



II SIMPOSIUM NACIONAL “MANEJO NUTRICIONAL DE CULTIVOS DE EXPORTACIÓN”

# Los microorganismos del suelo y su rol en la nutrición vegetal

Sady García B. *PhD*

[sjgarciab@lamolina.edu.pe](mailto:sjgarciab@lamolina.edu.pe)

La Molina, 08 – 09 de Marzo 2013

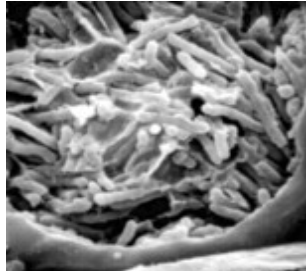
# Contenido

- Diversidad microbiana en el suelo
- Roles de los microorganismos en la nutrición vegetal
- Disponibilidad de nutrientes
  - Nitrógeno
  - Fósforo
  - Potasio
  - Hierro y manganeso
- Estimulación del crecimiento de la planta

# Diversidad de microorganismos en el suelo

## BACTERIAS

### Eubacterias



*Rhizobium* sp.

### Actinomicetos



*Frankia* sp.

### Cianobacterias

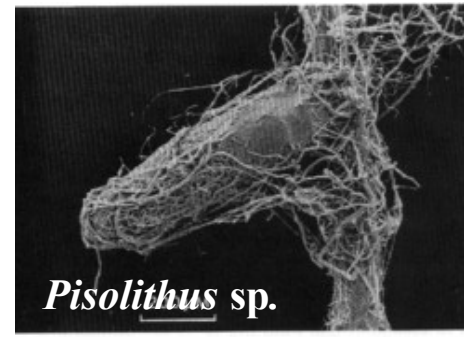


*Nostoc* sp.

## HONGOS

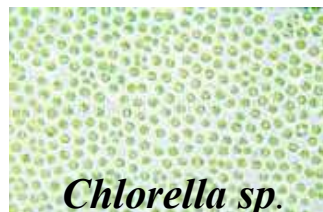


*Amanita* sp.



*Pisolithus* sp.

## ALGAS



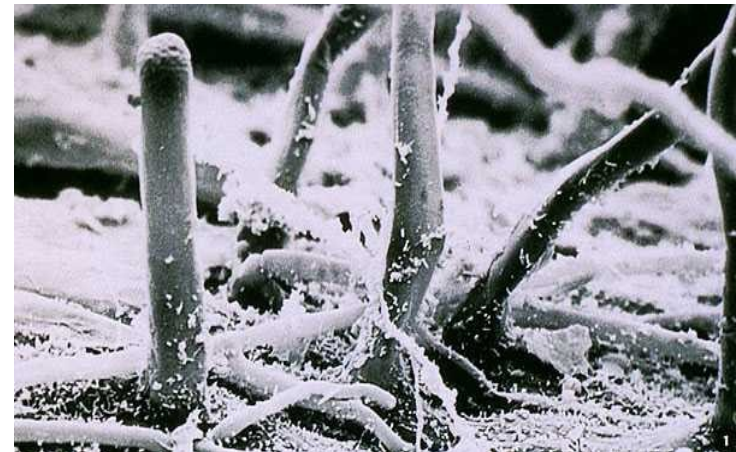
*Chlorella* sp.

## PROTOZOOS



# Roles de los microorganismos en la nutrición vegetal

- Directos
  - Fijación de nitrógeno.
  - Mineralización de formas orgánicas.
  - Solubilización de elementos no disponibles.
- Indirectos
  - Producción de hormonas y factores de crecimiento.
  - Protección contra patógenos.

