

# **RIZOSFERA, BIODIVERSIDAD Y AGRICULTURA SUSTENTABLE**

---

Inés Eugenia García de Salamone, Susana Vázquez  
Claudio Penna & Fabricio Cassán  
**EDITORES**

# **RIZOSFERA, BIODIVERSIDAD Y AGRICULTURA SUSTENTABLE**

---

Inés Eugenia García de Salamone, Susana Vázquez  
Claudio Penna & Fabricio Cassán  
**EDITORES**

Publicación Electrónica del Taller Internacional sobre  
Rizosfera, Biodiversidad y Agricultura Sustentable 2010

Desarrollado el 21 y 22 de Octubre de 2010.  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina

---

ISBN 978-987-26716-1-7



Asociación Argentina de Microbiología  
República Argentina

**2013**

# Índice de Contenidos

**Prólogo..... 13**

Inés Eugenia García de Salamone

Capítulo 1

**Efecto de las prácticas agronómicas sobre las bacterias deletéreas rizosféricas y endofitas ..... 15**

Effect of agronomic practices on deleterious rhizosphere and endophytic bacteria  
Marleny Burkett-Cadena, Camilo A. Ramirez, Mark R. Liles, Joseph W. Kloepper

Capítulo 2

**Interacciones entre fitopatógenos y microorganismos benéficos en la rizosfera ..... 33**

Interactions among plant pathogens and beneficial rhizosphere microorganisms  
Marta C. Rivera, Eduardo R. Wright

Capítulo 3

**Hongos formadores de micorrizas arbusculares: Influencia de las prácticas agronómicas sobre su diversidad y dinámica de colonización ..... 47**

Arbuscular mycorrhizal fungi: Influence of agronomic practices on diversity and dynamics of colonization  
Santiago Schalamuk, Magdalena Druille, Marta N. Cabello

Capítulo 4

**Huellas de la simbiosis pasto-endofito en el agroecosistema ..... 73**

Footprints of grass-endophyte symbiosis in agroecosystems  
Marina Omacini, Pedro E. Gundel, María Semmartin

Capítulo 5

***Bacillus thuringiensis* y su utilidad en el control de insectos asociados a la rizosfera ..... 89**

*Bacillus thuringiensis* and their utility in the control of insects associated to the rhizosphere  
Diego H. Sauka; Rodrigo H. Monella, Graciela B. Benintende

Capítulo 6

**Nematodos como indicadores de la calidad del suelo: Efectos de la fertilización nitrogenada ..... 109**

Nematodes as indicators of soil quality: Effects of nitrogen fertilization  
Claudia Viviana Azpilicueta, María Cristina Aruani

Capítulo 7

**Perfil Fisiológico de Comunidades de Suelo Basado en el Consumo de Oxígeno ..... 123**

Community-Level Physiological Profiling of Soil Communities Based on Oxygen Consumption

Jay L. Garland, M. Celina Zabaloy

Capítulo 8

**Bacterias solubilizadoras de fósforo como biofertilizantes: aislamiento, caracterización, diversidad y promoción del crecimiento vegetal .... 137**

Phosphate solubilizing bacteria as biofertilizers: isolation, characterization, diversity and growth vegetable promotion

Leticia A. Fernández, Marcelo A. Sagardoy

Capítulo 9

**Investigación aplicada en *Azotobacter* sp. dirigida a la promoción de crecimiento en cultivos de interés económico en Colombia ..... 151**

*Azotobacter* sp. applied research aimed to growth promotion of crops with economics interest in Colombia

Ruth Rebeca Bonilla, René Novo, Belisario Roncallo, Mauricio Camelo, Paola Criollo, Germán Andrés Estrada, María Fernanda Garrido, Mónica López, Andrés Eduardo Moreno, Melissa Obando, Lorena Parra, Diego Mauricio Rivera, Daniel Fernando Rojas, Mario Van Strahlen, Corina Zambrano

Capítulo 10

**El género *Pseudomonas* en suelos agrícolas y en rizosfera. De moléculas a comunidades ..... 173**

*Pseudomonads* in agricultural soils and rhizosphere. From molecules to communities

Betina Agaras, Claudio Valverde

Capítulo 11

**Asociación entre *Azospirillum brasilense* y plantas de frutilla (*Fragaria ananassa*): quimiotaxis y colonización radicular ..... 195**

Association between *Azospirillum brasilense* and strawberry plants (*Fragaria ananassa*): chemotaxis and root colonization

Raúl O. Pedraza, María F. Guerrero-Molina, Beatriz C. Winik, María L. Tortora, Alicia L. Ragout, Katia R. Teixeira, Beatriz E. Baca

Capítulo 12

**Etileno como mediador de los mecanismos directos e indirectos de la promoción del crecimiento vegetal ejercido por rizobacterias ..... 215**

Ethylene as a mediator of direct and indirect mechanisms carried out by plant growth promoting rhizobacteria

Claudia M. Ribaudó, Daniela S. Riva, José A. Curá, Clara Ponds, Antonio Granell-Richart, María L. Cantore

Capítulo 13

**Más allá del tratamiento a las semillas: Evolución de productos basados en PGPRs que contienen complejas comunidades microbianas ..... 241**

Beyond seed treatments: evolution of PGPR products containing complex microbial communities

Joseph W. Kloepper, Juan David Castillo, Marleny Burkett-Cadena, Katheryn S. Lawrence

Capítulo 14

**Bacterias promotoras de crecimiento vegetal como componentes en el mejoramiento ambiental ..... 261**

Plant growth-promoting bacteria as a component for environmental improvement

Luz E. de-Bashan, M.C. Juan-Pablo Hernández, Yoav Bashan

Capítulo 15

**Diversidad funcional de comunidades microbianas rizosféricas en suelos expuestos a sustancias contaminantes ..... 287**

Functional diversity of rhizosphere microbial communities in soils exposed to contaminants

Jhovana S. Escobar Ortega, Agr. Luciana P. Di Salvo, Florencia D’Auria,

Sebastian M. Gatica, Inés E. García de Salamone

Capítulo 16

**Acumulación y tolerancia al metal pesado cadmio en rizobios de vida libre y en simbiosis con leguminosas ..... 307**

Accumulation and tolerance to heavy metal cadmium in free-living rhizobia and in symbiosis with legumes

Stella Castro, Eliana Bianucci, Jéscica Rivadeneira, María del Carmen Tordable,

Adriana Fabra, Juan Sobrino-Plata, Luis Hernández, Ramón Carpena-Ruiz

Capítulo 17

**Micorrizorremediación como alternativa para la recuperación de suelos contaminados por actividades mineras ..... 325**

Myco-rhizoremediation as alternative for recovering soils polluted by mining activities

Pablo Cornejo, Sebastián Meier, César Arriagada, Fernando Borie

## Capítulo 14

# **Bacterias promotoras de crecimiento vegetal como componentes en el mejoramiento ambiental**

## Plant growth-promoting bacteria as a component for environmental improvement

Luz E. de-Bashan, Juan-Pablo Hernández y Yoav Bashan

Grupo de Microbiología Ambiental, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Mar Bermejo 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, B.C.S. 23090, México, The Bashan Foundation, 3740 NW Harrison Blvd., Corvallis, Oregon 97330, USA.  
E-mail: bashan@cals.arizona.edu

### **Introducción**

Las Bacterias Promotoras de Crecimiento Vegetal [PBPB por sus siglas en inglés Plant Growth Promoting Bacteria Bashan (Holguin 1998) o PGPR, Plant Growth Promoting Rhizobacteria (Kloepper et al. 1980) en este capítulo nos referiremos a estas como PGPB, término aceptado internacionalmente], son bacterias aisladas de diversos ambientes con la habilidad potencial de afectar de manera positiva el crecimiento de las plantas. La inoculación con PGPB/PGPR es una práctica agrícola común que ha ido en aumento en años recientes (Bashan 1998; Diaz-Zorita, Fernandez-Canigia 2009). Las PGPB afectan a las plantas mediante una multitud de mecanismos diferentes y existen en la literatura revisiones extensivas que los describen (Lucy et al. 2004; Bashan, de-Bashan 2005, 2010; Lugtenberg, Kamilova 2009). Probablemente algunos de ellos son válidos para las PGPB empleadas en los estudios ambientales, por tal motivo, este capítulo no se centrará en la discusión de tales mecanismos.

Es bien conocido que existe un continuo descenso en la calidad ambiental en todo el planeta debido a actividades humanas, principalmente deforestación y liberación desmedida de contaminantes, tales como metales pesados, y exceso de nutrientes (N y P) al ambiente. La opción de retirar y trasladar los contaminantes a rellenos sanitarios es costosa y con frecuencia poco práctica, debido principalmente a la cantidad de suelo involucrado, como sucede en los desechos mineros, y al aumento constante de los sitios contaminados. De esta manera, es importante encontrar opciones biotecnológicas de remediación de bajo costo. Una de las estrategias

emergentes es el uso de tecnologías que usan las plantas como extractoras, mitigadoras y estabilizadoras de los contaminantes (fitorremediación) o que estabilizan y recuperan la productividad del suelo (reforestación) (Cunningham et al. 1995; McCutcheon, Schnoor 2003). Los beneficios que presenta la fitorremediación involucran, entre otros, crear suelo más sano, promover y sostener comunidades bacterianas esenciales para una biorremediación a largo plazo y en últimas, mejorar el paisaje (Mendez, Maier 2008). Algunas plantas no pueden establecerse en estos sistemas degradados, y aun en el caso en que lo hagan, generalmente se ven afectadas por las condiciones ambientales adversas, tales como la excesiva concentración de los contaminantes, el pH extremo (alto o bajo), la escasez de nutrientes, la pobre estructura del suelo y una comunidad microbiana severamente afectada; como una forma de ayudar en su establecimiento se ha propuesto su inoculación con PGPB y con hongos micorrízicos arbusculares. Estos microorganismos se encuentran actualmente bajo experimentación en programas de revegetación, reforestación de suelos erosionados, tratamiento biológico de aguas residuales, fitorremediación, fitoestabilización y restauración de ecosistemas de manglar (Bashan et al. 1999; Bashan, Holguin 2002; de-Bashan et al. 2002a, 2004; Hernandez et al. 2006; Lebeau et al. 2007; Grandlic et al. 2008).

