (1g)



Luz  
NO gravedad ( $\mu$ g)



NO luz  
Gravedad (1g)



NO luz  
NO gravedad ( $\mu$ g)

F. Javier Medina



Figura 3. Efectos de la luz y la gravedad en la orientación de los tallos (hipocótilos) y raíces de plántulas jóvenes. Se muestran las diferentes posibilidades de combinación de los dos factores tropísticos ambientales. Obsérvense los diferentes efectos en los dos órganos de la plántula. Se indican, en su caso, la posición de la fuente de luz y la dirección del vector de gravedad ( $g$ ).

celular, y de mecanismos intracelulares de transducción de la señal (Herranz y Medina, 2014).

Además de efectos celulares, el entorno de microgravedad provoca la reprogramación génica de las plantas. La ausencia de una «memoria» de la falta de gravedad en la evolución de las plantas plantea la pregunta clave de si el organismo responde a la ausencia de este factor desarrollando un mecanismo completamente nuevo o utilizando mecanismos de respuesta generales y no especializados. Los estudios realizados han demostrado una compleja respuesta en las plantas. Hasta ahora no se han encontrado genes específicos de respuesta a las alteraciones en la gravedad, pero en cambio sí se conocen genes que participan en los mecanismos generales de respuesta al estrés abiótico y que han demostrado modificar su expresión en ambiente de microgravedad (véase Paul et al., 2017, y las referencias citadas).

■ EL PAPEL DE LA LUZ

A pesar de los cambios fisiológicos provocados en el ambiente espacial, se desarrollan plantas adultas y flores con aparente normalidad en el espacio. Por lo tanto, la cuestión clave en términos prácticos es identificar y comprender las estrategias que la planta desencadena para contrarrestar los problemas de supervivencia asociados con el ambiente espacial y la microgravedad. El término clave para este importante objetivo de investigación es *mecanismo(s) de adaptación*. ¿Cuáles son estos mecanismos y cómo y cuándo se establecen?

La adaptación y la supervivencia de plantas en el espacio podría beneficiarse de la sustitución de la gravedad por otra señal externa, que podría cumplir el mismo papel que la gravedad en la Tierra en la orientación del crecimiento y desarrollo de las plantas o un papel similar.

La luz es una buena candidata para esto, ya que en realidad es un estímulo tropístico. El fototropismo complementa al gravitropismo con el objetivo de optimizar la eficiencia en la captura de nutrientes (Figura 3). Además, la luz, especialmente la luz roja, es captada por los fitocromos para producir cambios en la regulación de los genes de respuesta a la auxina y muchos coordinadores de crecimiento (Vandenbrink, Kiss, Herranz y Medina, 2014).

En este contexto, sería interesante saber hasta qué punto la luz puede actuar como una señal capaz de contrarrestar los efectos de la falta de gravedad. Para ello, en la ISS se llevó a cabo el denominado «Seedling Growth Project» (“Proyecto de Crecimiento de Plántulas”) (Vandenbrink et al., 2014), constituido por tres experimentos sucesivos realizados respectivamente en 2013, 2014 y 2017. El proyecto ha sido el resultado de la cooperación entre la NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en inglés), en el que se ha utilizado un dispositivo incubador europeo combinado con una cámara de cultivo americana para estudiar la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas. Se utilizaron diferentes colecciones de mutantes de la especie vegetal modelo *Arabidopsis thaliana* que afectaban a fitocromos, proteínas nucleolares y genes de respuesta a auxina. Las semillas germinaron en el vuelo y crecieron durante seis días en diferentes regímenes de iluminación y gravedad. Además de la microgravedad, las plántulas fueron sometidas a diferentes niveles de gravedad entre 0 g y 1 g, incluyendo los niveles de la Luna y Marte. Estos niveles se simularon en una centrifugadora instalada en el incubador (Figura 4).

