

Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el desarrollo de la agricultura en Marte

Plant growth promoting rhizobacteria for the develop of the agriculture on Mars

Luis León Mendoza

Estación Experimental Agraria Tacna. Dirección de Recursos Genéticos y Biotecnología, Instituto Nacional de Innovación Agraria, Av. Collpa S/N La Agronomica, distrito Coronel Gregorio Albarracín Lanchipa, Tacna, PERÚ
leonmendoza9@gmail.com // <https://orcid.org/0000-0001-9522-4784>

José González Cabeza

Laboratorio de Microbiología Molecular y Biotecnología, Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, PERÚ
CP 13006.
<https://orcid.org/0000-0003-3022-9423>

Resumen

La búsqueda de vida en otros planetas es uno de los retos científicos más importantes de este siglo, centrada principalmente en Marte. El desierto de Atacama es uno de los lugares del planeta con un ambiente similar al planeta rojo, con un núcleo hiper-árido que constituye un ambiente extremo y escaso de vida, debido a factores ambientales. Actualmente no se ha podido confirmar la existencia de vida en dicho planeta, pero se planea llevar la vida a este mediante el cultivo de papa. También se han realizado investigaciones en la aplicación de microorganismos para la recuperación de suelos desérticos, con alta salinidad o poca fertilidad, a través de la interacción de microorganismos y plantas. La presente revisión, describe las similitudes entre el desierto de La Joya en Atacama y Marte, dando conocer su importancia para la búsqueda de vida en dicho planeta. Da conocer los recientes avances en la investigación de cultivos de papa para su desarrollo en Marte o en condiciones similares, además de la importancia de la aplicación de microorganismos que faciliten el crecimiento y adaptabilidad de este cultivo a condiciones inhóspitas.

Palabras clave: Pampas de La Joya, Atacama, papa, Marte, rizobacterias

Abstract

The search for life on other planets is one of the most important scientific challenges of this century, centered mainly on Mars. The Atacama Desert is one of the places on the planet with an environment similar to the red planet, with a hyper-arid core that constitutes an extreme environment and scarce life, due to environmental factors. At the moment it has not been possible to confirm the existence of life in this planet, but it is planned to take the life to this planet by means of potato crop. Also has been research the application of microorganisms for the recovery of desert soils, with high salinity or low fertility, through the interaction of microorganisms and plants. The present review describes the similarities between the La Joya desert in Atacama and Mars, showing its importance for the search for life on that planet. Show the recent advances in the investigation of potato crops for its development on Mars or in similar conditions, in addition to the importance of the application of microorganisms that facilitate the growth and adaptability of this crop to inhospitable conditions.

Keywords: Pampas de La Joya, Atacama, potato, Mars, rhizobacteria

Citación: León, L. & J. González. 2022. Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal para el desarrollo de la agricultura en Marte. *Arnaldoa* 29(2): 277-290. doi:<http://doi.org/10.22497/arnaldoa.292.29206>

Introducción

La búsqueda de vida en otros planetas es uno de los más grandes retos científicos y tecnológicos, el principal centro de búsqueda es Marte, debido a evidencias geológicas y químicas. La sonda europea *Mars Express*, detectó la presencia de cantidades variables de metano en la atmosfera de Marte, en la Tierra, el 90% del metano tiene un origen biológico, sin embargo, el SAM del rover *Curiosity* de la NASA no ha encontrado trazas de este gas en *Gale Crater*, su lugar de aterrizaje, sin poder

confirmar la existe de vida en dicho planeta (Catalá, 2013; Calle, 2013). El desierto de Atacama, presenta características análogas al suelo de Marte y posee una región central hiper-árida. Mediante la réplica de técnicas utilizadas en la expedición Vikingo en los años 70, se llegó a la conclusión, que el centro hiper-árido no existe vida alguna, al no encontrar rastros de material orgánico y presentar compuestos oxidantes similares a los encontrados en Marte, capaces de destruir la materia orgánica (Navarro-González, 2007), coincidiendo con las

investigaciones realizadas con liberación isotópica marcada con Carbono-14 por Azua-Bustos *et al.* (2017), sin embargo en estudios realizados en otras regiones de este desierto se pudo hallar un microambiente, donde se encontraron microorganismos litobionticos en costras de calcio-sulfato (Wierzechos *et al.*, 2006). No se ha podido confirmar con certeza si ha existido o existe vida en Marte, pero recientemente se están realizando investigaciones para llevar vida a dicho planeta, mediante cultivos de papa, considerando como suelo experimental muestras extraídas de las Pampas de la Joya, que forma parte del desierto de Atacama en Perú.

Actualmente se han realizado investigaciones respecto a las rizobacterias que tienen un efecto benéfico en las plantas, usualmente referidas como promotoras del crecimiento vegetal o PGPR, por sus siglas en inglés (plant growth promoting rhizobacteria). Muchas de éstas han sido propagadas y usadas como inoculantes bacterianos, principalmente para mejorar la producción, rendimiento de cultivos y recuperaciones de áreas áridas, mediante mecanismos: indirectos y directos, o una combinación de ambos (Siddikee *et al.*, 2010).