El objetivo de este capítulo es presentar el estado del arte en el uso de PGPB en re-vegetación y reforestación de sitios desertificados y sitios contaminados, fitoestabilización de desechos mineros, fitoextracción de metales pesados y contaminantes orgánicos, fitodegradación de contaminantes, reforestación de manglares y mejoramiento de tratamiento terciario de aguas residuales.

## **Uso de PGPB en la revegetación y reforestación de suelos desertificados y erosionados**

Los suelos de zonas áridas se ven continuamente degradados por las actividades humanas (Wang et al. 2004) en un proceso llamado desertificación. La desertificación reduce las tierras cultivables, aumenta la erosión del suelo y el riesgo de inundaciones, reducen la producción agrícola y producen enfermedades respiratorias debido a la polución por polvo (Mctainsh 1986; Ortega-Rubio et al. 1998; Wang et al. 2004).

La restauración de zonas desérticas severamente degradadas, con arbustos, árboles y cactus es siempre difícil y en muchos casos solo marginalmente exitosa (Glenn et al. 2001; Roundy et al. 2001; Bean et al. 2004; Banerjee et al. 2006). Entre los principales problemas que se presentan en estas áreas están el que sistema de árboles nodriza que gobiernan la vegetación natural en el desierto se encuentra destruido y la capa superficial de suelo con sus microorganismos benéficos esta erosionada por acción del viento y el agua, la materia orgánica es muy baja, la estructura del suelo esta

destruida, hay una limitada disponibilidad de nutrientes y el agua es escasa. Por estas razones, la sucesión natural y la revegetación en estas zonas áridas, si ocurre, es muy lenta, por lo que cualquier intento de reforestar el desierto con plantas nativas debe considerar primordialmente la restauración de la microflora benéfica asociada con estos árboles y arbustos, además de proporcionar una fuente adicional de materia orgánica (Velázquez-Rodríguez et al. 2001; Bacilio et al. 2006; Grandlic et al. 2008; Bashan, de-Bashan 2010).

Entre las estrategias utilizadas para encarar la desertificación están la de reforestar con plantas nativas y exóticas (Moore, Russell 1990; Miyakawa 1999), crear una cobertura agrícola y de pastizales (Portnov, Safriel 2004), mejorar la calidad del suelo con compost o lodos para aumentar el contenido de materia orgánica y la capacidad de retención de agua (Mendez et al. 2007), e inocular las plantas con microorganismos promotores de crecimiento vegetal (Grandlic et al. 2008; Bashan et al. 2011). De manera específica, la reforestación en suelos desérticos degradados involucra al menos tres etapas (Grover, Musick 1990). Primero, es necesario establecer de manera rápida una cubierta vegetal con plantas anuales nativas que contrarresten el proceso de erosión, una tarea difícil de realizar cuando las lluvias son esporádicas o impredecibles (Roundy et al. 2001; Banerjee et al. 2006). Segundo, se requiere el establecimiento de una cobertura de plantas tipo arbustivas para lograr la reforestación a corto y mediano plazo (Bean et al. 2004). El último paso es el establecimiento de un programa a largo plazo que controle la erosión del suelo, utilizando plantas de crecimiento lento tales como el cactus cardón gigante *Pachycereus pringlei* (Bashan et al. 1999, 2000b).

Como una forma de coadyuvar en programas de revegetación, deben introducirse de manera artificial algunos microorganismos esenciales que promuevan el crecimiento de las plantas. Las PGPB y los hongos micorrízicos arbusculares son benéficos en ambientes limitantes y adversos, debido a su rol en la mitigación de estreses ambientales en las plantas (Sylvia, Williams 1992). Las PGPB del género *Azospirillum* ejercen sus principales efectos promotores de crecimiento cuando las plantas están sometidas a estrés tales como alta salinidad (Bacilio et al. 2004), sequía (Creus et al. 1997, 1998), excesivos ácidos húmicos (Bacilio et al. 2003), pH (de-Bashan et al. 2005), y metales pesados (Belimov, Dietz 2000). Las hifas de los hongos micorrízicos arbusculares permean grandes volúmenes de suelo (Camel et al. 1991), interconectando los sistemas radicales de las plantas adyacentes -lo cual facilita el intercambio de nutrientes entre ellas- contribuyendo al crecimiento de las plantas y al mejoramiento de la estructura del suelo, debido a su íntima asociación con las células vivas dentro de las raíces y el suelo (Bethlenfalvay, Schüepp 1994; Wright, Upadhyaya 1998; Bethlenfalvay et al. 2007).

Hasta el momento se ha publicado una relativamente gran cantidad de trabajos que describen la utilización de la PGPB *Azospirillum brasilense*, de amplio uso en agricultura, para mejorar el crecimiento de plantas en desiertos que han perdido su capacidad natural de revegetación (Puente, Bashan 1993; Bashan et al. 1999; Carrillo-García et al. 2000; Carrillo et al. 2002; Bacilio et al. 2006). A.



*brasilense* posee múltiples mecanismos de promoción de crecimiento tales como la producción de varias fitohormonas principalmente IAA, giberelinas y óxido nítrico, tiene capacidad diazotrofa, además de varios mecanismos menores, todos trabajando en secuencia para mejorar el crecimiento de las plantas (Bashan et al. 2004; Bashan, de-Bashan 2010). Estudios iniciales han demostrado que al inocular el cactus *Pachycereus pringlei* con *A. brasilense* hay un aumento en el crecimiento de la planta (Puente, Bashan, 1993). En un experimento de campo a lo largo de un camino de ripio altamente erosionado en México, tres especies diferentes de cactus fueron inoculadas con la bacteria y como resultado se obtuvo un porcentaje mayor de sobrevivencia, 76%, de estas plantas en comparación con plantas control no inoculadas, donde menos del 2% de las plantas sobrevivieron después de 3.5 años. El resultado más significativo en este cultivo de cactus fue el control de la erosión del suelo en el área y la acumulación de suelo superficial nuevo (Bashan et al. 1999). Adicionalmente, *A. brasilense* afecta la actividad de las enzimas de la vía del fosfogluconato y mejora el crecimiento de plántulas de mezquite amargo (*Prosopis articulata*) que han sido cultivadas en suelos pobres (Leyva, Bashan 2009).

En un ensayo en invernadero, se estudió el efecto que la inoculación con PGPB (*A. brasilense* y *Bacillus pumilus*), hongos micorrízicos arbusculares no identificados (principalmente *Glomus* sp.) y compost común, ejercía sobre tres árboles de leguminosa de lento crecimiento, comúnmente usados en programas de reforestación y en jardinería en el desierto de Sonora, en el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos. El mezquite amargo y el palo verde (*Parkinsonia microphylla*) respondieron de manera positiva en varios de los parámetros medidos, mientras que no se obtuvo respuesta con palo junco (*Parkinsonia florida*). La sobrevivencia de las tres especies fue de más del 80%, con una sobrevivencia del mezquite de más del 100% después de 10 meses de cultivo. La inoculación con microorganismos promotores de crecimiento ocasionó efectos significativos en el intercambio gaseoso en las hojas de estas plantas, medido como la transpiración y la resistencia a la difusión, cuando estos árboles fueron cultivados sin restricciones de agua (Bashan et al. 2009). Con esta misma combinación de inoculación se realizaron siete ensayos en campo, utilizando adicionalmente cactus cardón. La estrategia para reducir el largo proceso de sucesión ecológica en el desierto, que usualmente se presenta durante el establecimiento de plantas clímax tales como el cactus cardón, fue asociar las plántulas del cactus con árboles de leguminosa que actúan como nodrizas y ayudan al establecimiento y crecimiento del cactus (Bashan et al. 1999, 2000b; Carrillo-García et al. 1999). Este estudio de campo demostró que la restauración de zonas desérticas severamente erosionadas es posible utilizando árboles de leguminosa nativos ayudados parcialmente por agentes microbianos y compost, destinados a aumentar la fertilidad del suelo y la actividad microbiana cerca de estos (Bashan et al. 2011).

Adicional al uso de las PGPB de origen agrícola, se han aislado PGPB nativas del desierto de la superficie de raíces de cactus cardon (Puente et al. 2004a),

endófitas de cardones (Puente et al. 2009a) y endófitas del cactus *Mammillaria fraileana* (Lopez et al. 2011a), estas dos especies de cactus creciendo como plantas pioneras sobre rocas y riscos en ausencia de suelo. Las bacterias endófitas aparentemente intemperizan las rocas sobre las cual crecen las plantas, liberando minerales esenciales y al mismo tiempo producen pequeñas cantidades de suelo que posteriormente será lavado de las pendientes y acumulado en las tierras bajas, permitiendo de esta manera el crecimiento de otras plantas del desierto que no son capaces de crecer sobre rocas (Lopez et al. 2009). Al eliminar las endófitas de las semillas se obtiene un crecimiento y desarrollo más lento en las plántulas de cactus. Cuando se inocularon semillas de estos cactus con las mismas bacterias y se cultivaron en roca molida por un periodo largo de tiempo, casi todas las bacterias mostraron ser promotoras de crecimiento para estas plantas, permitiéndoles establecerse en ambientes extremadamente adversos (Puente et al. 2004b, 2009b; Lopez et al. 2011b). Finalmente, varias PGPB aisladas de zonas áridas mejoraron el enraizamiento de esquejes de mezquite (Felker et al. 2005).