Aunque algunos de los análisis todavía están en curso, ya se han identificado nuevas respuestas fototrópicas a la luz azul en el espacio. Además, se ha observado un efecto positivo de la luz roja para contrarrestar el estrés provocado por la microgravedad en el crecimiento y la proliferación celular del meristemo de la raíz (Valbuena et al., 2018), y este efecto ha sido confirmado en un estudio transcriptómico global. Por lo tanto, parece que la luz (roja) podría ser uno de los factores que promueven la adaptación de las plantas a la microgravedad y que se podría utilizar para mitigar el estrés gravitatorio en el cultivo de plantas en el espacio.

## ■ CRECIMIENTO DE PLANTAS EN LA GRAVEDAD PARCIAL DE LA LUNA Y DE MARTE

El cultivo de plantas es necesario para la exploración espacial no solo a bordo de las astronaves en órbita, caracterizadas por un entorno de microgravedad, sino también

para los asentamientos humanos más o menos permanentes en otros planetas o satélites (la Luna y Marte son los objetivos principales, por razones obvias).

El entorno duro y hostil de la Luna y de Marte es una limitación muy importante a la hora de proyectar e implementar cualquier tipo de «invernadero». El concepto de *terraformar* un planeta o luna está pasando de la ciencia ficción (en literatura, o en el cine) a la ciencia real. Designa al proceso humano de modificar la atmósfera, temperatura, topografía superficial o ecología de un cuerpo estelar para hacerlo más similar al entorno de la Tierra y conseguir que sea habitable para la vida terrestre. Curiosamente, los experimentos realizados con suelos simulados en su composición han demostrado que el crecimiento y desarrollo de las plantas sería compatible con la superficie de Marte y de la Luna.

Una vez más, la gravedad es un factor permanente e inevitable. Como ya se ha indicado, la gravedad de la Luna es de 0,17 g y la de Marte es de 0,38 g. Esto entra en los llamados niveles de gravedad parcial, vectores de gravedad que alcanzan solo una fracción de su magnitud en la Tierra. Estos niveles fueron simulados en la Tierra mediante la implementación de so-

## «La luz puede actuar como una señal capaz de contrarrestar los efectos de la falta de gravedad»

luciones tecnológicas, validadas biológicamente con el cultivo de plántulas de *Arabidopsis thaliana*. Los parámetros fisiológicos de las plántulas cultivadas simulando el nivel de gravedad de la Luna se vieron seriamente afectados, con una intensidad incluso mayor a la registrada en microgravedad simulada, mientras que el nivel de gravedad de Marte solo produjo una leve alteración del equilibrio entre crecimiento celular y proliferación, con parámetros similares a los que se obtuvieron con las muestras del control 1 g (Manzano et al., 2018).

Curiosamente, la gravedad lunar simulada no pudo orientar el crecimiento de las plántulas, pero, en la gravedad marciana, estas mostraron un gravitropismo visible. A su vez, los resultados obtenidos en el espacio, utilizando la centrífuga para producir un amplio espectro de valores de gravedad parcial, siguieron la misma tendencia obtenida en los dispositivos de simulación en tierra. Por lo tanto, parece que la gravedad marciana no será un obstáculo importante para el cultivo de plantas.

## ■ PERSPECTIVAS FUTURAS

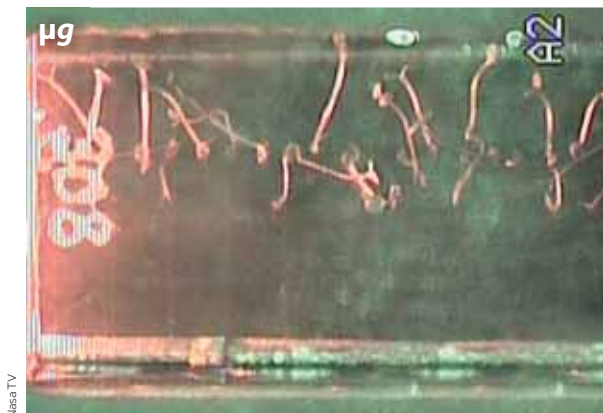
La sección de la página web de la ESA dedicada a la investigación con plantas en el espacio<sup>1</sup> subraya la impor-

<sup>1</sup> [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Human\\_and\\_Robotic\\_Exploration/Research/Plants](https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Research/Plants)