Esta revisión se enfoca básicamente en describir las similitudes entre el desierto de Atacama, principalmente la región de las Pampas de La Joya y Marte. Da conocer los recientes avances en la investigación de cultivos de papa para su desarrollo en Marte o en condiciones similares, además de la importancia de la aplicación de microorganismos que faciliten el crecimiento y adaptabilidad de este cultivo a condiciones inhóspitas

Marte

La distancia de Marte respecto al Sol varía durante un año marciano, que consiste

en 668,6 días solares debido a su órbita elíptica. El clima marciano sufre un gran número de variaciones, en el sentido que avanza y se retraen los casquetes polares con temperaturas alrededor de -123.15°C , mientras en las regiones de la línea ecuatorial la temperatura de la superficie puede llegar a -0.15°C . Las fuertes variaciones en los parámetros orbitales han hecho que la distribución quieta de la superficie varíe con el tiempo, modificando la absorción de la radiación solar y atmosférica. Los parámetros orbitales son cuatro, (1) la distancia significativa d , $1,52366\text{ AU}$, (2) la excentricidad de la órbita e , $0,09341$, (3) el ángulo de inclinación (oblicuo) i , $25,19^{\circ}$ y (4) la longitud aereocentrica L_s y perihelion L_{sp} , 251° . La longitud aereocentrica (L_s) es el índice estacional: durante el equinoccio de primavera en el hemisferio norte 0° (180°) y en el solsticio de invierno en el norte 90° (270°). Debido a la alta excentricidad relativa del hemisferio sur, Marte recibe mucha radiación solar durante el verano, e inversamente, el invierno en el sur tiende a ser muy duro. Los parámetros orbitales han demostrado ser muy importantes, provocando fuertes cambios climáticos en el pasado marciano (Savijärvi, 2014). En la atmosfera la radiación solar es absorbida y disipada por moléculas de aire y partículas de polvo, presentando 95% de dióxido de carbono y polvo, con trazas de agua, pero esto quizás fue más denso en el pasado (Newman *et al.*, 2004; Savijärvi *et al.*, 2015).

La historia geológica e hidrológica de Marte es preservada en parte por las colinas Noachian que cubren aproximadamente la mitad del planeta (Wilson *et al.*, 2010; Diot *et al.*, 2015). En su región sur, se puede observar una red canales y valles extendidos, algunos de estos valles terminan en cráteres y cuencas en forma de depósitos de abanicos aluviales. En esta área existen

varios cráteres antiguos que muestran depósitos lineales en las orillas y capas con diferentes tonalidades, sugiriendo que en algún momento albergaron paleolagos. La erosión y sedimentos transportados han tenido un impacto geomórfico y estratigráfico significativo en el desarrollo de las colinas del sur, particularmente en asociación con cráteres de impacto, donde múltiples sucesiones sedimentarias han sido documentadas (Wilson *et al.*, 2010; Howard *et al.*, 2005; Kerber *et al.*, 2012; Cabrol y Grin, 2010; Ansan *et al.*, 2011; Savijärvi, 2015).

La evidencia geomórfica demuestra un pasado hidrológico, debido a depósitos fluviales, erosión en la superficie de las Colinas del Sur, números hidruros minerales, como hidrato de sílice, filosilicatos y minerales secundarios incluyendo clorhidratos detectados en las colinas, que usualmente requieren volúmenes significativos de agua líquida, combinado con un largo sistema de canales de drenaje sugieren un proceso de moldeado hidrológico en el paisaje de Marte, especialmente en terrenos circundantes de las cuencas de Hellas, que presenta un sistema de drenaje y puede tener rastros de ciertos episodios de sedimentación mediante procesos volcánicos, fluviales, glaciales o eólicos (Carter *et al.*, 2013; Ehlmann *et al.*, 2011; Ehlmand y Edwards, 2014; Matsubara *et al.*, 2013, Ansan *et al.*, 2011).

Desierto de Atacama, Marte en la tierra

Los ecosistemas hiper-áridos representan uno de los hábitats más cambiantes en la Tierra, a menudo las limitaciones en estos ecosistemas brindan un mínimo soporte para el desarrollo de la vida, siendo el desierto de Atacama en las costas del oeste de América del Sur uno de los desiertos más secos del planeta,

atravesando Perú y Chile. Las regiones hiper-áridas emergen independientemente de la actividad humana, desarrollándose naturalmente y por la evolución de los climas secos, este proceso es denominado como aridización, el cual difiere con el proceso de desertificación, que es definido como la degradación del suelo en áreas desérticas como resultado de variaciones climáticas y actividad humana (Fletcher *et al.*, 2012).

El desierto de Atacama abarca 3500 km, entre 10°S a 35°S latitud, and 70°W a 72°W longitud, con un promedio de precipitación menor a 200 mm/año, Houston y Hartley (2003) dividieron este desierto de acuerdo con el Índice Árido (IA) en tres regiones, semiárido ($0,2 < P/PET < 0,05$), árido ($0,05 < P/PET < 0,2$) e hiper-árido ($P/PET < 0,05$). Este índice fue calculado mediante el radio de precipitación y potencial de evapotranspiración (P/PET , por sus siglas en inglés), usando la ecuación de Thornthwite en función de la significancia mensual de temperatura y significancia mensual del número de horas de luz en el día.

Los efectos combinados del sistema de alta presión localizado en el oeste del Océano Pacífico, la corriente fría de Humboldt, y la Cordillera de los Andes interceptan las precipitaciones provocadas por la convergencia intertropical, evitando la formación de nubosidad, siendo los principales factores involucrados en la formación del clima hiper-árido. Estos factores han sido usados para apoyar la evidencia geológica que el Desierto de Atacama se ha mantenido hiper-árido desde el Plioceno tardío, demostrado por el estudio de los sedimentos en su centro hiper-árido (Fletcher *et al.*, 2012; Houston y Hartley, 2003; Evenstar *et al.*, 2009; Dunai *et al.*, 2005).