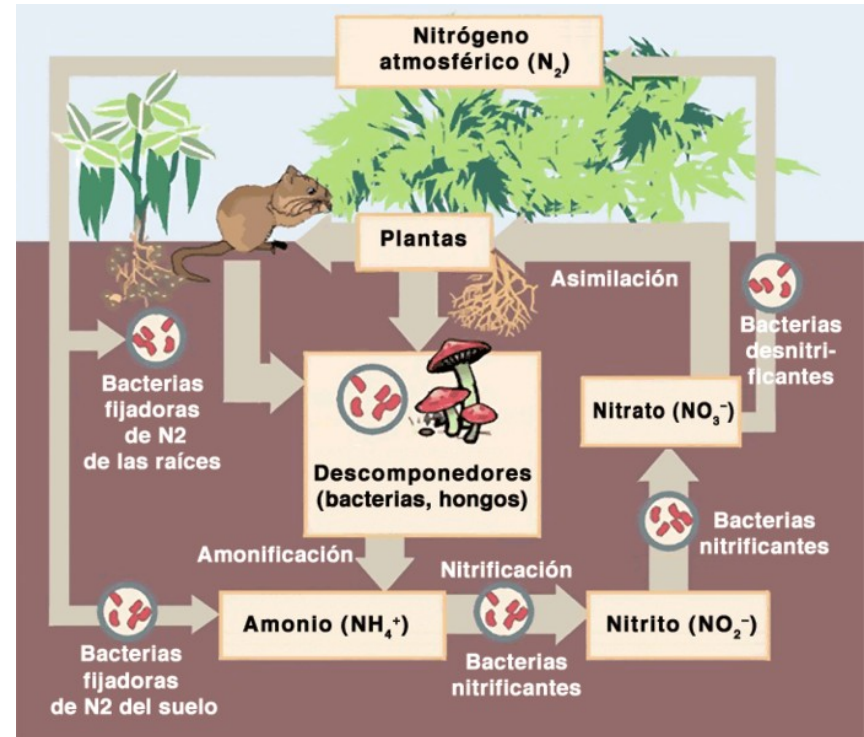


# **Disponibilidad del nitrógeno**

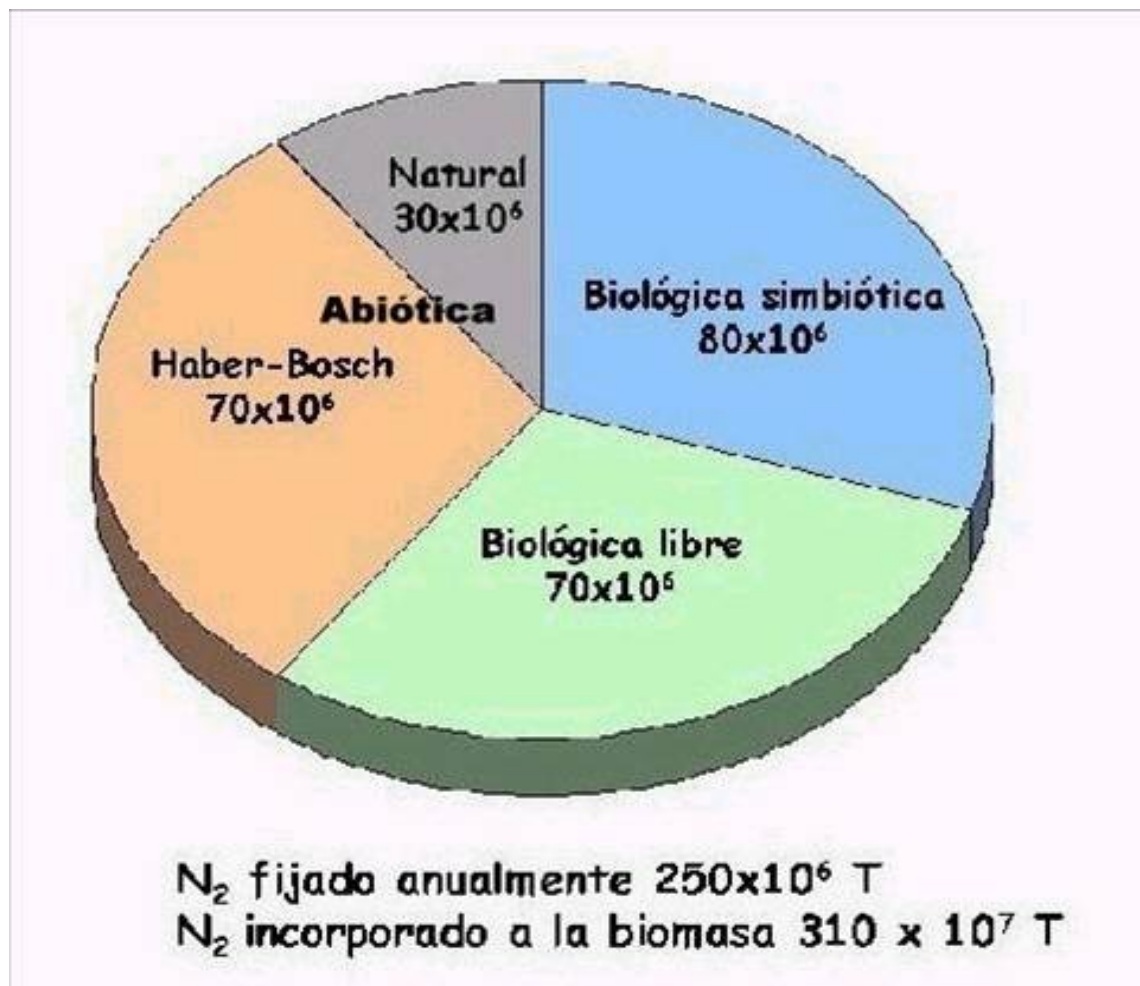
Fijación biológica

# Fijación biológica del nitrógeno

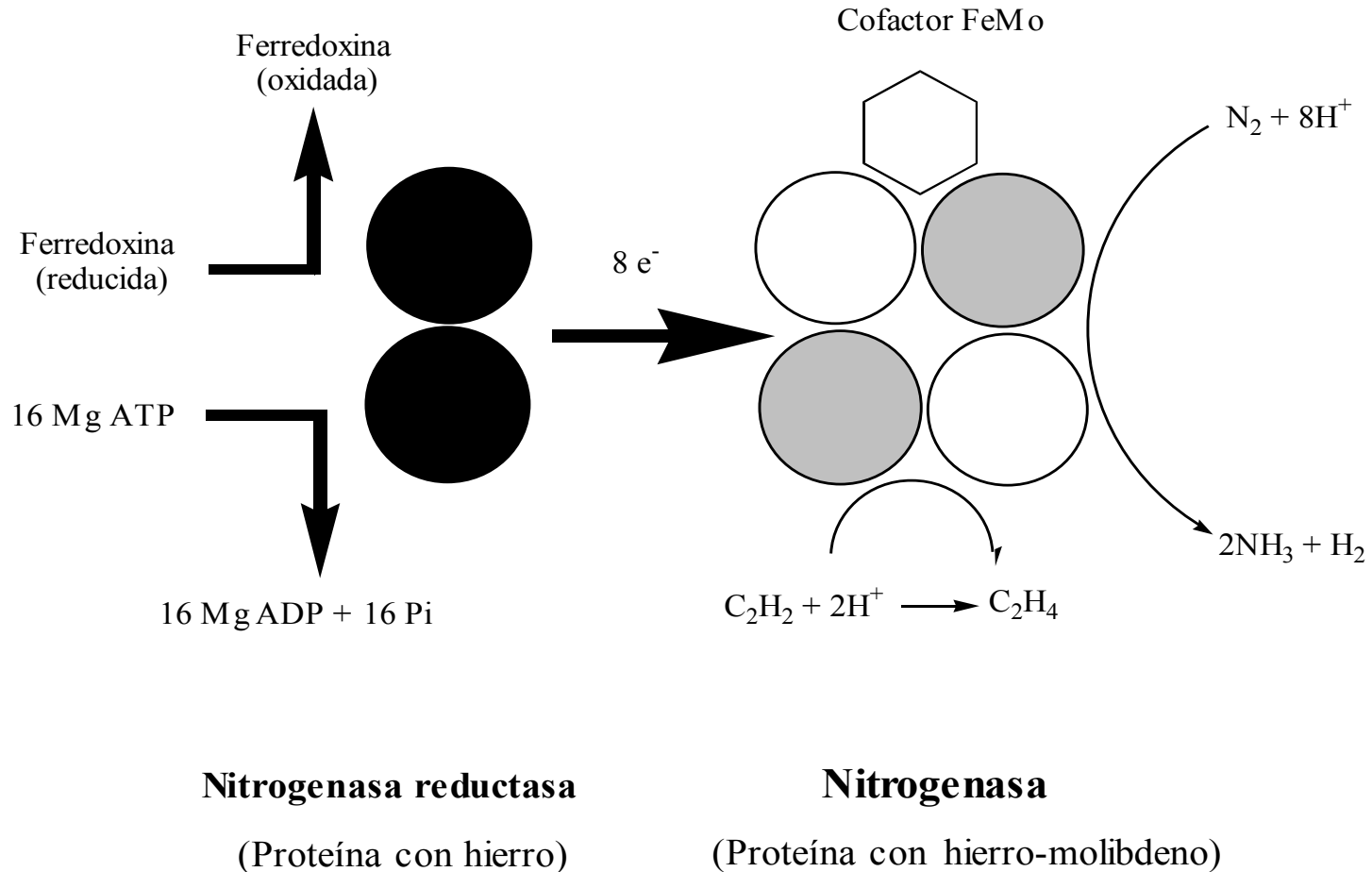
- Reducción del  $N_2$  atmosférico a amonio.
- Exclusiva de organismos procarióticos.
- Es la reacción más importante de ingreso de N al suelo.



## Distribución de la fijación biológica del nitrógeno



# Complejo enzimático de la nitrogenasa



Reacción total:



Gasto energético = 121.6 Kcal por mol de  $\text{N}_2$

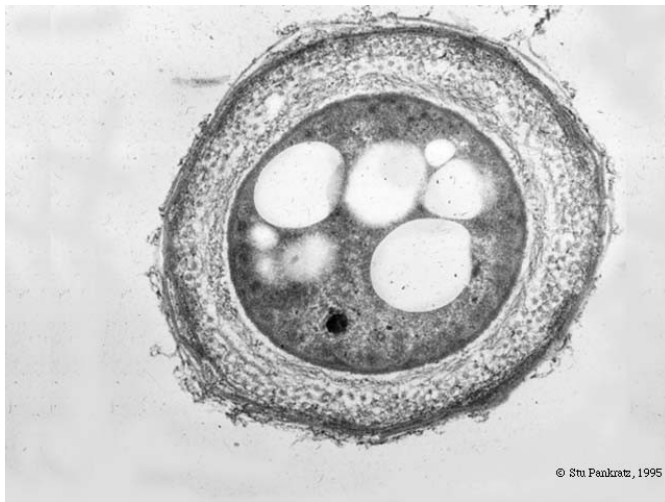
# Tipos de organismos fijadores de nitrógeno

