



ORIGINAL ARTICLE /ARTÍCULO ORIGINAL

PROMOTING EFFECT OF PGPR BACTERIA ON POTATO CULTURE UNDER DIFFERENT SUBSTRATES AT GREENHOUSE LEVEL

EFFECTO PROMOTOR DE BACTERIAS PGPR SOBRE CULTIVO DE PAPA BAJO DIFERENTES SUSTRATOS A NIVEL DE INVERNADERO

Marlene Camacho¹ & María I. La Torre¹

¹Facultad de Ciencias Naturales y Matemática (FCNNM). Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV). El Agustino, Lima, Perú.

marlenced1@hotmail.com; marycano_11@yahoo.com

The Biologist (Lima), 13(1), jan-jun: 75-89.

ABSTRACT

The promoting effect of three genera of bacteria PGPR (growth promoting bacteria plants), *Actinomycetes*, *Bacillus* and *Pseudomonas* on crop growth of *Solanum tuberosum* potato on substrates with different proportions of sand, moss and farmland was evaluated. A trial-level emissions, with six replicates per treatment and a control treatment was performed. The trial lasted three months. Population growth and growth parameters of the plants were evaluated. An analysis of variance (ANOVA) and comparison of means with a Tukey test ($p < 0.05$). It was found that all the inoculated bacteria promoted crop growth in all substrates, but the actinomycetes group presented the best results. The substrate with higher organic matter showed the best results plants inoculated with *Pseudomonas*. We conclude that the inoculated bacteria promoted the growth of the potato crop in all substrates.

Keywords: Actinomycetes, *Bacillus*, PGPR, *Pseudomonas*, substrate.

RESUMEN

Se evaluó el efecto promotor de tres géneros de bacterias PGPR (bacterias promotoras de crecimiento de plantas), *Actinomicetos*, *Bacillus* y *Pseudomonas* sobre el crecimiento del cultivo de *Solanum tuberosum* “papa” en sustratos con diferentes proporciones de arena, musgo y tierra de cultivo. Se realizó un ensayo a nivel de invernadero, con seis repeticiones por cada tratamiento y un tratamiento control. El ensayo tuvo una duración de tres meses. Se evaluó el crecimiento poblacional y los parámetros de crecimiento de la planta. Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0,05$). Se encontró que todas las bacterias inoculadas promovieron el crecimiento del cultivo en todos los sustratos, sin embargo el grupo actinomicetos presentó los mejores resultados. En el sustrato con mayor materia orgánica los mejores resultados los presentaron las plantas inoculadas con *Pseudomonas*. Se concluye que las bacterias inoculadas promovieron el crecimiento del cultivo de papa en todos los sustratos.

Palabras clave: Actinomicetos, *Bacillus*, PGPR, *Pseudomonas*, sustrato.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la producción agrícola en las últimas décadas se ha conseguido reduciendo el contenido de materia orgánica en las tierras de cultivo y deteriorando la estructura del suelo lo cual lo hace más propenso a procesos de compactación y erosión (Karlen *et al.* 2008). La productividad actual sólo se mantiene por la aplicación de abonos químicos en cantidades cada vez mayores; es por eso que la adopción y el uso eficaz de biofertilizantes en la agricultura son considerados una alternativa clave para asegurar la sustentabilidad y productividad de este sector tan importante para la economía y la sociedad (Calvo 2008).

Un cultivo importante de nuestro país, afectado también por este problema, es la papa *Solanum tuberosum* (Linnaeus, 1753). Actualmente la papa se encuentra entre los cuatro alimentos más importantes a nivel mundial después del arroz, trigo y maíz. Este crecimiento positivo de la producción de papa se debe básicamente a su capacidad de adaptarse a las condiciones de clima de diferentes regiones del planeta y a las mejoras tecnológicas en los sistemas de producción y comercialización (Ministerio de Agricultura 2006).