Las áreas consideradas como base para investigaciones, previas a expediciones en Marte, son las áreas de Yungay y Pampas de La Joya, en Chile y Perú, respectivamente. Estas regiones presentan interesantes diferencias geomorfológicas causadas por variaciones en las elevaciones tectónicas en la cuenca del desierto y las montañas adyacentes de los Andes (Fletcher, 2012; Valdivia-Silvia *et al.*, 2012).

La región Las Pampas de la Joya está localizada en el sur del Perú entre los Departamentos de Arequipa y Moquegua, entre 16°30' y 17°S, y 72°30'-71°30'W. Esta región se puede definir como una unidad geomorfológica caracterizada por una llanura elevada delimitada en el sureste y noreste por los ríos Tambo y Camaná, respectivamente, con la cordillera de los Andes en el noreste y la Cordillera de La Costa en suroestes, teniendo una forma casi triangular abarcando 114 km de largo y 60 km de ancho, a 1200 msnm, dividida en tres sectores por los canales de los ríos Sihuas y Víctor, formado a través de sedimentos volcánicos y cubiertos por basamentos cristalinos. Estos son bordeados en el norte por la cadena volcánica de los Andes caracterizada por cuatro cumbres principales: Corropuna (6425 m), Ampato (6314 m), Hualca (6025 m) y Nevado de Chanchani (6057 m), la cadena volcánica también incluye al volcán dormido El Misti. El desierto de la Joya se encuentra entre los ríos Camaná y Tambor, por el oeste es interrumpida por el canal del río Víctor, que tiene una incisión de casi 1 km de profundidad y cubierto en su interior por basamentos cristalinos. La Cordillera de la Costa define por el sureste los límites fisiográficos de la planicie del desierto La Joya (Lavallée, 2006; Hoke *et al.*, 2007; Schildgen *et al.*, 2010; Valdivia-Silvia *et al.*, 2012).

La geología de la región es compleja; basamentos de la planicie desértica está compuesta por rocas cristalinas variando en eras, los estratos sedimentarios y grupos volcánicos que forman la cubierta de rocas cristalinas incluye secuencias volcánicas sedimentarias del Triásico-Jurásico temprano para Cuaternario con un espesor estimado de 4,5-5 km, de los cuales la mayoría pertenece al Mesozoico. Los depósitos consolidados y semiconsolidados de la era Cuaternaria forman la base del desierto que consiste en unos diez metros de capa lacustre, con una costra de suelo formada por residuos aluviales, fluviales. El suelo verdadero se encuentra ausente, pero se encuentra un grueso regolito en varias partes, generado *in situ* debido a mecanismos de desgaste por las altas temperaturas que pueden llegar hasta 40°C/h entre el mediodía y media noche (Valdivia-Silvia *et al.*, 2012).

Las Pampas de La Joya, exhibe un suelo hiper-árido con un menor nivel de compuestos orgánicos de los presentados en Yungay, además de parámetros geoquímicos muy diferentes como pH, oxidación-reducción, concentraciones de iones y composición química. Estudios realizados mediante el uso de técnicas de volatilización térmica en seis tipos de muestras de suelos hiper-árido de las Pampas de La Joya, mostraron una elevada actividad oxidante, de naturaleza desconocida (Valdivia-Silvia *et al.*, 2012)

Importancia del desierto de Atacama para el estudio de la vida en Marte

El centro hiper-árido del desierto de atacama es considerado como el más seco y el lugar más limitado de vida en la Tierra, con pocos hábitats capaces de sostener un ecosistema microbiano activo. Como tal, es uno de los mejores

lugares análogos de las condiciones áridas extremas en Marte, y un ambiente ideal para explorar la supervivencia y estrategias de adaptación biológica. Un ejemplo claro de la importancia del desierto Atacama en el estudio de la vida en Marte son los resultados obtenidos por Cámara *et al* (2016) que investigaron las ignimbritas riolíticas, que son colonizadas abundantemente por cianobacterias endolíticas y bacterias heterotróficas asociadas debido a que las ignimbritas proporcionan protección de la radiación UV y los niveles excesivos de luz visible. La porosidad de la roca también favorece la hidratación a las células a través de la retención de agua después de escasos eventos de lluvia, incluso cuando el ambiente circundante permanece obstinadamente seco. Este es el primer ejemplo conocido de una comunidad microbiana endolítica que coloniza rocas ignimbrita en un ambiente extremadamente seco. La existencia de un hábitat capaz de soportar abundantes organismos fototróficos y heterotróficos en un entorno que impide la mayoría de las formas de vida sugiere que, si se encuentran depósitos similares en Marte, éstos deberían considerarse objetivos de búsqueda de vida. De hecho, las rocas ignimbritas han sido provisionalmente identificadas en el cráter Gale, el sitio de aterrizaje de la misión Mars Science Laboratory (MSL) y podría ser analizado directamente por el rover Curiosity. El descubrimiento de diversos hábitats endolíticos microbianos en el desierto seco de Atacama también es particularmente relevante en la búsqueda de vida en Marte, ya que proporcionan un continuo en el espectro de los posibles hábitats disponibles para la vida en la superficie del planeta, como las condiciones cambiaron de relativamente húmedo a extremadamente frío y seco. Los patrones de colonización en el desierto de Atacama

también pueden ayudar reducir el número de sitios para buscar vida durante las misiones robóticas, o seleccionar las mejores muestras para recoger en una muestra eventual Misión de retorno.