El empleo de hongos micorrízicos arbusculares es común en la reforestación con arbustos y árboles en zonas templadas aunque menos en zonas desérticas. A pesar de que se ha demostrado la existencia de hongos micorrízicos arbusculares en numerosas especies de árboles y cactus del desierto (Carrillo-García et al. 1999; Bashan et al. 2000; Bashan et al. 2007), la inoculación con estos microorganismos es todavía escasa. Es probable que los hongos micorrízicos arbusculares jueguen un papel similar en las plantas del desierto al que ejercen en cultivos agrícolas, porque las plantas dependen de estos hongos simbióticos para la adquisición de nutrientes, especialmente fósforo y en general, el transporte de minerales. Sin embargo, los datos científicos son aun escasos.

Combinaciones de hongos micorrízicos arbusculares nativos (*Glomus coronatum*) y no nativos (*G. intraradices*), *Rhizobium* y otras PGPB han sido utilizadas para aumentar el crecimiento de plantas en un desierto semiárido. La inoculación con *Rhizobium* dio como resultado un aumento en la biomasa de raíz y tallo y en la nodulación de las raíces, mientras que las PGPB aumentaron la germinación de las semillas. Los hongos micorrízicos arbusculares nativos fueron mas efectivos que los no nativos, sugiriendo que los aislados nativos pueden ser mas apropiados para las condiciones específicas de este ecosistema (Requena et al. 1997). De manera similar, bacterias genéticamente modificadas que colaboran con las micorrizas, fueron desplazadas por las cepas silvestres (Valdenegro et al. 2001). En un estudio de 5 años, se encontró que la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares y rhizobia mejoro el establecimiento de plantas clave del ecosistema y, adicionalmente, aumentó la fertilidad del suelo (Requena et al. 2001).

## Uso de PGPB en la restauración y reforestación de manglares

Los bosques de mangle son ecosistemas marinos tropicales

constantemente amenazados por el desarrollo costero y la proliferación de la acuicultura (Rönnbäck 1999). Estos ecosistemas proporcionan un servicio ambiental importante, al actuar como sitios de reproducción de incontables especies marinas y de aves acuáticas que son un requisito irremplazable para las pesquerías en los trópicos (Holguin et al. 2001). Además, los manglares constituyen una barrera natural que protege a las poblaciones costeras y los arrozales de las tormentas tropicales y tsunamis, principalmente en Asia. Aunque los manglares en los trópicos húmedos son más fáciles de reforestar (Primavera et al. 2004), los manglares en ambientes áridos y semiáridos son especialmente sensibles y tienen dificultades para regenerarse después de una perturbación (Toldeo et al. 2001; Vovides et al. 2011). Se ha predicho que sin la restitución de la red nutricional microbiana, la restauración de los manglares puede ser difícil, si no imposible (Holguin et al. 2001). En consecuencia, se han realizado estudios para caracterizar estos ecosistemas, sus comunidades y procesos microbianos, incluyendo estudios con bacterias fijadoras de nitrógeno y el proceso de fijación de nitrógeno (Holguin et al. 1992; Toledo et al. 1995a; Flores-Mireles et al. 2007; Vovides et al. 2011), la solubilización de fosfato (Vazquez et al. 2000; Rojas et al. 2001), metanogénesis (Strangmann et al. 2008) y las poblaciones de bacterias heterótrofas (Gonzalez-Acosta et al. 2006), con el fin de desarrollar estrategias exitosas de revegetación (Holguin et al. 2006).

Bashan y Holguin (2002) propusieron inicialmente el uso de PGPB para reforestar manglares deteriorados y realizaron un bosquejo de las posibles interacciones microbianas que están involucradas en este proceso. Ellos identificaron una colección de bacterias aisladas de este ecosistema que poseen mecanismos de promoción de crecimiento, tales como fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato y producción de fitohormonas. Trabajos iniciales inoculando mangle con la cianobacteria diazótropa *Microcoleus chthonoplastes*, aislada de los neumatóforos de mangles, dieron como resultado el aumento en la colonización radicular y la acumulación de nitrógeno *in planta* (Toledo et al. 1995b; Bashan et al. 1998). Esta cianobacteria y varias otras PGPB del manglar, han sido también benéficas para *Salicornia bigelovii*, una planta oleaginosa halófila anual que habita en marismas en asociación con bosques de mangle. La inoculación de estas plantas aumentó la biomasa vegetal en un 70% y mejoró la calidad de sus aceites esenciales (Bashan et al. 2000a).

Se han realizado también importantes trabajos inoculando *A. brasilense* en plántulas de mangle. Trabajos iniciales demostraron que dos especies, *A. brasilense* y *A. halopraeferens*, colonizaron la superficie de las raíces de plántulas de manglar negro (Puente et al. 1999). Estudios adicionales se han enfocado en el aislamiento y caracterización de grandes colecciones de potenciales PGPB de las plantas de mangle y de las condiciones que controlan su proliferación (Holguin, Bashan 1996; Rojas et al. 2001; Kathiresan, Selvam 2006; Flores-Mireles et al. 2007). Kathiresan y Selvam (2006) estudiaron una colección de 48 aislamientos y reportaron que dos de ellos demostraron el

potencial de aumentar el crecimiento de las plantas en más del 100%, haciéndolos excelentes candidatos para proyectos de reforestación.

## Uso de PGPB en la fitorremediación de suelos contaminados

La fitorremediación es una estrategia para solucionar la contaminación de suelos mediante el uso de plantas que actúan como mitigadoras del problema, sin necesidad de extraer el material contaminante y disponerlo en otro sitio. Las plantas son capaces de acumular, degradar o eliminar metales, pesticidas, solventes, petróleo y una gran variedad de contaminantes industriales. Se han documentado muchos ejemplos de fitorremediación exitosa (Suresh, Ravishankar 2004). La fitorremediación es generalmente considerada como una tecnología limpia, económica, ambientalmente amigable y no disruptiva, con la posibilidad adicional de recuperar y reusar los metales extraídos. La principal desventaja es que requiere un compromiso a largo plazo, ya que el proceso depende del crecimiento de la planta, su tolerancia a la toxicidad y su capacidad de bioacumulación. La fitorremediación comprende varias aproximaciones independientes en algunas de las cuales las PGPB podrían tener un efecto positivo:

### a. Fitodegradación

La población microbiana de la rizósfera de algunas plantas puede contar con especies capaces de degradar xenobióticos (Donnelly et al. 1994; Macková et al. 2007; Mendez, Maier 2008) y puede servir como promotora de crecimiento cuando las plantas crecen en estos suelos contaminados. En un suelo contaminado artificialmente con creosote, la inoculación con bacterias degradadoras de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y PGPB (*Pseudomonas putida*, *Azospirillum brasilense* y *Enterobacter cloacae*) aumentó la velocidad de eliminación de los HAP en presencia de las PGPB, debido posiblemente a que estas son capaces de mitigar el estrés en plantas por la actividad de la ACC-deaminasa, un mecanismo común en este tipo de bacterias (Huang et al. 2004). Adicionalmente, las PGPB *Pseudomonas* spp. mejoraron el crecimiento de canola en presencia de cobre o HAP (Reed, Glick 2005; Reed et al. 2005). Las PGPB también participaron en la degradación de ácido 2-clorobenzoico y petróleo en suelos donde crece *Vicia faba* (Radwan et al. 2005). Un plásmido fue transferido de *Burkholderia cepacia* a una cepa de PGPB endófito de esta planta para proteger el nuevo huésped contra la toxicidad de tolueno y reducir su evaporación (Barac et al. 2004; Glick 2004).

### b. Fitoextracción

En la fitoextracción (conocida también como fitoacumulación) las plantas eliminan los contaminantes del ambiente concentrándolos en su biomasa

vegetal. El proceso ha sido evaluado principalmente en la extracción de metales pesados. Dentro de la biomasa vegetal, los contaminantes están más concentrados que en el ambiente, un hecho que facilita su disposición final. La fitoextracción puede realizarse con plantas hiperacumuladoras, es decir, plantas que pueden tolerar y absorber mayor cantidad de metales tóxicos que las plantas regulares. Estas plantas también pueden producir quelantes que faciliten la movilización de los metales y permitan una más fácil absorción (Cunningham et al. 1995; Pilon-Smits 2005).

Dado que las plantas absorben contaminantes del suelo mediante el sistema radicular, los factores biológicos que modifican el metabolismo de las raíces tales como la inoculación con PGPB podrían mejorar este proceso. Las PGPB mejoran la fitoextracción de dos maneras: 1) aumentando el crecimiento general de la planta de manera que la mayor biomasa absorba una mayor cantidad del contaminante, y 2) mejorando la dilución y/o biodisponibilidad del contaminante, haciéndolo más fácil de absorber por las plantas (Lebeau et al. 2007). Una PGPB ideal podría tener los dos mecanismos (Sheng, Xia 2006; Saravanan et al. 2007; Rajkumar, Freitas, 2008a) pero usualmente se ha estudiado uno solo ellos. La biomasa seca de soya creciendo en suelos contaminados con arsénico aumentó como respuesta a la inoculación con *Bradyrhizobium japonicum* (Reichman 2007). La elongación de las raíces de helechos y la acumulación de arsénico aumentaron debido a la inoculación con bacterias rizosféricas (Jankong et al. 2007). *Variovorax paradoxus* tiene la capacidad de aumentar la elongación de la raíz de la mostaza india (*Brassica juncea*) en presencia de cadmio (Belimov et al. 2005). La inoculación con cepas bacterianas en diferentes plantas aumentó significativamente la acumulación de varios metales, pero sin aumento en la biomasa vegetal; sin embargo, la inoculación podría mejorar la nutrición vegetal como un todo (Hoflich, Metz, 1997; Whiting et al. 2001; Reed, Glick 2005; Rajkumar, Freitas 2008a). Varias cepas rizosféricas mejoraron la volatilización y la acumulación de Se y Hg en tejidos vegetales en un humedal construido artificialmente (de Souza et al. 1999a, b). El aumento en la solubilidad de metales y la subsiguiente absorción por parte de la planta de estos contaminantes puede ser el resultado de la producción de ácidos orgánicos por algunas PGPB (Saravanan et al. 2007), ya que se sabe que muchas PGPB solubilizadoras de fosfato producen ácidos orgánicos (Vazquez et al. 2000; Puente et al. 2004 a,b; Rodríguez et al. 2004, 2006; Lopez et al. 2011b).