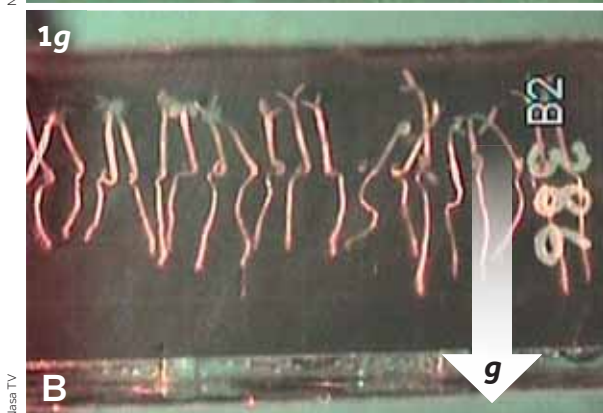


Nasa TV

Figura 4. Imágenes del experimento espacial «Seedling Growth», obtenidas a bordo de la Estación Espacial Internacional. A) Un astronauta ha extraído del incubador los contenedores experimentales y las cámaras de cultivo en las que han crecido las plántulas, y está realizando las operaciones necesarias para la adecuada preservación de las muestras para su transporte a la Tierra y los posteriores análisis en el laboratorio. B) Imágenes de las plántulas cultivadas en el espacio, de acuerdo a los protocolos experimentales.  $\mu g$ : microgravedad. 1 g: control en gravedad terrestre. En este caso, las plántulas de 1 g crecieron en una centrifugadora a bordo que rotaba a esta velocidad angular. La orientación del crecimiento de las plántulas difiere mucho en ambos casos. Se indica la dirección del vector de gravedad ( $g$ ) en el experimento de control.



Nasa TV



Nasa TV

tancia de la agricultura espacial y destaca la necesidad de seguir investigando en esta disciplina, comenzando con el siguiente párrafo: «Cultivar plantas para obtener alimento fue un paso significativo en la historia de la humanidad. Cultivar plantas para obtener alimento en el espacio y en otros planetas será necesario para la exploración de nuestro universo».

Establecer asentamientos humanos temporales o permanentes en la Luna y en Marte empieza a parecer una posibilidad real, después del éxito de varias misiones no tripuladas con robots. Pese a que todavía es necesario solventar algunas cuestiones tecnológicas, éticas y políticas, el camino para esta iniciativa está despejado. Observando los medios de comunicación de masas y las redes sociales, percibimos que la investigación para la exploración espacial atrae mucho interés. Concretamente, la búsqueda de vida alienígena y la supervivencia y adaptación de los seres vivos terrestres a entornos extraterrestres despiertan mucha curiosidad entre los ciudadanos. Además, la exploración espacial es un poderoso impulsor para el progreso científico y tecnológico y para la concienciación pública acerca de su importancia.

Cada vez resulta más evidente que los humanos deben convertirse en exploradores espaciales, y también queda igualmente claro que los exploradores espaciales tendrán que ser agricultores espaciales. La película *Marte* (2015), dirigida por Ridley Scott, puso de relieve esta necesidad en una escena que muestra de manera bien documentada el tipo de retos y soluciones que surgen en la exploración espacial en relación con el cultivo y el uso de plantas. Por supuesto, esta escena (como toda la película) pertenece al género de la ciencia ficción, pero nuestras expectativas, basadas en experimentos científicos reales, no se alejan mucho de lo que muestra la película.

La biología vegetal espacial está progresando rápidamente, especialmente desde que se construyó y comenzó a operar la ISS. A pesar de las limitaciones y obstáculos que siguen afectando a la experimentación espacial, el conocimiento que hemos generado en los últimos diez años cada vez está más cerca de permitirnos producir cosechas espaciales para alimentar a los exploradores. Por ejemplo, ahora conocemos bastante bien la reprogramación genética inducida en las plantas cuando se adaptan al entorno espacial.