Importancia de las Rizobacterias

La rizosfera es la región del suelo con la mayor actividad microbiana, con una gran riqueza en nutrientes, donde planta y microorganismo interactúan mutuamente para su beneficio. Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), utilizan uno o varios mecanismos de acción para favorecer este crecimiento, ya sea estimulando la absorción de nutrientes o evitando la acción de microorganismos patógenos (Esquivel-Cote *et al.*, 2013).

Varias bacterias rizosféricas con potencial para estimular el crecimiento de las plantas se han aislado de diferentes lugares y regiones del mundo. Los mecanismos por los cuales estas bacterias tienen la capacidad de estimular el crecimiento de plantas incluyen la producción de fitohormonas, compuestos volátiles, compuestos antimicrobianos (producción de enzimas líticas, sideróforos), fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fosfato y otros. En diferentes lugares del continente americano se han reportado varios aislamientos bacterianos con potencial para estimular el crecimiento de las plantas y algunos de ellos han sido utilizados como formulaciones de inoculantes para incrementar el rendimiento de los cultivos (Molina-Romero *et al.*, 2015).

Los procesos de colonización y estimulación del crecimiento por parte de las rizobacterias podrían estar sujetos a mecanismos estrictos de reconocimiento del hospedero y procesos de señalización molecular entre la bacteria y la planta hospedera (Kamilova *et al.*, 2006). Las

bacterias de tipo PGPR se han clasificado en grupos de acuerdo al efecto benéfico que ejercen sobre la planta (Fibach-Paldi *et al.*, 2012); el cual puede ser directo o indirecto (Ortiz-Castro *et al.*, 2009). Entre las PGPR que realizan un efecto directo se ubican las rizobacterias fitoestimuladoras (Malik & Sindhu, 2011), las que proporcionan nutrientes esenciales como las rizobacterias fijadoras de nitrógeno y las solubilizadoras de fosfatos (Saleem *et al.*, 2007). Las PGPR que ejercen un efecto indirecto afectan el crecimiento de fitopatógenos, lo que permite un mejor desarrollo de las plantas hospederas (Van Loon, 2007).

Rizobacterias en regiones áridas

La microbiota vegetal alberga innumerables taxones bacterianos que promueven el crecimiento y tolerancia al estrés, ayudan a suprimir enfermedades en las plantas, degradan compuestos xenobioticos y pueden influir positivamente en la adaptación en ambientes extremos (Berg *et al.* 2014; El Amrani *et al.* 2015). Según la investigación de El-Sayed *et al.* (2014), los genotipos de rizobacterias más representativos en muestras de suelo rizosférico de plantas nativas del desierto de Almadinah Almunawarah en Reino Saudi, fueron *Bacillus*, *Enterobacter* y *Pseudomonas* que presentaron capacidad de fijación de nitrógeno atmosférico, producción de ácido indolacético, sideróforos, solubilización de zinc y potencial antagonico contra *Fusarium oxysporum* y *Sclerotinia sclerotiorum*.

Inostroza *et al.* (2017), evaluó el consorcio de rizobacterias en ecosistemas áridos chilenos (Consortio C1) y agroecosistemas (Consortio C2), sobre la producción de biomasa vegetal. El efecto promotor del crecimiento vegetal del Consortio C1 y C2 fueron ensayados en semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) cultivadas en macetas

en condiciones controladas y macetas en condiciones naturales, utilizando Andisoles chilenos (Series de Piedras Negras y Freire), solo el Consortio C1 provoco un efecto del 60% en la máxima capacidad de retención de agua en suelos pobres en fósforo de la serie de "Piedras Negras". En condiciones naturales solo el Consortio C1, exhibió efectos estadísticos significativos en 30% de la capacidad máxima de retención de agua, en la serie de "Piedras Negras", manteniendo la biomasa vegetal en 60%, lo que sugiere una posible aplicación de consorcios de rizobacterias de ecosistemas áridos para mejorar el crecimiento de trigo en andisoles chilenos bajo condiciones de escasez de agua.

Los resultados obtenidos por Aamir *et al.* (2013), revelan que la inoculación/coinoculación con *Rhizobium* y RPCV, mejoran el potencial de crecimiento del frijol chino (*Vigna radiata* L.) reduciendo el efecto inhibitorio causado por suelos altamente salinos. De acuerdo Ahmad *et al.* (2011), la inoculación simple y combinada genera una respuesta positiva en el crecimiento, debido a cambios endógenos de etileno por las RPCV que contengan ACC-desaminasa en raíces leguminosas y es probable que la colonización por rizobacterias aumenten la fijación de nitrógeno, solubilización de fosforo, producción de fitohormonas, actividad de quitinasas y producción de sustancias activas biológicas (Panjebashi *et al.* 2012).

Los resultados obtenidos por Aamir *et al.* (2013), revelan que la inoculación/coinoculación con *Rhizobium* y RPCV, mejoran el potencial de crecimiento del frijol chino (*Vigna radiata* L.) reduciendo el efecto inhibitorio causado por suelos altamente salinos. De acuerdo Ahmad *et al.* (2011), la inoculación simple y combinada genera una respuesta positiva en el crecimiento, debido a cambios endógenos de etileno por las RPCV

que contengan ACC-desaminasa en raíces leguminosas y es probable que la colonización por rizobacterias aumenten la fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo, producción de fitohormonas, actividad de quitinasas y producción de sustancias activas biológicas (Panjebashi et al. 2012).