### **c. Fitoestabilización de desechos mineros**

La gran cantidad de desechos mineros, producidos por el procesamiento de minerales en minas tanto abandonadas como productivas, es una amenaza de salud a largo plazo en las poblaciones urbanas circundantes, en forma de polvo tóxico y contaminación de las fuentes de agua. Esto sucede porque los desechos mineros, al carecer de una cobertura vegetal y estructura de suelo

como tal, son fácilmente degradados por acción del viento y la lluvia, convirtiéndose en una continua fuente de contaminación por metales (Pilon-Smits 2005). De esta manera, se ha propuesto la fitoestabilización usando plantas nativas como una estrategia económica para reducir estos riesgos (McCutcheon, Schnoor 2003). Esta aproximación involucra la creación de una cobertura vegetal sobre los desechos mineros que sea suficientemente densa para prevenir su erosión. Un importante desafío es que algunos de esos desechos mineros no sirven, en su estado natural, como sustrato para el crecimiento de la mayoría de las plantas, debido a su concentración de metales tóxicos, bajo pH, carencia de minerales esenciales, de arcillas y material orgánica que pueda retener agua, de cualquier estructura de suelo, de un banco de semillas de plantas nativas o la combinación de todos estos parámetros ambientales (Mendez, Maier 2008). De esta manera, los desechos mineros pueden permanecer desprovistos de plantas por décadas o en el mejor de los casos, solo contar con una ligera cobertura vegetal (Gonzalez-Chavez et al. 2008). Una solución parcial puede ser la adición de gran cantidad de compost, biosólidos y agua (Ye et al. 2001; Chiu et al. 2006) de manera que se restituyan las condiciones del suelo. Aunque posible, tales enmiendas son costosas debido al gran volumen de estos desechos mineros y en algunos casos a su remota localización. Más aun, en zonas desérticas no existe un suministro de agua constante y suficiente.

Se ha propuesto la inoculación con PGPB y con hongos micorrízicos arbusculares como una forma de ayudar a las plantas a establecerse en los desechos mineros, y reducir la cantidad de compost necesaria para su mejoramiento (Petrisor et al. 2004; Zhuang et al. 2007; Mendez, Maier 2008; Solís-Domínguez et al. 2011). Existen dos aproximaciones en la búsqueda de PGPB compatibles con los desechos mineros. Una es aislar bacterias nativas, con capacidad de promover el crecimiento, directamente de los desechos mineros o de las plantas que crezcan sobre estos, propagarlas y usarlas como inoculantes. Este procedimiento aunque laborioso, ha sido probado de manera exitosa (Grandlic et al. 2008, 2009). La premisa en esta aproximación es que las PGPB aisladas de los desechos mineros pueden ayudar a la planta a sobrevivir y crecer a través de varios mecanismos incluyendo el aumento en disponibilidad de nutrientes, aumento en la resistencia a la toxicidad por metales o la disminución de la biodisponibilidad de metales tóxicos en la rizósfera (Burd et al. 1998, 2000; Pishchik et al. 2002; Glick 2003; Belimov et al. 2004; Reed, Glick, 2005; Reed et al. 2005; Vivas et al. 2006; Wu et al. 2006a; Li et al. 2007; Rajkumar, Freitas 2008a, b). La aproximación alternativa es examinar muchas PGPB utilizadas en agricultura (Bashan, de-Bashan 2005) que pudieran ayudar a las plantas a establecerse sobre estos desechos. Por ejemplo, el género *Bacillus*, que se encuentra comúnmente en varios tipos de desechos mineros (Natarajan 1998; Vijayalakshmi, Raichur 2003; Wu et al. 2006b; Tsuruta 2007; Zhang et al. 2007), ejerce un efecto positivo en el crecimiento de cultivos agrícolas, plantas silvestres, árboles y microalgas, a través de de diferentes mecanismos de promoción de crecimiento vegetal

(Enebak et al. 1998; Vessey 2003; Kloepper et al. 2004 a,b; Ryu et al. 2005; Hernandez et al. 2009). Otro género potencial es *Azospirillum*. La estimulación del crecimiento de raíces adventicias por *A. brasilense* no solo mejora la toma de nutrientes, sino que también, como se expuso anteriormente, alivia el estrés salino en diferentes plantas agrícolas (Creus et al. 1997; Bacilio et al. 2004; Dimkpa et al. 2009). Este modo de acción fitoestimulador proporciona una mayor área superficial para la absorción de nutrientes, una cualidad vital para la sobrevivencia de las plantas en ambientes mineros altamente impactados y con pocos nutrientes. De manera adicional, el aumento en la masa radicular es deseable para la estabilización física de los desechos mineros contra la erosión por viento y agua. Además de la promoción de crecimiento y el mejoramiento de la resistencia a estrés abiótico, propiedades de que son relevantes en su uso en desechos mineros, *Azospirillum* también ayuda a las plantas a crecer en condiciones de bajo pH (Bashan 1999, de-Bashan et al. 2005) y metales pesados (Belimov, Dietz 2000).

Varios estudios han demostrado la factibilidad de utilizar PGPB de diferentes fuentes en combinación con compost. Algunos trabajos han mostrado que los niveles óptimos de compost requeridos para el establecimiento de varias especies de pastos y plantas en residuos mineros puede ser reducido por la adición de PGPB aisladas de residuos mineros adyacentes (Petrisor et al. 2004; Zhuang et al. 2007; Gradlic et al. 2008). El reemplazar fertilizantes químicos por repetidas inoculaciones con *Azotobacter chroococcum* y *Bacillus megaterium* mejoró significativamente el crecimiento de plantas nativas y la actividad microbiana en dos residuos mineros ácidos (Petrisor et al. 2004). Una serie de experimentos utilizando varios arbustos del desierto y árboles demostró la capacidad de PGPB nativas y de origen agrícola para mejorar su crecimiento en varios tipos de desechos mineros. Las PGPB aisladas de estos desechos mineros, con capacidad de sobrevivir a pH ácido y en concentraciones altas de metales pesados (Mendez et al. 2008), junto con una moderada cantidad de compost (Iverson, Maier 2009) aumentó significativamente la biomasa del arbusto *Atriplex lentiformis* y del pasto *Buchloe dactyloides*. De manera similar, como resultado de la inoculación con la PGPB *Bacillus pumilus* -aislada de raíces de cactus que crecen en rocas en ausencia de suelo (un ambiente extremo para las plantas)- el crecimiento del arbusto *Atriplex lentiformis* aumento significativamente, con un nivel de compost sub-óptimo (10% peso/peso comparado con el 15% normalmente requerido en estos residuos mineros); adicionalmente, se vio un marcado efecto en la comunidad bacteriana de desechos mineros tanto de tipo ácido con alto contenido de metales, como en residuos neutros con bajo contenido de metales (de-Bashan et al. 2010a). La inoculación con varias cepas de *Azospirillum brasilense* produjo un efecto similar en el crecimiento de las plantas y en la comunidad bacteriana en residuos ácidos metalíferos (de-Bashan et al. 2010 a,b). De manera similar, la inoculación de pasto búfalo con una mezcla de dos *Arthrobacter* spp. afectó a la comunidad bacteriana de la rizósfera después de 75 días de crecimiento (Grandlic et al. 2009). El efecto de la inoculación sobre la comunidad bacteriana

en estos desechos, que no es aparente cuando la inoculación se realiza con estas bacterias en suelos agrícolas, puede estar relacionado con el extremadamente bajo nivel de bacterias heterotróficas presentes ( $<10^3$  UFC  $g^{-1}$ ) (Mendez et al. 2007). En el trasfondo de una comunidad bacteriana baja, como la que existe en los residuos mineros, la inoculación con *B. pumilus* o *A. brasilense* (a un nivel de  $10^6$  UFC  $g^{-1}$ ) crea un cambio drástico y evidente en la población bacteriana nativa. Otra explicación puede ser el que las PGPB tienen una respuesta indirecta a más largo plazo debido a la influencia del inoculo en el crecimiento de la raíz y/o en los exudados de las plantas después de que su población inicial ha disminuido (de-Bashan et al. 2010 a,b).

Debido a que el mezquite tiene una alta tolerancia a la contaminación con metales (Senthilkumar et al. 2005), es un candidato potencial para la revegetación de desechos mineros. La inoculación con una combinación de PGPB y *A. brasilense* aumentó significativamente el crecimiento de plántulas de mezquite en desechos mineros de roca fosfórica (Moreno et al. *sin publicar*), de manera similar al efecto de los hongos micorrízicos arbusculares en este árbol. Aunque la inoculación algunas veces aumenta la absorción de metales en mezquite, esto no sucedió cuando se inocularon varios tipos de hongos micorrízicos arbusculares en mezquite creciendo en desechos ácidos con altas concentraciones de metales pesados (Solís-Domínguez et al. 2011). La nodulación y el crecimiento de árboles de *Albizia lebbek* creciendo en residuos de minas de yeso y piedra caliza aumentaron como resultado de su inoculación con *Bradyrhizobium* sp. (Rao, Tak 2001).

Podría haber sin embargo un lado negativo en el uso de PGPB para la fitoestabilización de desechos mineros; el aumento en la extracción de metales del suelo hacia la biomasa vegetal podría dar como resultado plantas tóxicas para los animales, tanto silvestres como ganaderos, que se alimentan de ellas. En plantas de *Brassica juncea*, la inoculación con PGPB tuvo un efecto menor en la absorción de Cu, Pb y Zn, pero un aumento significativo en la absorción de Cd en el tejido del vástago (Wu et al. 2006 a,b), y un aumento en las concentraciones de Cu, Cd, Mn y Zn en tejidos del vástago en plantas nativas (Petrisor et al. 2004). El aumento en la concentración de metales en el vástago de canola después de la inoculación puede suceder principalmente en bajas concentraciones de metales permitiendo el crecimiento de la planta (Reed, Glick 2005).