Podríamos ofrecer aquí una lista que incluya algunos de los desafíos más relevantes y urgentes para el futuro cercano de esta disciplina. En relación con la expresión genética, tenemos que definir cuál es la proporción significativa de genes de «función desconocida» afectados por la microgravedad que se han encontrado en los estudios transcriptómicos. En la fisiología vegetal, el desciframiento completo de los mecanismos de adaptación, especialmente teniendo en cuenta el papel que puede



desempeñar la luz como impulsor del crecimiento vegetal en ausencia de gravedad, sigue siendo una cuestión sin resolver, como lo es también la función exacta de la auxina en la transducción de señales en diferentes entornos con estímulos ambientales alterados. El papel de la microgravedad en la senescencia y los procesos oxidativos es fundamental y no se ha experimentado lo suficiente al respecto. Finalmente (aunque esta lista no es exhaustiva), tarde o temprano tendremos que pasar del sistema modelo de *Arabidopsis* a plantas de cosecha como material de nuestros experimentos.

«Qué te llevarías al espacio? [...] Oxígeno, agua y comida [...], tus libros, música y dispositivos electrónicos favoritos, algo para escribir, para dibujar... También deberías llevar medicamentos.»

En relación con esta pregunta, un grupo de estudiantes de educación secundaria de Navarra han desarrollado un proyecto para utilizar plantas en el espacio para producir y purificar proteínas recombinantes. Estas proteínas podrían ser, por ejemplo, medicamentos cuya fecha de caducidad sea superior a la duración de la misión espacial, o nutrientes que no se encuentran en las plantas de forma natural. El proyecto BioGalaxy,<sup>2</sup> desarrollado por los estudiantes con el apoyo del Planetario de Pamplona y el Instituto de Agrobiotecnología, ha obtenido el segundo premio en el Concurso Internacional iGEM.

El futuro no está escrito y nadie conoce el final de esta historia. ☺

#### REFERENCIAS

- Gadalla, D. S., Braun, M., & Böhmer, M. (2018). Gravitropism in higher plants: Cellular aspects. En G. Ruyters, & M. Braun (Eds.), *Gravitational biology I: Gravity sensing and graviorientation in microorganisms and plants* (pp. 75–92). Cham: Springer International Publishing.
- Herranz, R., & Medina, F. J. (2014). Cell proliferation and plant development under novel altered gravity environments. *Plant Biology*, 16, 23–30. doi: [10.1111/plb.12103](https://doi.org/10.1111/plb.12103)
- Kamal, K. Y., Herranz, R., Van Loon, J. J. W. A., & Medina, F. J. (2019). Cell cycle acceleration and changes in essential nuclear functions induced by simulated microgravity in a synchronized *Arabidopsis* cell culture. *Plant, Cell & Environment*, 42(2), 480–494. doi: [10.1111/pce.13422](https://doi.org/10.1111/pce.13422)
- Manzano, A., Herranz, R., Den Toom, L. A., Te Slaa, S., Borst, G., Visser, M., ... Van Loon, J. J. W. A. (2018). Novel, Moon and Mars, partial gravity simulation paradigms and their effects on the balance between cell growth and cell proliferation during early plant development. *NPJ Microgravity*, 4(1), 9. doi: [10.1038/s41526-018-0041-4](https://doi.org/10.1038/s41526-018-0041-4)
- Marco, R., Husson, D., Herranz, R., Mateos, J., & Medina, F. J. (2003). *Drosophila melanogaster* and the future of 'evo-devo' biology in space. Challenges and problems in the path of an eventual colonization project outside the earth.

<sup>2</sup> [http://2018.igem.org/team/Navarra\\_BG](http://2018.igem.org/team/Navarra_BG).

## «El cultivo de plantas es necesario para la exploración espacial, no solo a bordo de las astronaves en órbita, sino también para los asentamientos humanos más o menos permanentes en otros planetas o satélites»

*Advances in Space Biology and Medicine*, 9, 41–81. doi: [10.1016/S1569-2574\(03\)09003-8](https://doi.org/10.1016/S1569-2574(03)09003-8)