Fijación	Bacterias	Actinomicetos	Cianobacterias
Libre aeróbica	<i>Azotobacter,</i> <i>Derxia</i>		<i>Nostoc,</i> <i>Oscillatoria</i>
Libre anaeróbica	<i>Clostridium</i> <i>Desulfovibrio</i>		
Asociada	<i>Azospirillum,</i> <i>Herbaspirillum</i>		
Simbiótica	<i>Rhizobium,</i> <i>Bradyrhizobium</i>	<i>Frankia</i>	<i>Nostoc, Anabaena</i>

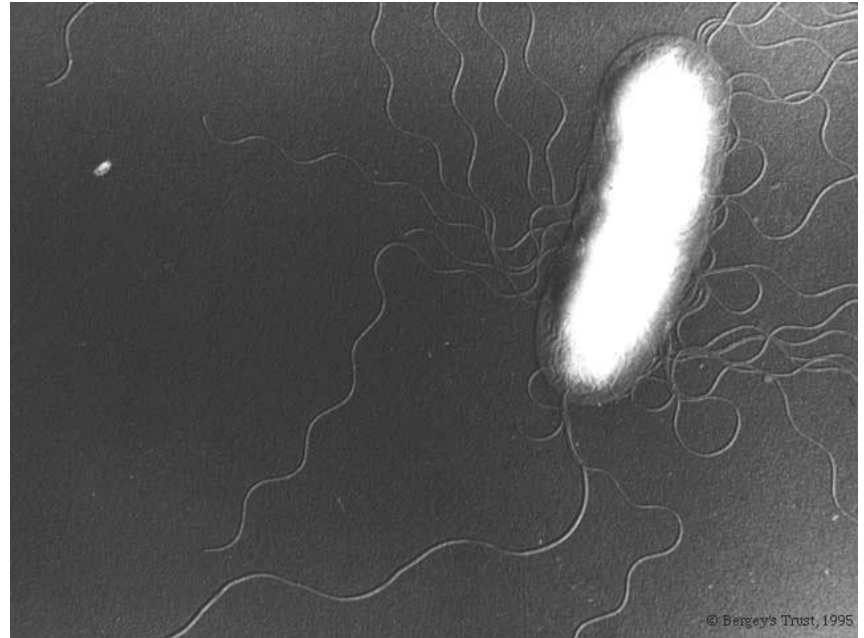
# Fijadores libres



*Azotobacter vinelandii*



Endospora de *Azotobacter* sp.



*Azospirillum* sp.

## Especies bacterianas con capacidad de fijación de nitrógeno rizoplánica o endofítica

Especie bacteriana	Origen del aislado
<i>Azospirillum brasiliense</i> Sp245 Sp7	Raíces de trigo esterilizadas superficialmente, Brasil Suelo rizosférico de <i>Digitaria decumbens</i> , Brasil
<i>Azospirillum lipoferum</i>	Raíces de trigo y maíz, Brasil
<i>Azospirillum amazonense</i>	Raíces y suelo rizosférico de gramíneas, región amazónica, Brasil
<i>Azospirillum halopraeferans</i>	Raíces de pasto Kallar creciendo en suelo salino, Pakistán
<i>Azospirillum irakense</i>	Raíces y suelo rizosférico de arroz, Irak
<i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i>	Raíces y tallos de caña de azúcar, Brasil
<i>Herbaspirillum seropedicae</i>	Raíces de cereales (maíz, sorgo, arroz), Brasil
<i>Azoarcus</i> spp.	Raíces de pasto Kallar creciendo en suelo salino, Pakistán

Fuente: Steenhoudt and Vanderleyden, (2000).

# Fijadores simbióticos



*Rhizobium leguminosarum* bv *trifolii* adherido al pelo radical de trébol

# Clasificación de los rhizobios

Clase I: Alfaproteobacterias, Orden VI: Rhizobiales

<b>Familia</b>	<b>Genero</b>	<b>Especie representativa</b>
<i>I. Rhizobiaceae</i>	<i>Rhizobium</i>	<i>R. leguminosarum</i>
	<i>Allorhizobium</i>	<i>A. undicola</i>
	<i>Sinorhizobium</i>	<i>S. fredii</i>
<i>IV. Phyllobacteriaceae</i>	<i>Mesorhizobium</i>	<i>M. ciceri</i>
<i>VII. Bradyrhizobiaceae</i>	<i>Bradyrhizobium</i>	<i>B. japonicum</i>
<i>VIII. Hyphomicrobiaceae</i>	<i>Azorhizobium</i>	<i>A. caulinodans</i>

# Tipos de nódulos en leguminosas



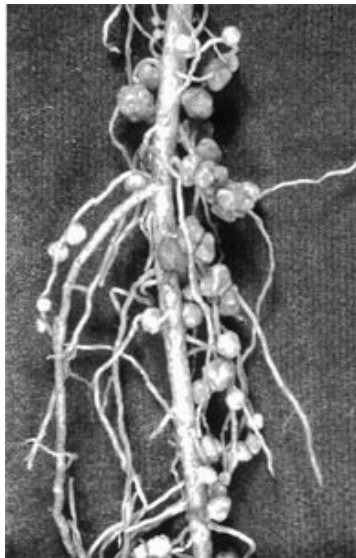
Alfalfa



Soya



Frijol



*Lotus*



Lupino



Nódulos aéreos en *Sesbania* sp

# Rangos promedio de nitrógeno fijado por rhizobios en diferentes leguminosas

Cultivo	Nombre científico	kg N fijado ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Maní	<i>Arachis hypogaea</i>	60 – 109
Fríjol de palo	<i>Cajanus cajan</i>	160 – 224
Garbanzo	<i>Cicer arietinum</i>	80 – 104
Soya	<i>Glycine max</i>	70 – 90
Lenteja	<i>Lens culinaris</i>	60 – 85
Alfalfa	<i>Medicago sativa</i>	160 – 240
Fríjol	<i>Phaseolus vulgaris</i>	25 – 50
Fríjol castilla	<i>Vigna unguiculata</i>	100 – 200

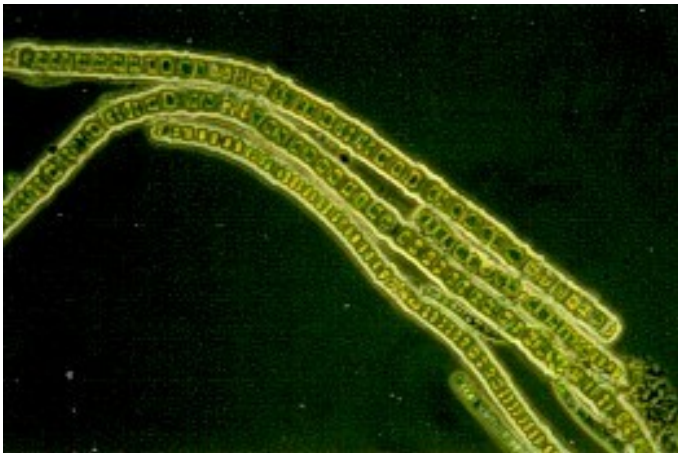
Mulongoy *et al.* (1992), Kahindi *et al.* (1997)

# Fijación de nitrógeno por cianobacterias

- La nitrogenasa se encuentra en células especializadas llamadas “heterocistos”.