Se puede concluir que en un ambiente extremadamente estresante como el de los desechos mineros tóxicos, una PGPB inoculada, no solo puede persistir y estimular el crecimiento vegetal, sino que también puede directa o indirectamente influir en el desarrollo de la comunidad rizobacteriana. Estas PGPB pueden ser tanto nativas de los residuos mineros como inoculantes agrícolas comunes. Las PGPB como un componente en programas de fitoestabilización, junto con compost y plantas que no acumulen metales, para evitar afectar a los animales que las pastorean, son la opción más viable para



lograr la cobertura vegetal de estos desechos tóxicos. Sin embargo, es necesario encontrar la combinación óptima entre PGPB y compost o encontrar una combinación planta-PGPB que no requiera la aplicación de esta.

## Uso de PGPB como ayuda en el tratamiento terciario de agua residual

En el tratamiento terciario de aguas residuales se busca eliminar principalmente el exceso de nutrientes (compuestos de nitrógeno y fósforo) resultado del tratamiento secundario -digestión de la material orgánica- antes de su descarga a cuerpos de agua naturales o de su venta para irrigación (de-Bashan, Bashan 2004, 2010). El desarrollo de tratamientos que eliminen de manera eficiente y económica estos nutrientes es de mayor importancia ya que su producción aumenta día con día. Numerosas especies de microalgas son usadas comúnmente para remover nitrógeno y fósforo de aguas residuales tanto domésticas como municipales (Tam, Wong 2000; Valderrama et al. 2002; de-Bashan, Bashan, 2004). Tradicionalmente, las PGPB no se emplean en estas tecnologías. Sin embargo, la idea de usar PGPB para el tratamiento de aguas residuales se originó de la presunción que las microalgas usadas para tales tratamientos son básicamente plantas unicelulares. Como plantas, ellas deben responder a inoculación con PGPB. El modelo básico de la asociación entre la microalga *Chlorella vulgaris* y la PGPB *Azospirillum brasilense* inmovilizadas de manera conjunta en esferas de alginato ha sido desarrollado en la última década (Gonzalez, Bashan 2000; de-Bashan, Bashan 2008). Esta combinación de los dos microorganismos es altamente eficiente en la eliminación de nutrientes de varios tipos de agua residual, dejando el agua más limpia y produciendo una biomasa utilizable (de-Bashan et al. 2002a, 2004). En esta asociación, la microalga utiliza los nutrientes asistida por la PGPB, que mejora su capacidad de absorción al afectar su metabolismo y proliferación.

A pesar de ser relativamente nueva, esta idea ha sido estudiada en años recientes de manera intensiva, investigando la efectividad del uso de las microalgas *Chlorella vulgaris* y *C. sorokiniana* inmovilizadas de manera conjunta con *A. brasilense* bajo diversas condiciones ambientales variando desde moderadas hasta extremas (Gonzalez, Bashan 2000; de-Bashan et al. 2002 a,b; 2004; 2005, 2008c; Lebsky et al. 2001). Otros estudios han demostrado que otros géneros bacterianos incluyendo *Rhodanobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus* y *Paenibacillus* sp. tienen el potencial de mejorar el tratamiento de aguas residuales (Mouget et al. 1995; Ogbonna et al. 2000; Hernandez et al. 2009).

Estudios iniciales han mostrado que *A. brasilense* aumenta la tasa de crecimiento y extiende la vida promedio de *C. vulgaris* (Gonzalez, Bashan 2000; Lebsky et al. 2001). La inmovilización conjunta de estas microalgas con *A. brasilense* dio como resultado la eliminación casi absoluta de amonio y cerca de un tercio del fósforo después de dos días de incubación en cultivos

en lotes, comparado con las células de *C. vulgaris* sola (de-Bashan et al. 2002a). *A. brasilense* ha mostrado efectos benéficos en parámetros de crecimiento de la microalga tales como la producción de pigmentos, contenido total de lípidos, cambio en el patrón de ácidos grasos, aumento en el número de células en la población y aumento en el tamaño celular (de-Bashan et al. 2002b).

Para mejorar el efecto sinérgico entre estos dos componentes biológicos, se han estudiado los factores ambientales que afectan el crecimiento de la microalga y los mecanismos celulares que controlan este sistema. Estos incluyen pH, concentraciones de carbono y nitrógeno, intensidad luminosa combinada con alta temperatura, toxicidad del triptofano y efectos hormonales (de-Bashan et al. 2005, 2008a, b, c, de-Bashan, Bashan 2008). Los estudios fisiológicos indicaron que los posibles mecanismos que controlan el crecimiento son la producción la fitohormona AIA y el efecto en dos enzimas clave (glutamato deshidrogenasa y glutamino sintetasa) en el metabolismo del nitrógeno, responsables por la absorción de amonio. El someter a los microorganismos a periodos de ayuno antes del tratamiento de aguas tiene un efecto positivo en la asimilación de fósforo por parte de *C. vulgaris* y *C. sorokiniana* (Hernandez et al. 2006). La inmovilización conjunta mejora la absorción de fósforo en las dos especies en agua residual sintética, y en *C. sorokiniana* en agua residual domestica, después de un periodo de tres días de ayuno en solución salina. La eliminación de fósforo más efectiva, 72%, cerca del doble de la eliminación de fósforo por métodos biológicos, se alcanzó cuando un cultivo coinmovilizado de células previamente sometido a ayuno fue usado para el tratamiento por un ciclo y reemplazado con un cultivo fresco también en ayuno. Cuando se cambiaron las condiciones de cultivo de autotrófico a heterotrófico (sin luz y con una fuente adicional de carbono) el sistema coinmovilizado funcionó de mejor manera (Perez-García et al. 2010).

La principal característica de esta tecnología es que la microalga inmovilizada junto a *Azospirillum* siempre elimina más fósforo que la microalga sola. Como los dos microorganismos están inmovilizados en esferas de alginato que pueden ser fácilmente removidos del agua residual por sedimentación. Esta tecnología podría potencialmente ser una alternativa económica a la precipitación química comúnmente usada para tratar el agua residual.

## Conclusiones

Las bacterias promotoras de crecimiento vegetal pueden servir como valiosos componentes en proyectos de biorremediación de suelos, de agua, de revegetación y reforestación de suelos degradados. Por si mismas, pocas cepas pueden servir como biorremediadores directos al ser propagados en grandes poblaciones. Sin embargo, su potencial aumenta al asociarse con las plantas que son el principal componente en los procesos de remediación.

## Bibliografía

- Bacilio M., Hernandez J.P., Bashan Y. 2006. Restoration of giant cardon cacti in barren desert soil amended with common compost and inoculated with *Azospirillum brasilense*. *Biol Fert Soils*. 43: 112-119.
- Bacilio M., Rodriguez H., Moreno M., Hernandez J.P., Bashan Y. 2004. Mitigation of salt stress in wheat seedlings by a *gfp*-tagged *Azospirillum lipoferum*. *Biol Fert Soils*. 40: 188-193.
- Bacilio M., Vazquez P., Bashan Y. 2003. Alleviation of noxious effects of cattle ranch composts on wheat seed germination by inoculation with *Azospirillum* spp. *Biol Fert Soils*. 38: 261-266.
- Banerjee M.J., Gerhart V.J., Glenn E.P. 2006. Native plant regeneration on abandoned desert farmland: effects of irrigation, soil preparation and amendments on seedling establishment. *Restor Ecol*. 14: 339-348.
- Barac T., Taghavi S., Borremans B., Provoost A., Oeyen L., Colpaert J.V., Vangronsveld J., van der Lelie D. 2004. Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water-soluble, volatile, organic pollutants. *Nat Biotechnol*. 22: 583-588.
- Bashan Y. 1998. Inoculants of plant growth-promoting bacteria for use in agriculture. *Biotechnol Adv*. 16: 729-770.
- Bashan Y., Holguin G. 1998. Proposal for the division of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria into two classifications: biocontrol-PGPB (Plant Growth-Promoting Bacteria) and PGPB. *Soil Biol Biochem*. 30: 1225-1228.
- Bashan Y., Puente M.E., Myrold D.D., Toledo G. 1998. In vitro transfer of fixed nitrogen from diazotrophic filamentous cyanobacteria to black mangrove seedlings. *FEMS Microbiol Ecol*. 26: 165-170.
- Bashan Y. 1999. Interactions of *Azospirillum* spp. in soils: a review. *Biol Fert Soils*. 29: 246-256.
- Bashan Y., Rojas A., Puente M.E. 1999. Improved establishment and development of three cactus species inoculated with *Azospirillum brasilense* transplanted into disturbed urban soil. *Can J Microbiol*. 45: 441-451.
- Bashan Y., Moreno M., Troyo E. 2000a. Growth promotion of the oilseed halophyte *Salicornia bigelovii* in seawater inoculated with mangrove rhizosphere bacteria and *Azospirillum*. *Biol Fert Soils*. 32: 265-272.
- Bashan Y., Davis E.A., Carrillo A., Linderman R.G. 2000b. Assessment of VA mycorrhizal nodule potential in relation to the establishment of cactus seedlings under mesquite nurse-trees in the Sonoran desert. *Appl Soil Ecol*. 14: 165-176.