Las investigaciones realizadas por Kavamura *et al.*, 2013 en bacterias asociadas con cactus de la región semiárida brasileña se aislaron basándose en su capacidad para crecer en medio con menor disponibilidad de agua. Se probaron para la producción de exopolisacáridos (EPS), así como la promoción *in vitro* del crecimiento de las plantas Rasgos. Una gran proporción de los aislamientos pertenece al género *Bacillus*. De un total de cuarenta y ocho bacterias, 65% pudieron crecer en medio con menor disponibilidad de agua (0.919Aw), producción de exopolisacáridos Se observó el 65% de las cepas. La producción de ácido indolacético (IAA) superior a 51 gmL⁻¹ Se observó para el 4% y la alta solubilización de Ca-P se verificó para el 6% de los aislamientos. sin tensión Fue capaz de producir cianuro de hidrógeno (HCN), el 71% produjo amoníaco y el 79% mostró un halo de carboximetil Degradación de la celulosa (CMC). *Zea mays* L. promoción del crecimiento bajo estrés hídrico (30% del campo *Bacillus* spp., *Bacillus* spp.

La “papa” en Marte

Las misiones de exploración espacial a largo plazo a Marte requerirán producción de alimentos, instalaciones para sostener la vida humana. Los científicos han estudiado la producción vegetal en ambientes controlados, análogos a los de Marte, para comprender mejor los efectos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas (Nardone *et al.*, 2012).

La producción vegetal en ambientes controlados, para su aplicación en programas espaciales ha sido realizada por años, como el proyecto ruso BIOS (Gitelson *et al.*, 1989), la Cámara de Producción de Biomasa de la NASA, proyectos de pruebas de Apoyo de Vida Lunar y Marciana (Wheeler *et al.*, 1996; Edeen, 2000), el japonés, Experimento de pruebas de facilidad ecológicas (Tako *et al.*, 2005), el canadiense, Mecanismo de Investigación de Sistemas de Ambiente Controlado (Chamberlain *et al.*, 2003; Stasiak *et al.*, 1998; Wehkamp *et al.*, 2012) y otros alrededor del mundo (Wheeler, 2010). Estos estudios han sido realizados controlando la luz, agua, nutrientes, temperatura, composición atmosférica y en algunos casos presión. La presión no es típicamente un problema en un ambiente controlado en la Tierra, pero debe ser considerado en el Espacio donde, por ejemplo, un entorno como Marte la presión atmosférica es de 0,7 kPa, menos del 1% de que en la Tierra al nivel del mar (Nardone *et al.*, 2012).

Wamelink *et al.* (2014) seleccionó especies vegetales de tres grupos: cuatro cultivos diferentes, cuatro fijadores de nitrógeno y seis silvestres que se encuentran naturalmente en Holanda. Sólo especies con semillas relativamente pequeñas fueron elegidos de manera que el stock de nutrientes en las semillas sea rápidamente agotada y la planta depende totalmente de lo que está disponible en los suelos para su crecimiento. Para las plantas silvestres seleccionó las que son capaces de crecer en una amplia gama de circunstancias, los resultados mostraron que es posible cultivar plantas en suelo marciano.

El Centro Internacional de la Papa (CIP) lanzó una serie de experimentos para descubrir si las papas pueden crecer bajo las condiciones atmosféricas de Marte y demostrar así que también son capaces

de crecer en climas extremos en la Tierra. Este esfuerzo de Fase Dos del experimento de CIP para probar el cultivo de papas en condiciones marcianas simuladas comenzó el 14 de febrero de 2016 cuando un tubérculo fue sembrado en un ambiente construido específicamente CubeSat construido por ingenieros de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) Sobre los diseños y el asesoramiento proporcionado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio en el Centro de Investigación Ames (NASA ARC), California. Según e CIP, una ventaja del cultivo de papa es la gran capacidad genética para adaptación a ambientes extremos. El CIP ha aprovechado esa capacidad para criar clones de papa que toleran condiciones tales como la salinidad del suelo y la sequía, con el fin de ayudar a los pequeños agricultores a cultivar alimentos en áreas marginales que podrían crecer con el cambio climático. En 2016, el CIP trajo tierra analógica de Marte desde el desierto de las Pampas de La Joya en el sur de Perú hasta su estación experimental en La Molina, Lima. Ahí CIP fue capaz de mostrar la prueba de que cultivos de papa podrían crecer en este suelo seco y salado con cierta ayuda de suelo fertilizado de la tierra para la nutrición y estructura. Los resultados preliminares son positivos (CIP, 2017).

Desafíos actuales y futuros

La presente revisión ha descrito las condiciones ambientales, geológicas, ecológicas y climáticas del desierto de Atacama, centrándose en las regiones de la Pampa de La Joya y su núcleo híper-árido, el cual posee características análogas al suelo de Marte, tales como, pH, oxidación-reducción, concentración de iones y composición química, de acuerdo con los estudios de Valdivia-Silva *et al* (2012) el suelo híper-árido de las Pampas de La Joya, mostraron una elevada actividad oxidante,

de naturaleza desconocida, similar a las encontradas en Marte lo que provoca que el suelo sea carente de vida. Las condiciones climáticas también son inclementes, con una fuerte radiación solar, temperatura elevada y carente de precipitaciones. Debido a lo anteriormente descrito el desierto de Atacama es uno de los principales lugares para preparar y probar equipos para expediciones a Marte o estudio de este.