*Anabaena* sp



*Nostoc* sp



Colonia de *Anabaena sphaerica* mostrando los heterocistos

# Simbiosis *Anabaena*-*Azolla*

- *Anabaena* sp. puede colonizar al helecho acuático *Azolla*.
- Puede acumular 40 – 90 kg N ha<sup>-1</sup> entre 30 – 46 días (Watanabe, 1982).
- En ensayos de campo se han registrado incrementos de rendimiento de arroz de 2.6 – 3.1 t ha<sup>-1</sup> equivalentes a 30 kg N ha<sup>-1</sup> ( Boddey et al., 1997)



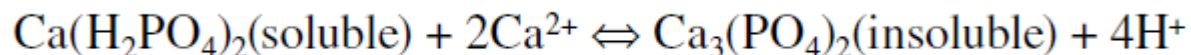
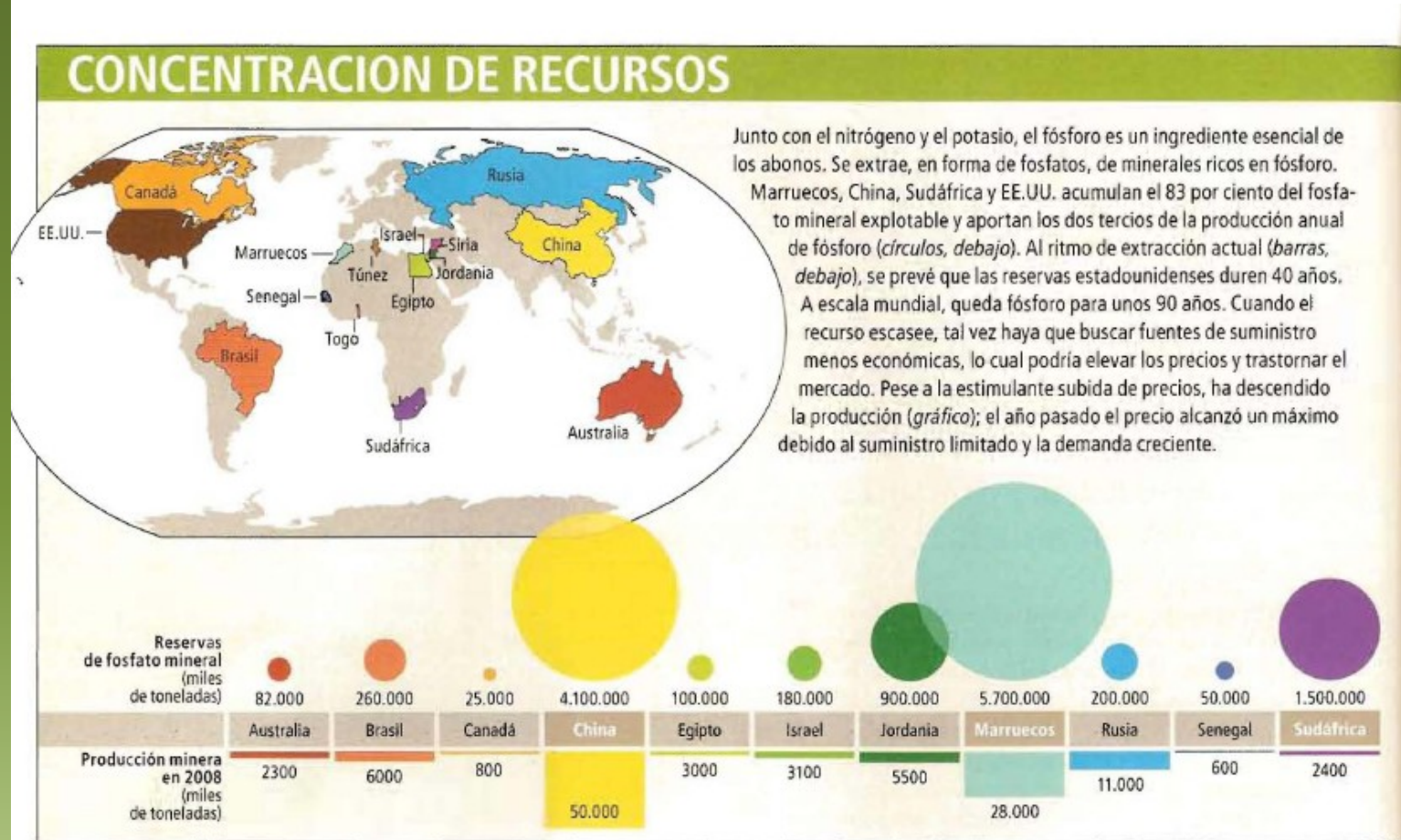
*Azolla* sp

# **Disponibilidad del fósforo**

Solubilización de fosfatos

# Introducción

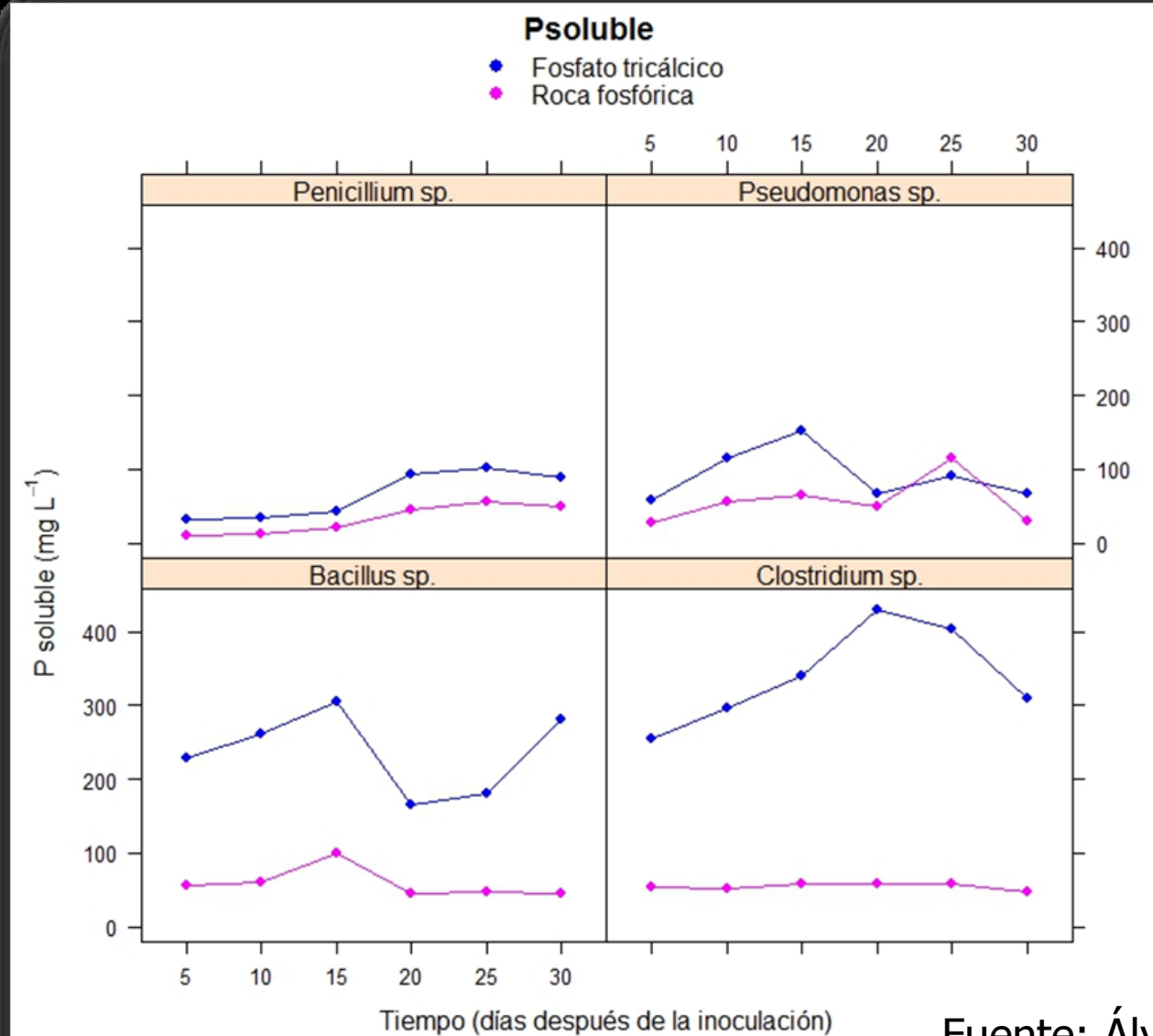
- El fósforo es un elemento **limitante** para la productividad de ecosistemas terrestres (Cramer, 2010).