- Bashan Y., Holguin G. 2002. Plant growth-promoting bacteria: a potential tool for arid mangrove reforestation. *Trees-Struct Funct.* 16: 159-166.
- Bashan Y., Holguin G., de-Bashan L.E. 2004. *Azospirillum*-plant relationships: physiological, molecular, agricultural, and environmental advances (1997-2003). *Can J Microbiol.* 50: 521-577.
- Bashan Y., de-Bashan L.E. 2005. Bacteria / Plant growth-promotion. En: Hillel, D. (Ed.). *Encyclopedia of soils in the environment*. Elsevier, Oxford, U.K. Vol. 1. pp. 103-115.
- Bashan Y., Khaosaad T., Salazar B.G., Ocampo J.A., Wiemken A., Oehl F., Vierheilig H. 2007. Mycorrhizal characterization of the boojum tree, *Fouquieria columnaris*, an endemic ancient tree from the Baja California Peninsula, Mexico. *Trees-Struct Funct.* 21: 329-335.
- Bashan Y., Salazar B., Puente M.E. 2009. Responses of native legume desert trees used for reforestation in the Sonoran Desert to plant growth-promoting microorganisms in screen house. *Biol Fert Soils.* 45: 655-662.
- Bashan Y., de-Bashan L.E. 2010. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth - a critical assessment. *Adv Agr.* 108: 77-136.
- Bashan Y., Salazar B., Moreno M., Linderman R.G. 2011. Restoration of eroded desert soil with native trees: effects of inoculation with plant growth-promoting microorganisms, limited amounts of compost and water and plant density. *Forest Sci* (Accepted).
- Bean T.M., Smith S.E., Karpiscak M.M. 2004. Intensive revegetation in Arizona's hot desert. The advantages of container stock. *Native Plants J.* 5: 173-180.
- Belimov A., Dietz K.J. 2000. Effect of associative bacteria on element composition of barley seedlings grown in solution culture at toxic cadmium concentrations. *Microbiol Res.* 155: 113-121.
- Belimov A.A., Kunakova A.M., Safronova V.I., Stepanok V.V., Yudkin L.V., Alekseev Y.V., Kozhemyakov A.P. 2004. Employment of rhizobacteria for the inoculation of barley plants cultivated in soil contaminated with lead and cadmium. *Microbiology.* 73: 99-106.
- Belimov A., Hontzeas N., Safronova V.I., Demchinskaya S.V., Piluzza G., Bullitta S., Glick B.R. 2005. Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) *Soil Biol Biochem.* 37: 241-250.
- Bethlenfalvai G.J., Schüepp H. 1994. Arbuscular mycorrhizas and agrosystem stability. En Gianinazzi S., Schüepp H. (Eds). *Impact of arbuscular mycorrhizas on sustainable agriculture and natural ecosystems*. Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland. pp. 117-131.

- Bethlenfalvai G.J., Bashan Y., Carrillo-García A., Stutz J.C. 2007. Mycorrhizae as biological components of resource islands in the Sonoran desert. En: Montaña N.M., Camargo-Ricalde S.L., García-Sánchez R., Monroy-Ata A. (Eds.). *Micorrizas arbusculares en ecosistemas áridos y semiáridos*. Mundi Prensa, Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, UAM-Iztapalapa, FES-Zaragoza-UNAM, Ciudad de México, México. pp. 98-108.
- Burd G.I., Dixon D.G., Glick B.R. 1998. A plant growth-promoting bacterium that decreases nickel toxicity in seedlings. *Appl Environ Microbiol.* 64: 3663-3668.
- Burd G.I., Dixon D.G., Glick B.R. 2000. Plant growth-promoting bacteria that decrease heavy metal toxicity in plants. *Can J Microbiol.* 46: 237-245.
- Camel S.B., Reyes-Solis M.G., Ferrera-Cerrato R., Franson R.L., Brown M.S., Bethlenfalvai G.J. 1991. Growth of vesicular-arbuscular mycorrhizal mycelium through bulk soil. *Soil Sci Soc Am J.* 55: 389-393.
- Carrillo-García A., León de la Luz J.L., Bashan Y., Bethlenfalvai G.J. 1999. Nurse plants, mycorrhizae, and plant establishment in a disturbed area of the Sonoran Desert. *Rest Ecol.* 7: 321-335.
- Carrillo-García A., Bashan Y., Díaz Rivera E., Bethlenfalvai G.J. 2000. Effects of resource island soils, competition, and inoculation with *Azospirillum* on survival and growth of *Pachycereus pringlei*, the giant cactus of the Sonoran Desert. *Res Ecol.* 8: 65-73.
- Carrillo A.E., Li C.Y., Bashan Y. 2002. Increased acidification in the rhizosphere of cactus seedlings induced by *Azospirillum brasilense*. *Naturwissenschaften.* 89: 428-432.
- Chiu K.K., Ye Z.H., Wong M.H. 2006. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study. *Bioresource Technol.* 97: 158-170.
- Creus C.M., Sueldo R.J., Barassi C.A. 1997. Shoot growth and water status in *Azospirillum*-inoculated wheat seedlings grown under osmotic and salt stresses. *Plant Physiol Biochem.* 35: 939-944.
- Creus C.M., Sueldo R.J., Barassi C.A. 1998. Water relations in *Azospirillum*-inoculated wheat seedlings under osmotic stress. *Can J Bot.* 76: 238-244.
- Cunningham S.D., Betri W.R., Huang J.W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnol.* 13: 393-397.
- de-Bashan L.E., Moreno M., Hernández J.P., Bashan Y. 2002a. Removal of ammonium and phosphorous ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Water Res* 36: 2941-2948.

- de-Bashan L.E., Bashan Y., Moreno M., Lebsky V.K., Bustillos J.J. 2002b. Increased pigment and lipid content, lipid variety, and cell and population size of the microalgae *Chlorella* spp. when co-immobilized in alginate beads with the microalgae-growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Can J Microbiol.* 48: 514-521.
- de-Bashan L.E., Bashan Y. 2004. Recent advances in removing phosphorous from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003). *Water Res.* 38: 4222-4246.
- de-Bashan L.E., Hernandez J.P., Morey T., Bashan Y. 2004. Microalgae growth-promoting bacteria as «helpers» for microalgae: a novel approach for removing ammonium and phosphorus from municipal wastewater. *Water Research.* 38: 466-474.
- de-Bashan L.E., Antoun H., Bashan Y. 2005. Cultivation factors and population size control uptake of nitrogen by the microalgae *Chlorella vulgaris* when interacting with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *FEMS Microbiol Ecol.* 54: 197-203.
- de-Bashan L.E., Bashan Y. 2008. Joint immobilization of plant growth-promoting bacteria and green microalgae in alginate beads as an experimental model for studying plant-bacterium interactions. *Appl Environ Microbiol.* 74: 6797-6802.
- de-Bashan L.E., Antoun H., Bashan Y. 2008a. Involvement of indole-3-acetic acid produced by the growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. in promoting growth of *Chlorella vulgaris*. *J Phycol.* 44: 938-947.
- de-Bashan L.E., Magallon P., Antoun H., Bashan Y. 2008b. Role of glutamate dehydrogenase and glutamine synthetase in *Chlorella vulgaris* during assimilation of ammonium when jointly immobilized with the microalgae-growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *J Phycol.* 44: 1188-1196.
- de-Bashan L.E., Trejo A., Huss V.A.R., Hernandez J.P., Bashan Y. 2008c. *Chlorella sorokiniana* UTEX 2805, a heat and intense, sunlight-tolerant microalga with potential for removing ammonium from wastewater. *Biores Technol.* 99: 4980-4989.
- de-Bashan L.E., Bashan Y. 2010. Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects. *Biores Technol.* 101: 1611-1627.
- de-Bashan L.E., Hernandez J.P., Bashan Y., Maier R.M. 2010a. *Bacillus pumilus* ES4: Candidate plant growth-promoting bacterium to enhance establishment of plants in mine tailings. *Environ and Exp Bot.* 69: 343-352.
- de-Bashan L.E., Hernandez J.P., Nelson K.N., Bashan Y., Maier R.M. 2010b. Growth of quailbush in acidic, metalliferous desert mine tailings: effect of *Azospirillum brasilense* Sp6 on biomass production and rhizosphere community structure. *Microb Ecol.* 60: 915-927.

- de Souza M.P., Chu D., Zhao M., Zayed A.M., Ruzin S.E., Schichnes D., Terry N. 1999a. Rhizosphere bacteria enhance selenium accumulation and volatilization by Indian mustard. *Plant Physiol.* 119: 565-573.
- de Souza M.D., Huang C.P., Chee N., Terry N. 1999b. Rhizosphere bacteria enhance the accumulation of selenium and mercury in wetland plants. *Planta.* 209: 259-263.
- Díaz-Zorita M., Fernández-Canigia M.V. 2009. Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. *Eur J Soil Biol.* 45: 3-11.
- Dimkpa C., Weinand T., Asch F. 2009. Plant-rhizobacteria interactions alleviate abiotic stress conditions. *Plant Cell Environ.* 32: 1682-1694.
- Donnelly P.K., Hedge R.S., Fletcher J.S. 1994. Growth of PCB-degrading bacteria on compounds from photosynthetic plants. *Chemosphere.* 28: 981-988.
- Enebak S.A., Wei G., Klopper J.W. 1998. Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on loblolly and slash pine seedlings. *Forest Sci.* 44: 139-144.
- Felker P., Medina D., Soulier C., Velicce G., Velarde M., Gonzalez C. 2005. A survey of environmental and biological factors (*Azospirillum* spp, *Agrobacterium rhizogenes*, *Pseudomonas aurantiaca*) for their influence in rooting cuttings of *Prosopis alba* clones. *J Arid Environ.* 61: 227-247.
- Flores-Mireles A.L., Winans S.C., Holguin G. 2007. Molecular characterization of diazotrophic and denitrifying bacteria associated with mangrove roots. *Appl Environ Microbiol.* 73: 7308-7321.
- Grandlic C.J., Mendez M.O., Chorover J., Machado B., Maier R.M. 2008. Plant growth-promoting bacteria for phytostabilization of mine tailings. *Environ Sci Technol.* 42: 2079-2084.
- Grandlic C.J., Palmer M.W., Maier R.M. 2009. Optimization of plant growth-promoting bacteria-assisted phytostabilization of mine tailings. *Soil Biol Biochem.* 41: 1734-1740.
- Glenn E.P., Waugh W.J., Moore D., McKeon C., Nelson S.G. 2001. Revegetation of an abandoned uranium millsite on the Colorado plateau, Arizona. *J Environ Qual.* 30: 1154-1162.
- Glick B.R. 2003. Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol Adv.* 21: 383-393.
- Glick B.R. 2004. Teamwork in phytoremediation. *Nat Biotechnol.* 22: 526-527.
- Gonzalez L.E., Bashan Y. 2000. Increased growth of the microalgae *Chlorella vulgaris* when coimmobilized and cocultured in alginate beads with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Appl Environ Microbiol.* 66: 1527-1531.