Actualmente no se ha podido confirma si existe o ha existido vida en Marte, pero el CIP está realizando investigaciones para poder llevar vida ha dicho planeta, mediante el desarrollo de cultivos de papa que sean capaces de desarrollarse en ese ambiente inhóspito. Pero ¿Cuáles son los desafíos actuales y futuros que puede presentar esta investigación?, de acuerdo con la información mostrada en esta revisión, uno de los principales inconvenientes es la composición fisicoquímica del suelo, la presencia de compuestos oxidantes y las limitaciones que va presentar la planta para la absorción de nutrientes; solución a estos inconvenientes puede ser la variación genética para obtener cultivos resistentes a estas condiciones. Otro de los puntos a tratar es el comportamiento de los cultivos en microgravedad que afectaría la estructura y fisiología de los cultivos, para evitar esto se puede desarrollar plántulas en condiciones de controladas de microgravedad desde la germinación de la planta, pero existe la posibilidad que su capacidad de absorción de nutrientes se vea afectada, sumado a esto están las características del suelo podría conllevar a resultados adversos. Esta revisión no solo se enfoca en las investigaciones de cultivos en microgravedad o en suelos con alto niveles de compuestos oxidantes, sino que sugiere el empleo de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, las

cuales han presentado resultados exitosos en la recuperación de suelos agrícolas áridos. En investigaciones resientes se ha podido determinar la posible existencia de microorganismos que han logrado desarrollarse en el núcleo hiper-árido del desierto de Atacama, por lo cual deja la ventana abierta para realizar una mayor investigación de estos microorganismos, estudiar si podría entablar alguna relación simbiótica con alguna planta u otros microorganismos. Otra alternativa es la investigación de microorganismo en los que se ha comprobado su capacidad como promotores del crecimiento vegetal y estudiar su comportamiento en suelos como los presentes en el desierto de Atacama y verificar si generan un efecto positivo en la adaptación o desarrollo de los cultivos de papa u otros.

Conclusiones

La búsqueda de vida en otros planetas es uno de los retos científicos y tecnológicos con más desafíos en el presente siglo, con los esfuerzos centrados principalmente en Marte. El desierto de Atacama presenta condiciones ambientales, geológicas y climáticas similares a las encontradas en Marte, sirviendo como modelo para probar y desarrollar nuevas equipos para futuras expediciones en dicho planeta. Aunque no se ha podido confirmar si existe o ha existido vida en el planeta rojo, se están realizando investigaciones para llevar vida a este, mediante cultivos de papa. En esta revisión se ha dado conocer, las resientes investigaciones encausadas en este tema, siendo los esfuerzos liderado por el Centro Internacional de la Papa, que está probando desarrollar cultivos de papa en muestra de suelo extraído del desierto de Atacama, en la región de las Pampas de La Joya, además esta revisión también se enfocó en

rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal, empleadas en la recuperación de suelo agrícolas áridos, las cuales podrían ser de utilidad para facilitar la adaptación y desarrollo de estos cultivos de papa en la región de las Pampas de la Joya.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Instituto Nacional de Innovación Agraria mediante el Proyecto de inversión Pro-Agrobio con CUI2480490, por su apoyo en la investigación.

Contribución de los autores

L.L.M presentó la propuesta original, recolección de información y redacción inicial del manuscrito. J.G.C colaboró con las observaciones y corrección del manuscrito final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés alguno.

Literatura citada

- Aamir, M.; A. Aslam; M. Y. Khan; M. U. Jamshaid; M. Ahmad; H. N. Asghar & Z. A. Zahir.** 2013. Co-inoculation with *Rhizobium* and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for inducing salinity tolerance in mung bean under field condition of semi-arid climate. *Asian Journal Agriculture Biology*, 1(1):17-22.
- Ahmad, M.; Z. A. Zahir & H. N. Asghar.** 2011. Inducing salinity tolerance in mung bean through rhizobia and plant growth promoting rhizobacteria containing 1-aminocyclopropane 1- carboxylate-deaminase. *Canadian Journal Microbiology*, 57: 578-589.
- Ansan, V.; D. Loizeau; N. Mangold; S. Le Mouélic; J. Carter; F. Poulet & B. Gondet.** 2011. Stratigraphy, mineralogy, and origin of layered deposits inside Terby crater, Mars. *Icarus*, 211(1): 273-304.
- Azua Bustos, A.; C. González-Silva & G. Corsini.** 2017. The hyperarid core of the Atacama Desert, an extremely dry and carbon deprived habitat of potential interest for the field of carbon science. *Frontiers in microbiology*, 8: 993.