# Bacterias solubilizadoras de fosfatos

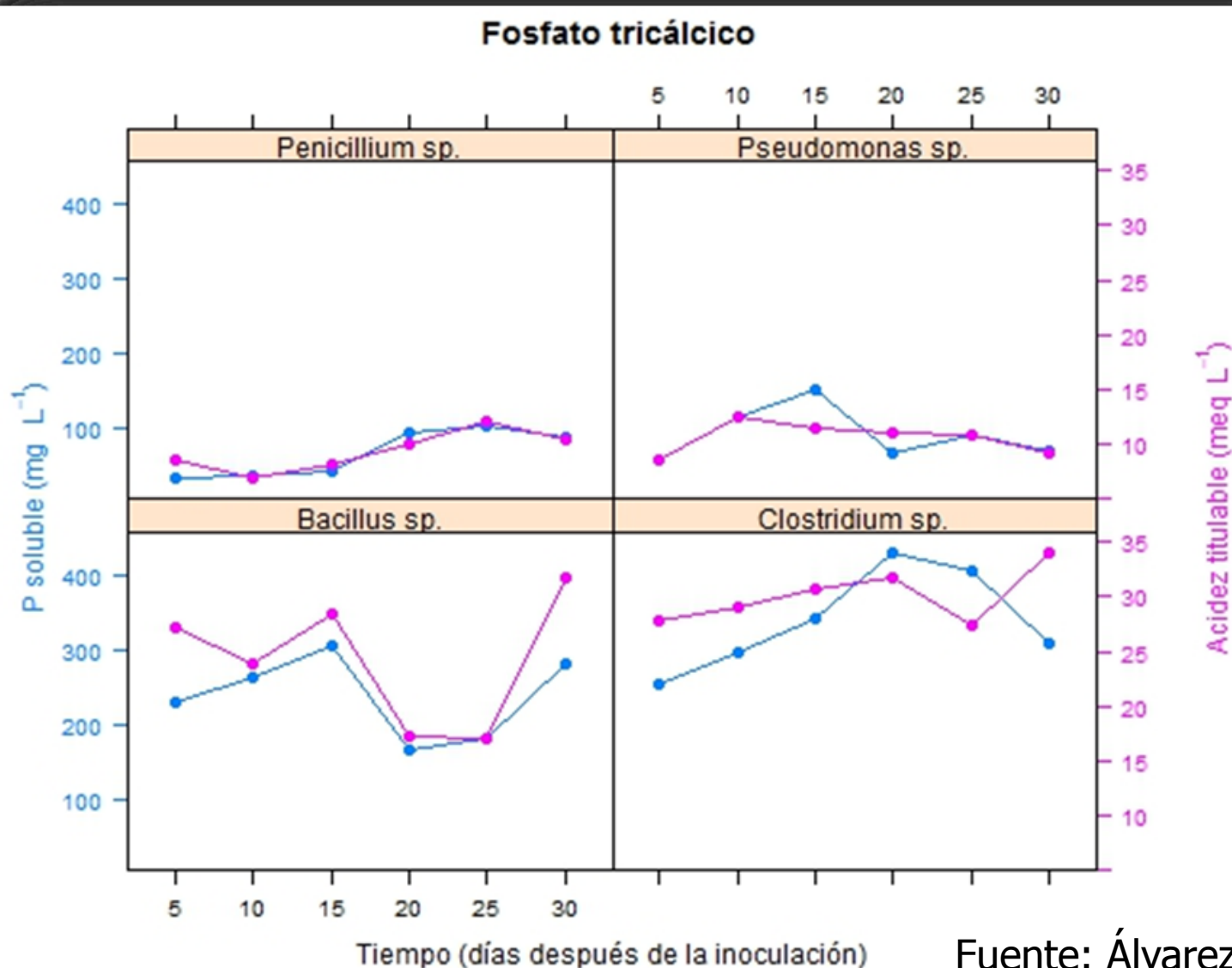
- El ejemplo mas conocido es *Bacillus megaterium* ssp *phosphaticum*.
- Ha sido utilizado a gran escala bajo el nombre *Phosphobacterin*.
- Otros géneros incluidos son:
  - *Rhodococcus*, *Arthrobacter*, *Serratia* (Chen *et al*, 2006).
- Los mecanismos incluyen liberación de protones (Illmer y Schimmer, 1995), secreción de ácidos orgánicos y metabolismo (Illmer *et al.*, 1995).

# Variación de la concentración de P soluble en medio nutritivo adicionado con fosfato tricálcico y roca fosfórica



Fuente: Álvarez, (2012)

# Relación entre la concentración de P soluble y la acidez titulable en el medio nutritivo durante el periodo de incubación



Fuente: Álvarez, (2012)

**Cuadro 2. Ácidos orgánicos y sus rutas biosintéticas en bacterias solubilizadoras de fosfato (BSP).**

Ácido	Fórmula	Ruta biosintética	Bacteria que lo produce	Referencia
Acético	$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$	Oxidación incompleta de azúcares (fermentación acética)	<i>Acetobacter aceti</i> , <i>Gluconobacter oxydans</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Singh y Amberger (1998a)
Láctico	$\text{CH}_3\text{CHOHCH}_2\text{CO}_2\text{H}$	(Glicólisis) Fermentación láctica primaria	<i>Bacillus liqueniformis</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Bano y Musarrat (2003)
Oxálico	$\text{HO}_2\text{CCO}_2\text{H}$	Ácidos tricarboxílicos	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Singh y Amberger (1998a)
Cítrico	$\text{HO}_2\text{CCH}_2\text{COHCO}_2\text{HCHO}_2\text{CO}_2\text{H}$	Ácidos tricarboxílicos	<i>Erwinia herbicola</i> y <i>Yarrowia lipolytica</i>	Goldstein (1995); Vassileva et al. (2000)
Butírico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{CO}_2\text{H}$	Oxidación anaerobia del piruvato	<i>Bacillus liqueniformis</i> y <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Wan y Wong (2004)
Succínico	$\text{HO}_2\text{CCH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H}$	Ciclo del glioxilato y ácidos tricarboxílicos	<i>Pseudomonas putida</i> y <i>Pseudomonas fluorescens</i>	Liu et al. (1992)
Málico	$\text{HO}_2\text{CCHOHCH}_2\text{CO}_2\text{H}$	Ácidos tricarboxílicos	<i>Bacillus megaterium</i>	Singh y Amberger (1998b)
Glucónico	$\text{HO}_2\text{C}(\text{CHOH})_4\text{CH}_2\text{OH}$	Oxidación directa de la glucosa	<i>Erwinia herbicola</i> , <i>Pseudomonas cepacia</i> y <i>Burkholderia cepacia</i>	Goldstein y Liu (1987)
Fumárico	$\text{HO}_2\text{CCOCH}_2\text{CO}_2\text{H}$	Ácidos tricarboxílicos	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Harrison et al. (1972)
2-Cetoglucónico	$\text{HO}_2\text{CO}(\text{CHOH})_4\text{CH}_2\text{OH}$	Oxidación directa de la glucosa	<i>Rhizobium leguminosarum</i> , <i>Rhizobium meliloti</i> y <i>Bacillus firmus</i>	Anderson et al. (1985)

## Efecto de la co-inoculación con *Mesorhizobium*, BSF y *Trichoderma* spp en el crecimiento y rendimiento de garbanzo

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Biomasa (g planta <sup>-1</sup> )	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )
Testigo	38.0	21.7	12.0
Roca fosfatada	24.0	16.2	11.3
<i>Mesorhizobium ciceri</i>	38.6	25.3	15.4
BSF + RF + M. c.	45.0	47.6	30.3
BSF + TH + RF + M. c.	48.0	48.8	30.7

Datos tomados 75 dds.