- Gonzalez-Acosta B., Bashan Y., Hernandez-Saavedra N.Y., Ascencio F., De la Cruz-Agüero G. 2006. Seasonal seawater temperature as the major determinant for populations of culturable bacteria in the sediments of an intact mangrove in an arid region. *FEMS Microbiol Ecol.* 55: 311-321.
- Gonzalez-Chavez M.C., Carrillo-Gonzalez R., Gutierrez-Castorena M.C. 2009. Natural attenuation in a slag heap contaminated with cadmium: The role of plants and arbuscular mycorrhizal fungi. *J Hazard Mater.* 161: 1288-1298.
- Grover H.D., Musick H.B. 1990. Mexico, U.S.A.: an analysis of desertification processes in the American southwest. *Climate Change.* 17: 305–330.
- Hernandez J.P., de-Bashan L.E., Bashan Y. 2006. Starvation enhances phosphorous removal from wastewater by the microalga *Chlorella* spp. co-immobilized with *A. brasilense*. *Enzyme Microb Technol.* 38: 190-198.
- Hernandez J.P., de-Bashan L.E., Rodriguez D.J., Rodriguez Y., Bashan Y. 2009. Growth promotion of the freshwater microalga *Chlorella vulgaris* by the nitrogen-fixing, plant growth-promoting bacterium *Bacillus pumilus* from arid zone soils. *Eur J Soil Biol.* 45: 88-93.
- Hoflich G., Metz R. 1997. Interactions of plant-microorganism associations in heavy metal containing soils from sewage farms. *Bodenkultur.* 48: 239–247.
- Holguin G., Guzman M.A., Bashan Y. 1992. Two new nitrogen-fixing bacteria from the rhizosphere of mangrove trees, isolation, identification and in vitro interaction with rhizosphere *Staphylococcus* sp. *FEMS Microbiol Ecol.* 101: 207-216.
- Holguin G., Bashan Y. 1996. Nitrogen-fixation by *Azospirillum brasilense* Cd is promoted when co-cultured with a mangrove rhizosphere bacterium (*Staphylococcus* sp.) *Soil Biol Biochem.* 28: 1651-1660.
- Holguin G., Vazquez P., Bashan Y. 2001. The role of sediment microorganisms in the productivity, conservation, and rehabilitation of mangrove ecosystems: an overview. *Biol Fert Soils.* 33: 265-278.
- Holguin G., Gonzalez-Zamorano P., de-Bashan L.E., Mendoza R., Amador E., Bashan Y. 2006. Mangrove health in an arid environment encroached by urban development-a case study. *Sci Total Environ.* 363: 260-274.
- Huang X.D., El-Alawi Y., Penrose D.M., Glick B.R., Greenberg B.M. 2004. A multi-process system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils. *Environ Pollut.* 130: 465-476.
- Iverson S.L., Maier R.M. 2009. Effects of compost on colonization of roots of plants grown in metalliferous mine tailings, as examined by fluorescence in situ hybridization. *Appl Environ Microbiol.* 75: 842-847.
- Jankong P., Visoottiviset P., Khokiattiwong S. 2007. Enhanced phytoremediation of arsenic contaminated land. *Chemosphere.* 68: 1906-1912.



- Kathiresan K., Masilamani Selvam M. 2006. Evaluation of beneficial bacteria from mangrove soil. *Bot Mar.* 49: 86-88.
- Kloepper J.W., Leong J., Teintze M., Schroth M.N. 1980. Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria. *Nature.* 286: 885-886.
- Kloepper J.W., Reddy M.S., Rodríguez-Kabana R., Kenney D.S., Kokalis-Burelle N., Martínez-Ochoa N., Vavrina C.S. 2004a. Application for rhizobacteria in transplant production and yield enhancement. *Acta Horticulturae.* 631: 217-229.
- Kloepper J.W., Ryu C.M., Zhang S. 2004b. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology.* 94: 1259-1266.
- Lebeau T., Braud A., Jezequel K. 2008. Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: a review. *Environ Pollut.* 153: 497-522.
- Lebsky V.K., Gonzalez-Bashan L.E., Bashan Y. 2001. Ultrastructure of interaction in alginate beads between the microalga *Chlorella vulgaris* with its natural associative bacterium *Phyllobacterium myrsinacearum* and with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. *Can J Microbiol.* 47: 1-8.
- Leyva L.A., Bashan, Y. 2008. Activity of two catabolic enzymes of the phosphogluconate pathway in mesquite roots inoculated with *Azospirillum brasilense* Cd. *Plant Physiol Biochem* 46: 898-904.
- Li W.C., Ye Z.H., Wong M.H. 2007. Effects of bacteria on enhanced metal uptake of the Cd/Zn-hyperaccumulating plant, *Sedum alfredii*. *J Exp Bot.* 58: 4173-4182.
- Lopez B.R., Bashan Y., Bacilio M., De la Cruz-Agüero G. 2009. Rock-colonizing plants: abundance of the endemic cactus *Mammillaria fraileana* related to rock type in the southern Sonoran Desert. *Plant Ecol.* 201: 571-588.
- Lopez B.R., Bashan Y., Bacilio M. 2011a. Endophytic bacteria of *Mammillaria fraileana*, an endemic rock colonizing cactus of the Southern Sonoran Desert. *Arch Microbiol* (Accepted).
- Lopez B.R., Tinoco C., Bacilio M., Bashan Y. 2011b. Endophytic bacteria of the rock-dwelling cactus *Mammillaria fraileana* affect plant growth and mobilization of elements from rocks. *J Ecol* (Submitted).
- Lucy M., Reed E., Glick B.R. 2004. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek J.G.* 86: 1-25.
- Lugtenberg B., Kamilova F. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Ann Rev Microbiol.* 63: 541-556.

- Macková M., Vrchotová B., Francová K., Sylvestre M., Tomaniová M., Lovecká P., Demnerová K., Macek T. 2007. Biotransformation of PCBs by plants and bacteria – consequences of plant-microbe interactions. *Eur J Soil Biol.* 43: 233-341.
- McCutcheon S.C., Schnoor J.L. 2003. *Phytoremediation: Transformation and control of contaminants.* Wiley-Interscience, 1024 p.
- Mctainsh G.H. 1986. A dust monitoring programme for desertification control in West Africa. *Environ Conserv.* 13: 17–25.
- Mendez M.O., Glenn E.P., Maier R.M. 2007. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: Growth, metal accumulation, and microbial community changes. *J Environ Qual.* 36: 245-253.
- Mendez M.O., Maier R.M. 2008. Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 7: 47-59.
- Mendez M.O., Neilson J.W., Maier R.M. 2008. Characterization of a bacterial community in an abandoned semiarid lead-zinc mine tailing site. *Appl Environ Microbiol.* 74: 3899-3907.
- Miyakawa, A. 1999. Creative ecology: restoration of native forests by native trees. *Plant Biotechnol* 16: 15–25.
- Moore R., Russell R. 1990. The ‘Three Norths’ forest protection system–China. *Agroforestry Systems.* 10: 71–88.
- Mouget J.L., Dakhama A., Lavoie M.C., De la Noüe J. 1995. Algal growth enhancement by bacteria: is consumption of photosynthetic oxygen involved? *FEMS Microbiol Ecol.* 18: 35-44.
- Natarajan K.A. 1998. An integrated biotechnological approach to gold processing - An Indian experience. *Miner Process Extr M Rev.* 19: 235-251.
- Ogbonna J.C., Yoshizawa H., Tanaka H. 2000. Treatment of high strength organic wastewater by a mixed culture of photosynthetic microorganisms, *J Appl Phycol.* 12: 277-284.
- Ortega-Rubio A., Naranjo A., Nieto A., Argüelles C., Salinas F., Aguilar R., Romero H. 1998. Suspended particles in atmosphere and respiratory health problems at La Paz city, Baja California Sur, Mexico. *J Environ Biol.* 19: 381-387.
- Perez-Garcia O., de-Bashan L.E., Hernandez J.P., Bashan Y. 2010. Efficiency of growth and nutrient uptake from wastewater by heterotrophic, autotrophic, and mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* immobilized with *Azospirillum brasilense*. *J Phycol.* 46: 800-812.
- Petrisor I., Dobrota S., Komnitsas K., Lazar I., Kuperberg J.M., Serban M. 2004. Artificial inoculation – perspectives in tailings phytostabilization. *Int J Phytorem.* 6: 1-15.