- Matía, I., González-Camacho, F., Herranz, R., Kiss, J. Z., Gasset, G., Van Loon, J. J. W. A., ... Medina, F. J. (2010). Plant cell proliferation and growth are altered by microgravity conditions in spaceflight. *Journal of Plant Physiology*, 167(3), 184–193. doi: [10.1016/j.jplph.2009.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.012)
- NASA. (2015). Meals ready to eat: Expedition 44 crew members sample leafy greens grown on Space Station. Consultado en [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/research/news/meals\\_ready\\_to\\_eat](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/meals_ready_to_eat)
- Paul, A.-L., Sng, N. J., Zupanska, A. K., Krishnamurthy, A., Schultz, E. R., & Ferl, R. J. (2017). Genetic dissection of the *Arabidopsis* spaceflight transcriptome: Are some responses dispensable for the physiological adaptation of plants to spaceflight? *PLOS One*, 12(6), e0180186. doi: [10.1371/journal.pone.0180186](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0180186)
- Perbal, G. (2001). The role of gravity in plant development. En G. Seibert (Ed.), *A world without gravity* (pp. 121–136). Noordwijk, Países Bajos: ESA Publications Division.

Perrot-Rechenmann, C. (2010). Cellular responses to auxin: Division versus expansion. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(5), a001446. doi: [10.1101/cshperspect.a001446](https://doi.org/10.1101/cshperspect.a001446)

StationCDRKelly. (2015, 10 de agosto). It was one small bite for man, one giant leap for #NASAVEGGIE and our #JourneytoMars. #YearInSpace [publicación en Twitter]. Consultado en <https://twitter.com/stationcdrkelly/status/630793511659421696>

Valbuena, M. A., Manzano, A., Vandenbrink, J. P., Pereda-Loth, V., Carnero-Diaz, E., Edelmann, R. E., ... Medina, F. J. (2018). The combined effects of real or simulated microgravity and red-light photoactivation on plant root meristematic cells. *Planta*, 248(3), 691–704. doi: [10.1007/s00425-018-2930-x](https://doi.org/10.1007/s00425-018-2930-x)

Vandenbrink, J. P., Kiss, J. Z., Herranz, R., & Medina, F. J. (2014). Light and gravity signals synergize in modulating plant development. *Frontiers in Plant Science*, 5, 563. doi: [10.3389/fpls.2014.00563](https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00563)

AGRADECIMIENTOS: Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todos los miembros de mi grupo de investigación «Nucleolo, proliferación celular y microgravedad en plantas» (CIB Margarita Salas-CSIC) en Madrid (científicos y técnicos, pasados y actuales), y en especial al Dr. Raúl Herranz. También agradezco la participación de muchos colegas extranjeros en diferentes proyectos colaborativos. Me gustaría mencionar en particular al profesor John Z. Kiss (UNCG, EE UU) y al Dr. Ing. Jack van Loon (Universidad Libre de Ámsterdam y ESA-ESTEC, Países Bajos). Merece una mención especial la inestimable contribución de los astronautas que han realizado experimentos a bordo de la Estación Espacial Internacional. El trabajo realizado en el laboratorio del autor está financiado por el Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación del Gobierno de España (Proyectos números ESP2015-64323-R y AYA2012-33982, cofinanciados por UE-FEDER). La financiación de los experimentos realizados durante los vuelos espaciales y en las instalaciones de simulación en Tierra la proporcionó la Agencia Espacial Europea.

**F. JAVIER MEDINA.** Jefe del laboratorio Nucleolo, Proliferación Celular y Microgravedad en Plantas del Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas (CIB-CSIC), Madrid (España). Trabaja en fisiología vegetal celular y molecular. En relación con la investigación espacial, se centra en los efectos fisiológicos de la gravedad alterada para permitir el cultivo de especies vegetales para la exploración espacial humana. Ha realizado experimentos europeos pioneros en la ISS y recientemente ha dirigido un proyecto conjunto de la NASA y la ESA en la Estación Espacial Internacional sobre los efectos de la luz y la gravedad en el desarrollo vegetal, que ha recibido el premio «NASA Group Achievement Award». Ha publicado más de 120 artículos y capítulos de libros y ha asesorado a diversas organizaciones de investigación internacionales. Ha recibido la Medalla de la Asociación Europea de Microgravedad (ELGRA). ✉ [fjmedina@cib.csic.es](mailto:fjmedina@cib.csic.es)