BSF: *Bacillus megaterium* ssp *phosphaticum*

TH: *Trichoderma harzianum*

Rudresh *et al.*, (2005)

## Efecto de la co-inoculación con *Mesorhizobium*, BSF y *Trichoderma* spp en la extracción de P del cultivo de garbanzo

Tratamiento	Extracción de P (mg planta <sup>-1</sup> )		
	Follaje	Raíces	Granos
Testigo	22	0.25	27
Roca fosfatada	12	0.05	15
<i>Mesorhizobium ciceri</i>	42	0.48	46
BSF + RF + M. c.	77	0.87	100
BSF + TH + RF + M. c.	89	0.84	115

Datos tomados 75 dds.

BSF: *Bacillus megaterium* ssp *phosphaticum*

TH: *Trichoderma harzianum*

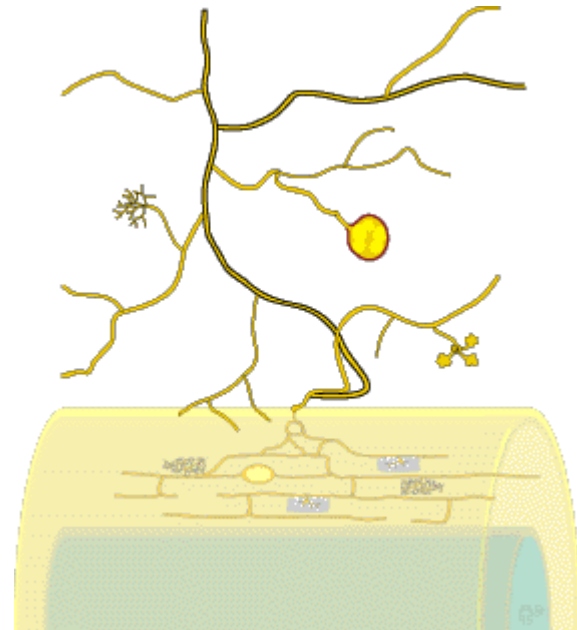
Rudresh et al., (2005)

# Hongos solubilizadores de fosfatos

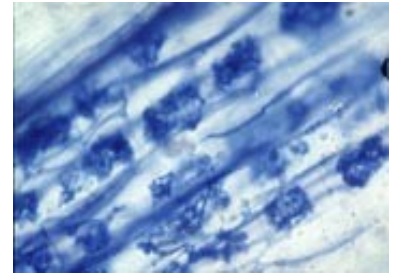
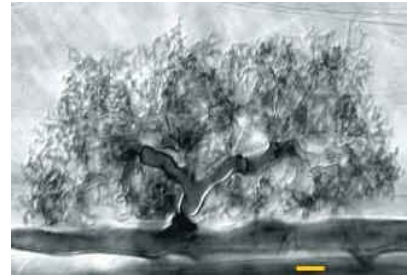
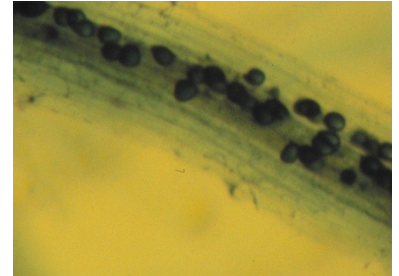
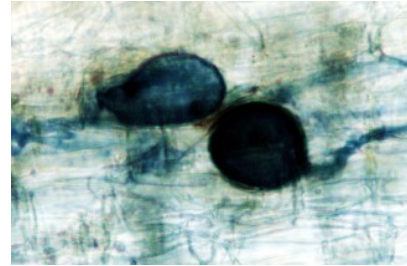
- Los hongos con capacidad de solubilización de fosfatos incluyen a géneros como:
  - *Chaetomium globosum* (Tarafdar y Gharu, 2006)
  - *Aspergillus niger* (Barroso y Nahas, 2005)
  - *Penicillium rugulosum* (Reyes *et al.*, 1999)
  - *Penicillium radicum* (Whitelaw *et al.*, 1999)
- Los mecanismos propuestos incluyen la acidificación del medio y la secreción de ácidos orgánicos (glucónico).

# Simbiosis micorrítica

- Las micorrizas o asociación micorrítica es la simbiosis presentada entre las plantas superiores (a través de sus raíces) y ciertas especies de hongos.
- La planta provee carbono y el hongo contribuye a la nutrición de la planta.



# Ectomicorrizas y micorrizas arbusculares



# Beneficios de la simbiosis micorrízica

- Incremento de la extracción de nutrientes por parte de la planta (P, Zn, Cu y N).
- Incremento de la masa y superficie de las raíces.
- Mayor capacidad de absorción de agua del suelo y tolerancia al estrés hídrico.



# **Disponibilidad del potasio**

Solubilización de micas

# Organismos solubilizadores de potasio

- El potasio es abundante en el suelo, pero de baja disponibilidad.
- Diversas bacterias presentan capacidad para disolver potasio de minerales poco solubles (micas).
  - *Azotobacter chroococcum* (Singh et al., 2010)
  - *Bacillus mucilaginosus* (Basak y Biswas, 2009)
  - *Paenibacillus* sp. (Liu et al., 2012)
  - *Aspergillus awamori* (Biswas, 2011)
- Los mecanismos propuestos son la secreción de ácidos orgánicos o la quelatación de iones silicio (Basak y Biswas, 2010). En ambos casos se libera K<sup>+</sup>.

**Efecto de la aplicación de mica y la inoculación con *Bacillus mucilaginosus* sobre el rendimiento de biomasa y la absorción de potasio de pasto Sudan (suma de cinco cortes) cultivado en dos alfileres**

Tratamiento	Rend. biomasa (g mac <sup>-1</sup> )		K absorbido (mg mac <sup>-1</sup> )	
	Sin <i>B. m.</i>	Con <i>B. m.</i>	Sin <i>B. m.</i>	Con <i>B. m.</i>
<i>Dosis de mica (mg kg<sup>-1</sup>)</i>				
M <sub>0</sub> (0 mg kg <sup>-1</sup> de suelo)	14.1	20.7	240.0	397.7
M <sub>1</sub> (50 mg kg <sup>-1</sup> de suelo)	17.6	22.8	308.5	458.4
M <sub>2</sub> (100 mg kg <sup>-1</sup> de suelo)	18.8	25.3	336.1	531.2
M <sub>3</sub> (200 mg kg <sup>-1</sup> de suelo)	18.1	25.4	335.0	559.1
<i>LSD (P=0.05)</i>				
<i>Dosis de mica</i>	1.9		38.3	
Inoculación	3.6		73.0	

Fuente: Basak y Biswas, (2009)