- Pilon-Smits E. 2005. Phytoremediation. *Ann Rev Plant Biol.* 56: 15-39.
- Pishchik V.N., Vorobeyv N.I., Chernyaeva I.I., Timofeeva S.V., Kozhemyakov A.P., Alexeev Y.V., Lukin S.M. 2002. Experimental and mathematical simulation of plant growth promoting rhizobacteria and plant interactions under cadmium stress. *Plant and Soil.* 243: 173-186.
- Portnov B.A., Safriel U.N. 2004. Combating desertification in the Negev: dryland agriculture vs. dryland urbanization. *J Arid Environ.* 56: 659-680.
- Primavera J.H., Sadaba R.S., Leбата M.J.H.L., Altamirano J.P. 2004. Handbook of mangroves in the Philippines-Panay. Iloilo, Philippines. Southeast Asian Fisheries Development Center Aquaculture Department. pp. 106.
- Puente M.E., Bashan Y. 1993. Effect of inoculation with *A. brasilense* strains on the germination and seedlings growth of the giant columnar Cardon cactus (*Pachycereus pringlei*). *Symbiosis.* 15: 49-60.
- Puente M.E., Holguin G., Glick B.R., Bashan Y. 1999. Root surface colonization of black mangrove seedlings by *Azospirillum halopraeferens* and *Azospirillum brasilense* in seawater. *FEMS Microbiol Ecol.* 29: 283-292.
- Puente M.E., Li C.Y., Bashan Y. 2004a. Microbial populations and activities in the rhizoplane of rock-weathering desert plants. II. Growth promotion of cactus seedlings. *Plant Biol.* 6: 643-650.
- Puente M.E., Bashan Y., Li C.Y., Lebsky V.K. 2004b. Microbial populations and activities in the rhizoplane of rock-weathering desert plants. I. root colonization and weathering of igneous rocks. *Plant Biol.* 6: 629-642.
- Puente M.E., Li C.Y., Bashan Y. 2009a. Rock-degrading endophytic bacteria in cacti. *Environ Exp Bot.* 66: 389-401.
- Puente M.E., Li C.Y., Bashan Y. 2009b. Endophytic bacteria in cacti seeds can improve the development of cactus seedlings. *Environ Exp Bot.* 66: 402-408.
- Radwan S.S., Dashti N., El-Nemr I.M. 2005. Enhancing the growth of *Vicia faba* plants by microbial inoculation to improve their potential for oily desert areas. *Int J Phytorem.* 7: 19-32.
- Rajkumar M., Freitas H. 2008a. Effects of inoculation of plant growth-promoting bacteria on Ni uptake by Indian mustard. *Biores Technol.* 99: 3491-3498.
- Rajkumar M., Freitas H. 2008b. Influence of metal-resistant plant growth-promoting bacteria on the growth of *Ricinus communis* in soil contaminated with heavy metals. *Chemosphere.* 71: 834-842.
- Rao A.V., Tak R. 2001. Effect of rhizobial inoculation on *Albizia lebbeck* and its rhizosphere activity in mine spoils. *Arid Land Res Manag.* 15: 157-162.
- Reed M.L.E., Glick B.R. 2005. Growth of canola (*Brassica napus*) in the presence of plant growth-promoting bacteria and either copper or polycyclic aromatic hydrocarbons. *Can J Microbiol.* 51: 1061-1069.

- Reed M.L.E., Warner B.G., Glick B.R. 2005. Plant growth-promoting bacteria facilitate the growth of the common reed *Phragmites australis* in the presence of copper or polycyclic aromatic hydrocarbons. *Curr Microbiol.* 51: 425-429.
- Reichman S.M. 2007. The potential use of legume-rhizobium symbiosis for the remediation of arsenic contaminated sites. *Soil Biol Biochem.* 39: 2587-2593.
- Requena N., Jimenez I., Toro M., Barea J.M. 1997. Interactions between plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* spp. in the rhizosphere of *Anthyllis cytisoides*, a model legume for revegetation in Mediterranean semi-arid ecosystems. *New Phytologist.* 136: 667-677.
- Requena N., Perez-Solis E., Azcon-Aguilar C., Jefferies P., Barea J.M. 2001. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. *Appl Environ Microbiol.* 67: 495-498.
- Rodriguez H., Gonzalez T., Goire I., Bashan Y. 2004. Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. *Naturwissenschaften.* 91: 552-555.
- Rodriguez H., Fraga R., Gonzalez T., Bashan Y. 2006. Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant and Soil.* 287: 15-21.
- Rojas A., Holguin G., Glick B.R., Bashan Y. 2001. Synergism between *Phyllobacterium* sp. (N-fixer) and *Bacillus licheniformis* (P-solubilizer), both from a semiarid mangrove rhizosphere. *FEMS Microbiol Ecol.* 35: 181-187.
- Rönnbäck P. 1999. The ecological basis for economic value of seafood production supported by mangrove ecosystems. *Ecol Econom.* 29: 235-252.
- Roundy B.A., Heydari H., Watson C., Smith S.E., Munda B., Pater M. 2001. Summer establishment of Sonoran Desert species for revegetation of abandoned farmland using line source sprinkler irrigation. *Arid Land Res Manag J.* 15: 23-39.
- Ryu C.M., Hu C.H., Locy R.D., Kloepper J.W. 2005. Study of mechanisms for plant growth promotion elicited by rhizobacteria in *Arabidopsis thaliana*. *Plant and Soil.* 268: 285-292.
- Saravanan V.S., Madhaiyan M., Thangaraju M. 2007. Solubilization of zinc compounds by the diazotrophic, plant growth promoting bacterium *Gluconacetobacter diazotrophicus*. *Chemosphere.* 66: 1794-1798.
- Senthilkumar P., Prince W.S.P.M., Sivakumar S., Subbhuraam C.V. 2005. *Prosopis juliflora* - A green solution to decontaminate heavy metal (Cu and Cd) contaminated soils. *Chemosphere.* 60: 1493-1496.

- Sheng X.F., Xia J.J. 2006. Improvement of rape (*Brassica napus*) plant growth and cadmium uptake by cadmium-resistant bacteria. *Chemosphere*. 64: 1036-1042.
- Sylvia D.M., Williams S.E. 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and environmental stress. En Bethlenfalvay, G.J., Linderman, R.G. (Eds.). *Mycorrhizae in sustainable agriculture*. Special Publication No. 54, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp. 101-124.
- Solís-Domínguez F.A., Valentín-Vargas A., Chorover J., Maier R.M. 2011. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant biomass and the rhizosphere microbial community structure of mesquite grown in acidic lead/zinc mine tailings. *Sci Total Environ* (accepted).
- Strangmann A., Bashan Y., Giani L. 2008. Methane in pristine and impaired mangrove soils and its possible effect on establishment of mangrove seedlings. *Biol Fert Soils*. 44: 511–519.
- Suresh B., Ravishankar G.A. 2004. Phytoremediation-A Novel and Promising Approach for Environmental Clean-up. *Crit Rev Biotechnol*. 24: 97-124.
- Tam N.F.Y., Wong Y.S. 2000. Effect of immobilized microalgal bead concentration on wastewater nutrient removal. *Environ Pollut*. 107: 145-151.
- Toledo G., Bashan Y., Soeldner, A. 1995a. Cyanobacteria and black mangroves in Northwestern Mexico: colonization, and diurnal and seasonal nitrogen fixation on aerial roots. *C J Microbiol*. 41: 999-1011.
- Toledo G., Bashan Y., Soeldner, A. 1995b. In vitro colonization and increase in nitrogen fixation of seedling roots of black mangrove inoculated by a filamentous cyanobacteria. *Can J Microbiol*. 41: 1012-1020.
- Toledo G., Rojas A., Bashan Y. 2001. Monitoring of black mangrove restoration with nursery-reared seedlings on an arid coastal lagoon. *Hydrobiologia*. 444: 101-109.
- Tsuruta T. 2007. Removal and recovery of uranium using microorganisms isolated from North American uranium deposits. *Am J Environ Sci*. 3: 60-66.
- Valdenegro M., Barea J.M., Azcón R. 2001. Influence of arbuscular-mycorrhizal fungi, *Rhizobium meliloti* strains and PGPR inoculation on the growth of *Medicago arborea* used as model legume for re-vegetation and biological reactivation in a semi-arid Mediterranean area. *Plant Growth Regul*. 34: 233-240.
- Valderrama L.T., Del Campo C.M., Rodríguez C.M., de-Bashan L.E., Bashan Y. 2002. Treatment of recalcitrant wastewater from ethanol and citric acid production using the microalga *Chlorella vulgaris* and the macrophyte *Lemna minuscula*. *Water Res* . 36: 4185-4192.

- Vazquez P., Holguin G., Puente M.E., Lopez-Cortez A., Bashan Y. 2000. Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon. *Biol Fer Soils*. 30: 460-468.
- Velázquez-Rodríguez A.S., Flores-Román D., Acevedo-Sandoval O.A. 2001. Aggregate formation in tepetate by effect of plant species. *Agrociencia*. 35: 311-320.
- Vessey J.K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*. 255: 571-586.
- Vijayalakshmi S.P., Raichur A.M. 2003. The utility of *Bacillus subtilis* as a bioflocculant for fine coal. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 29: 265-275.
- Vivas A., Biro B., Ruiz-Lozano J.M., Barea J.M., Azcon R. 2006. Two bacterial strains isolated from a Zn-polluted soil enhance plant growth and mycorrhizal efficiency under Zn-toxicity. *Chemosphere*. 62: 1523-1533.
- Vovides A.G., Bashan Y., López-Portillo J.A., Guevara R. 2011. Nitrogen fixation in preserved, reforested, naturally regenerated and impaired mangroves as an indicator of functional restoration in mangroves in an arid region of Mexico. *Rest Ecol* (In Press).
- Wang X., Dong Z., Zhang J., Liu L. 2004. Modern dust storms in China: an overview. *J Arid Environ*. 58: 559-574.
- Whiting S.N., De Souza M.P., Terry N. 2001. Rhizosphere bacteria mobilize Zn for hyperaccumulation by *Thlaspi caerulescens*. *Environ Sci Technol*. 35: 3144-3150.
- Wright S.F., Upadhyaya A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*. 198: 97-107.
- Wu S.C., Cheung K.C., Luo Y.M., Wong H.M. 2006a. Effects of inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on metal uptake by *Brassica juncea*. *Environ Pollut*. 140: 124-135.
- Wu S.C., Luo Y.M., Cheung K.C., Wong M.H. 2006b. Influence of bacteria on Pb and Zn speciation, mobility and bioavailability in soil: a laboratory study. *Environ Pollut*. 144: 765-773.
- Ye Z.H., Yang Z.Y., Chan G.Y.S., Wong M.H. 2001. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings. A greenhouse study. *Environ Int*. 26: 449-455.
- Zhuang X., Chen J., Shim H., Bai Z. 2007. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environ Int*. 33: 406-413.