- Berg, G.; M. Grube; M. Schloter & K. Smalla.** 2014. Unraveling the plant microbiome: looking back and future perspectives. *Frontier Microbiology*, 5:148.
- Cabrol, N. A. & E. A. Grin.** 2010. Searching for lakes on Mars: Four decades of exploration. En: *Lakes on Mars*. UK, Elsevier, Oxford 1-29pp.
- Calle, A.** 2013. La exploración de Marte: entre la decepción y la expectación. *Revista de Ciencias*, 3: 8-16.
- Cámara, B.; V. Souza-Egipsy; C. Ascaso; O. Artieda; A. De Los Ríos & J. Wierzchos.** 2016. Biosignatures and microbial fossils in endolithic microbial communities colonizing Ca-sulfate crusts in the Atacama Desert. *Chemical Geology*, 443: 22-31.
- Carter, J.; F. Poulet; J. P. Bibring; N. Mangold & S. Murchie.** 2013. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: Updated global view. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(4): 831-858.
- Catalá Espí, A.** 2013. Vida, Marte y ExoMars. *Revista de Ciencias*, 3:17-20.
- Chamberlain, C.; M. A. Stasiak & M. A. Dixon.** 2003. Response of plant water status to reduced atmospheric pressure. *SAE Technical Paper Series*, 2003-01-2677.
- CIP, Center International Potato.** 2017. Indicators show potatoes can grow on Mars. Disponible en: <https://cipotato.org/blog/indicators-show-potatoes-can-grow-mars/>
- El Amrani, A.; A. S. Dumas; L. Y. Wick; E. Yergeau & R. Berthomé.** 2015. "Omics" Insights into PAH Degradation toward Improved Green Remediation Biotechnologies. *Environmental Science & Technology*, 49:11281–11291.
- Ehlmann, B. L., J. F. Mustard; S. L. Murchie; J. P. Bibring; A. Meunier; A. A. Fraeman & Y. Langevin.** 2011. Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature*, 479(7371):53-60.
- Ehlmann, B. L. & C. S. Edwards.** 2014. Mineralogy of the Martian surface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 291-315.
- El-Sayed, W.; A. Akhkhah; M. El-Naggar & M. Elbadry.** 2014. *In vitro* antagonistic activity, plant growth promoting traits and phylogenetic affiliation of rhizobacteria associated with wild plants grown in arid soil. *Frontiers in Microbiology*, 5:651.
- Esquivel-Cote, R.; M. Gavilanes-Ruiz; R. Cruz-Ortega & P. Huante.** 2013. Importancia agrobiotecnológica de la enzima ACC Desaminasa en rizobacterias, Una Revisión. *Revista de Fitotecnología de México*, 36(3): 251-258.
- Evenstar, L. A.; A. J. Hartley; F. M. Stuart; A. E. Mather; C. M. Rice & G. Chong.** 2009. Multiphase development of the Atacama Planation Surface recorded by cosmogenic ³He exposure ages: Implications for uplift and Cenozoic climate change in western South America. *Geology*, 37(1): 27-30.
- Diot, X.; M. R. El-Maarry; L. Guallini; F. Schlunegger; K. P. Norton; N. Thomas & P. M. Grindrod.** 2015. An ice-rich flow origin for the banded terrain in the Hellas basin, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120(12): 2258-2276.
- Dunai, T. J.; G. A. G. López & J. Juez-Larré.** 2005. Oligocene–Miocene age of aridity in the Atacama Desert revealed by exposure dating of erosion-sensitive landforms. *Geology* 33(4): 321-324.
- Fibach-Paldi, S.; S. Burdman & Y. Okon.** 2012. Key physiological properties contributing to rhizosphere adaptation and plant growth promotion abilities of *Azospirillum brasilense*. *FEMS Microbiology Letter*, 326: 99-108.
- Fletcher, L.E.; J. E. Valdivia-Silva; S. Perez-Montaña; R. M. Condori-Apaza; C. A. Conley & C. P. McKay.** 2012. Variability of organic material in surface horizons of the hyper-arid Mars-like soils of the Atacama Desert. *Advances in Space Research*, 49(2): 271-279.
- Gitelson, I. I.; I. A. Terskov; B. G. Kovrov; Lisovskii, G.M., Okladnikov, Yu.N., Sid'ko, F.Ya., I. N. Trubachev; M. P. Shilenko; S. S. Alekseev; I. M. Pan'kova & L. S. Tirranen.** 1989. Long-term experiments on man's stay in biological life-support system. *Advances in Space Research*, 9: 65-71.
- Houston, J. & A. Hartley.** 2003. The central andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of HYPER-ARIDITY in the Atacama Desert. *International Journal of Climatology*, 23: 1453 – 1464.
- Hoke, G. D.; B. L. Isacks; T. E. Jordan; N. Blanco; A. J. Tomlinson & J. Ramezani.** 2007. Geomorphic evidence for post-10 Ma uplift of the western flank of the central Andes 18 30'–22 S. *Tectonics*, 26(5).
- Howard, A. D.; J. M. Moore & R. P. Irwin.** 2005. An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars: 1. Valley network incision and associated deposits. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E12).