**Cambios en la disponibilidad de K y N en el suelo, luego de la aplicación de mica co-inoculada con una bacteria solubilizadora de potasio (*Bacillus mucilaginosus*) y fijadora de N (*Azotobacter chroococcum*) en un alfisol**

Tratamiento	K disponible (mg kg <sup>-1</sup> )		N disponible (mg kg <sup>-1</sup> )	
	30 días	150 días	30 días	150 días
Control	87.2 d	84.7 e	93.5 e	78.6 d
Mica (100 mg kg <sup>-1</sup> )	110.8 bc	118.2 cd	114.7 c	93.8 c
<i>B. mucilaginosus</i>	107.9 bc	122.0 bc	103.6 d	94.0 c
<i>A. chroococcum</i>	104.3 c	108.7 d	117.4 bc	101.4 bc
Mica + <i>B. mucilaginosus</i>	114.9 b	130.2 ab	115.8 c	96.1 c
Mica + <i>A. chroococcum</i>	105.4 c	115.3 cd	121.4 b	107.1 b
Mica + <i>B. mucilaginosus</i> + <i>A. chroococcum</i>	125.1 a	136.5 a	131.3 a	116.4 a
Suelo inicial	61.4		91.1	

Fuente: Basak y Biswas, (2010)

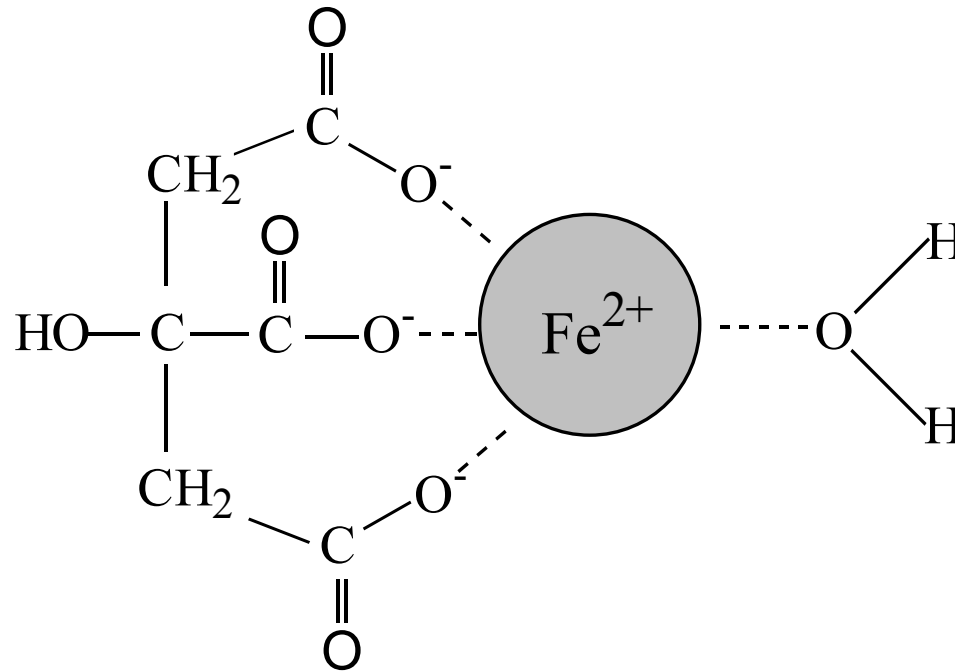
# **Disponibilidad del hierro y manganeso**

Producción de sideróforos

# Solubilización del hierro

- El hierro es el cuarto elemento en la corteza terrestre.
- Esencial para todos los seres vivos.
- Casi todo se presenta en forma oxidada  $\text{Fe}^{3+}$  (goethita, hematita) de baja solubilidad en pH fisiológico ( $10^{-18}$  M).
- La estrategia microbiana más eficaz para la provisión de Fe es la producción de sideróforos (Gr. *Sideros*= hierro, *foros*= transportador).

# Quelación por ácidos orgánicos



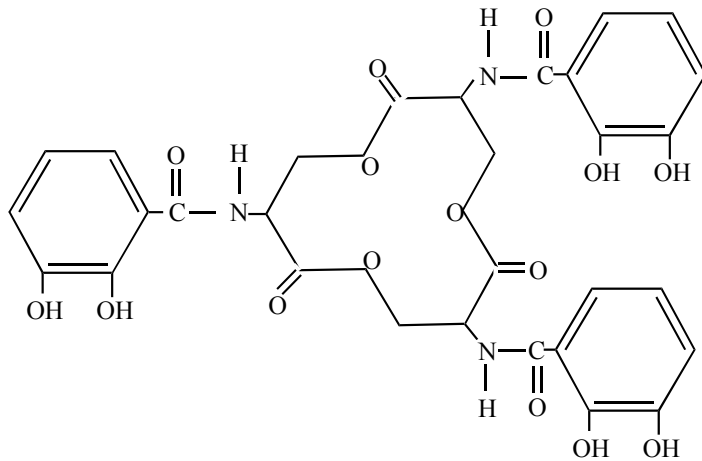
**Ejemplo de quelación de  $\text{Fe}^{2+}$  por ácido cítrico**

# Diversidad de sideróforos producidos por microorganismos del suelo

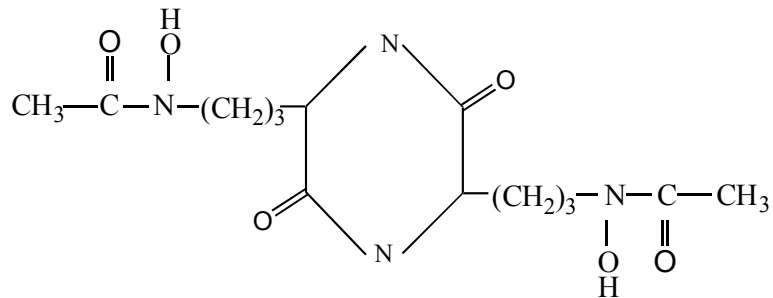
Organismo	Sideróforo	Grupo químico
<i>Escherichia coli</i>	<i>Enterobactin</i>	Catecolato
<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	<i>Agrobactin</i>	Catecol y 2-hidroxifeniloxazolina
<i>Rhizobium leguminosarum</i> bv. <i>viciae</i>	<i>Vicibactin</i>	Trihidroxamato cíclico
<i>Sinorhizobium meliloti</i>	<i>Rhizobactin</i>	Hidroxamato
<i>Mesorhizobium ciceri</i>		Catecolato
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>		Citrato
<i>Paracoccus denitrificans</i>	<i>Parabactina</i>	Catecol y 2-hidroxifeniloxazolina
<i>Salmonella</i> sp.	<i>Enteroquelin</i>	Catecolato
<i>Actinomyces</i> , <i>Streptomyces</i>	<i>Ferrioxamina B</i>	Hidroxamato
<i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> , <i>Ustilago</i>	<i>Ferricromo</i>	Hidroxamato
<i>Rhodotorula</i> sp.	Ácido rodotorúlico	"
<i>Fusarium dimerum</i>	Ácido dimerúmico	"

Guerinot y Yi, (1994); Mullen, (1999); Benite *et al.*, (2002)