- Inostroza, N. G.; P. J. Barra; L. Y. Wick; M. L. Mora & M. A. Jorquera.** 2017. Effect of rhizobacterial consortia from undisturbed arid- and agro-ecosystems on wheat growth under differing conditions. *Letters in Applied Microbiology*, 64(2): 158-163.
- Kamilova, F.; L. V. Kravchenko; A. I. Shaposhnikov; T. Azarova; N. Makarova & B. Lugtenberg.** 2006. Organic acids, sugars, and L-tryptophane in exudates of vegetables growing on stonewool and their effects on activities of rhizosphere bacteria. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 19(3): 250-256.
- Kerber, L.; J. W. Head; J. B. Madeleine; F. Forget & L. Wilson.** 2012. The dispersal of pyroclasts from ancient explosive volcanoes on Mars: Implications for the friable layered deposits. *Icarus*, 219(1): 358-381.
- Lavallée, D.** 2006. Secuencias y consecuencias de algunos procesos de neolitización en los Andes. *Estudios atacameños*, 32: 35-41.
- Malik, D. K. & S. S. Sindhu.** 2011. Production of indole acetic acid by *Pseudomonas* sp.: effect of coinoculation with *Mesorhizobium* sp. *Cicer* on nodulation and plant growth of chickpea (*Cicer arietinum*). *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17(1): 25-32.
- Matsubara, Y.; A. D. Howard & J. P. Gochenour.** 2013. Hydrology of early Mars: Valley network incision. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(6): 1365-1387.
- Molina-Romero, D.; M. R. Bustillos-Cristales; O. Rodríguez-Andrade; Y. E. Morales-García; Y. Santiago-Saenz; M. Castañeda-Lucio & J. Muñoz-Rojas.** 2015. Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biologicas*, 17(2): 24-34.
- Nardone, E.; P. Kevan; M. Stasiak & M. Dixon.** 2012. Atmospheric Pressure Requirements of Bumblebees (*Bombus impatiens*) as Pollinators of Lunar or Martian. *Gavitational and Space Biology*, 26(2): 12-21.
- Navarro-González, R.** 2007. Marte en el desierto de Atacama, Chile. *CienciaUAT* 1(4), 20-21.
- Newman, C. E.; P. L. Read & S. R. Lewis.** 2004. Investigating atmospheric predictability on Mars using breeding vectors in a general-circulation model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(603): 2971-2989.
- Ortiz-Castro, R.; H. A. Contreras-Cornejo; L. Macías-Rodríguez & J. López-Bucio.** 2009. The role of microbial signals in plant growth and development. *Plant signaling & behavior* 4(8): 701-712.
- Panjebashi, M., M. R. H. S. Hadi & M. T. Darzi.** 2012. Effects of the *Rhizobium* and PGPRs bacterium on seed yield and yield components in chickpea (*Cicer arietinum*). *International Journal Agronomy & Plant Production*, 3: 651-655.
- Saleem, M.; M. Arshad; S. Hussain & A. S. Bhatti.** 2007. Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC deaminase in stress agriculture. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 34(10): 635-648.
- Savijärvi, H.** 2014. A toy climate model for Mars. *Icarus*, 242(2014): 105-111.
- Savijärvi, H. I.; A. M. Harri & O. Kempainen.** 2015. Mars Science Laboratory diurnal moisture observations and column simulations. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120(5): 1011-1021.
- Schildgen, T. F.; G. Balco & D. L. Shuster.** 2010. Canyon incision and knickpoint propagation recorded by apatite $4\text{ He}/3\text{ He}$ thermochronometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 293(3): 377-387.
- Siddikee, M. A.; P. S. Chauhan; R. Anandham; G. H. Han & T. Sa.** 2010. Isolation, characterization, and use for plant growth promotion under salt stress, of ACC deaminase-producing halotolerant bacteria derived from coastal soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 20(11): 1577-1584.
- Tako, Y.; R. Arai; T. Tani & K. Nitta.** 2005. Estimation of flows of carbon and oxygen in the CEEF system based on data collected in a stable phase of sequential crop cultivation lasting more than 100 days. *SAE Technical Paper Series*. 2005-01-3108.
- Valdivia-Silva, J. E.; R. Navarro-González; J. de la Rosa & C. P. McKay.** 2012. Decomposition of sodium formate and L- and D-alanine in the Pampas de La Joya soils: Implications as a new geochemical analogue to Martian regolith. *Advances in Space Research*, 49(5): 821-833.
- Van Loon, L. C.** 2007. Plant responses to plant growth-promoting rhizobacteria. *European Journal of Plant Pathology*, 119(3): 243-254.
- Wamelink, G. W. W.; J. Y. Frissel; W. H. J. Krijnen; M. R. Verwoert & P. W. Goedhart.** 2014. Can Plants Grow on Mars and the Moon: A Growth Experiment on Mars and Moon Soil Simulants. *Plos One*, 9(8): 103138.

- Wierzchos, J.; C. Ascaso & C. P. McKay.** 2006. Endolithic cyanobacteria in halite rocks from the hyperarid core of the Atacama Desert. *Astrobiology*, 6(3): 415-422.
- Wehkamp, C. P.; M. Stasiak; L. Lawson; N. Yorio; G. Stutte; J. Richards; R. Wheeler & M. Dixon.** 2012. Radish (*Raphanus sativa* L. cv. Cherry Bomb II) growth, net carbón exchange rate, and transpiration at decreased atmospheric pressure and/or oxygen. *Gravitational and Space Biology*, 26: 3-16.
- Wheeler, R. M.** 2010. Plants for human life support in space: from Myers to Mars. *Gravitational and Space Biology* 23: 25-36.
- Wheeler, R. M.; C. L. Mackowiak; G. W. Stutte; J. C. Sager; N. C. Yorio; L. M. Ruffe; R. E. Fortson; T. W. Dreschel; W. M. Knott & K. A. Corey.** 1996. NASA's Biomass Production Chamber: a testbed for bioregenerative life support studies. *Advances in Space Research*, 18: 215-224.
- Wilson, S. A.; J. M. Moore; A. D. Howard & D. E. Wilhelms.** 2010. Evidence for ancient lakes in the Hellas region. En: *Lakes on Mars*, UK, Elsevier, Oxford 195-222pp.