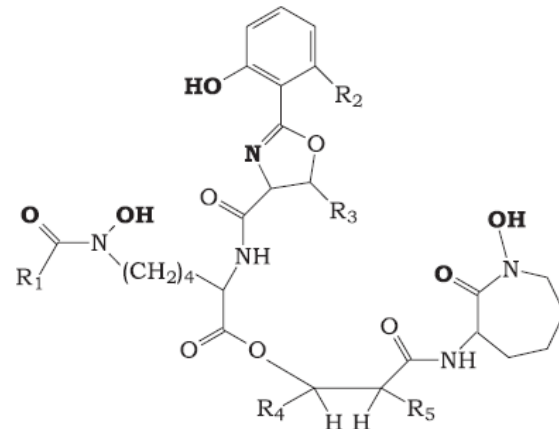
# Sideróforos



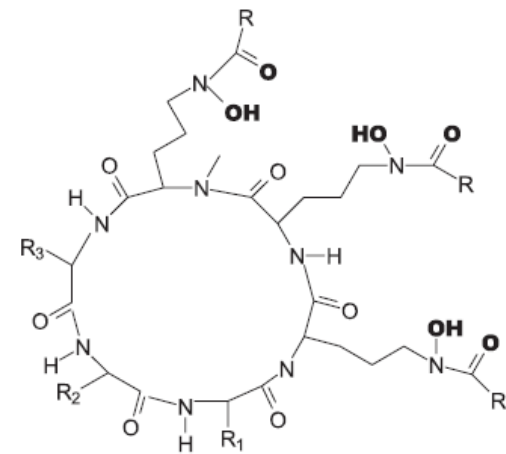
**Enteroquelina**



**Ácido rodotorúlico**



**Micobactina**

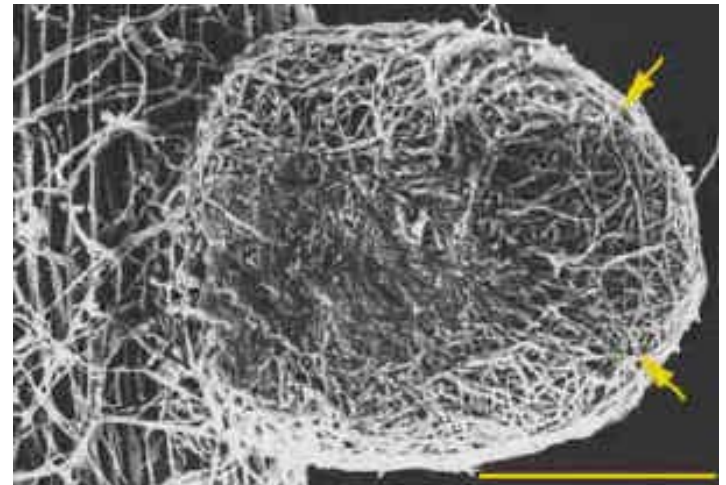


**Ferricromo**

# **Estimulación del crecimiento de la planta**

# Bacterias y hongos promotores del crecimiento

- Producción de hormonas de crecimiento: AIA, AIL, citoquininas, triptófano (Tien *et al.*, 1979)
- Interacción sinérgica con bacterias fijadoras de N (*Rhizobium sp*, *Azospirillum sp*, *Azotobacter sp*, etc)
- Protección de la raíz contra organismos patógenos.



## Efecto de la co-inoculación con *Rhizobium*, y tres especies de *Trichoderma* en el crecimiento y rendimiento de garbanzo a 75 dds

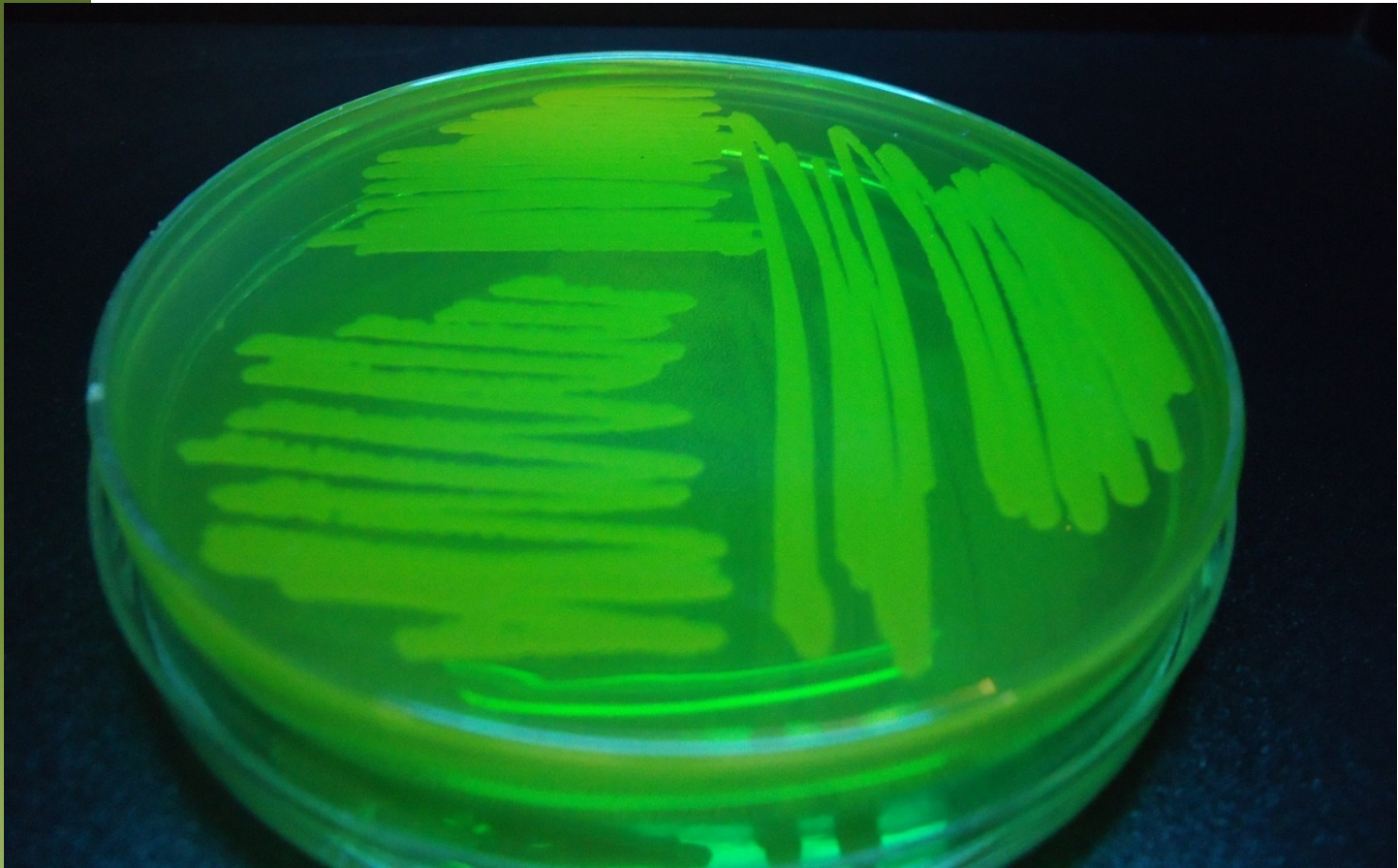
Tratamiento	Altura de planta (cm)	Biomasa (g planta <sup>-1</sup> )	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )
Testigo	38.0	21.7	12.0
<i>Rhizobium ciceri</i>	38.6	25.3	15.4
TH + RF + Rh	44.0	40.2	20.6
TV + RF + Rh	40.6	35.9	21.7
TVs + RF + Rh	41.3	37.1	17.7

TH: *Trichoderma harzianum*

TV: *Trichoderma viride*

TVs: *Trichoderma virens*

Rudresh *et al.*, (2005)



Gracias por su atención!!