Una alternativa para aumentar la producción de papa a la vez que se protege al productor, los consumidores y el medio ambiente, es el aprovechamiento de bacterias con capacidades PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) o Rizobacterias Promotoras del Crecimiento de Plantas, conocidas e identificadas por incrementar el porcentaje de germinación de semillas, promover el crecimiento y aumentar el rendimiento de los cultivos. Estas bacterias son de vida libre y se encuentran naturalmente colonizando la periferia de las raíces, nutriéndose de los exudados y liberando sustancias como fitohormonas, enzimas y quelantes de hierro

(Chiarini *et al.* 1998).

Estos metabolitos liberados repercuten en la fisiología de la planta, favoreciendo su crecimiento, induciendo la resistencia a patógenos o incrementando la absorción de nutrientes y agua. Dentro del grupo de las PGPR se incluye varios géneros bacterianos. Se destacan entre ellos los géneros *Arthobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter* y *Serratia* (Klopper *et al.* 1989) *Azospirillum* (Okon & Labandera 1994), *Pseudomonas* (Cook & Baker 1993, Lato ur & Lemanceau 1997, Sorensen *et al.* 2001), *Azotobacter* (Khalid & Arshad 2004), y Actinomicetos (Maier *et al.* 2004).

La colonización de la rizósfera y el rizoplasma por rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) es esencial para la respuesta de crecimiento de la planta consistente (Kleopper *et al.* 1980). Sin embargo, la humedad del suelo, el tipo de suelo, las especies vegetales, el cultivo, los exudados de las raíces y la viabilidad bacteriana pueden influir en la colonización de la rizósfera y el rizoplasma (Howie & Echandi 1983).

Las comunidades microbianas en el suelo son resultados de muchos factores ambientales como el clima y la vegetación; y por las características físicas y químicas del suelo, como son la textura, los nutrientes, el contenido de materia orgánica y el pH (Marchsner *et al.* 2004).

El efecto del tipo de suelo que tiene diferentes nutrientes en la eficiencia de inóculos bacterianos puede ser importante para el éxito de la inoculación de raíz y crecimiento de las plantas. El tipo de sustrato influye en las comunidades de microorganismos porque de él depende la aireación y disponibilidad de agua; en función del tipo y tamaño de partículas presentes en el suelo, la capacidad de absorción de moléculas polares e iónicas varía considerablemente (Calvo 2008).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la inoculación de tres géneros de bacterias PGPR sobre el crecimiento del cultivo de *S. tuberosum* “papa” en sustratos de diferentes proporciones de arena, musgo y tierra de cultivo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material Vegetal

Tubérculos de papa *S. tuberosum* de la

variedad “Serranita” obtenidas del Complejo de Biodiversidad del Centro Internacional de la Papa (CIP), Lima, Perú.

Bacterias

Las cepas del grupo Actinomicetos y de los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* fueron aisladas en el laboratorio de Manejo Integrado del Centro Internacional de la papa. Las características de estas cepas y su actividad PGPR en laboratorio se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de Cepas y actividad PGPR en el laboratorio de Manejo Integrado del Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú.

| Código CIP | Género | Procedencia | pH suelo | zona de aislamiento | Actividad PGPR en Laboratorio | | |
|------------|--------------------|--------------|----------|---------------------|-------------------------------|-----|-------------|
| | | | | | SP | AIA | Sideróforos |
| A1-19/08 | Actinomicetos | Huancayo | 7,21 | rizósfera | sí | sí | no |
| A2-19/08 | <i>Bacillus</i> | Cajamarca | 5,48 | rizoplano | sí | sí | sí |
| A3-19/08 | <i>Bacillus</i> | Huancavelica | 4,06 | rizósfera | sí | sí | no |
| B1-35/06 | <i>Bacillus</i> | Huancavelica | 4,8 | rizósfera | si | sí | no |
| P1-20/08 | <i>Pseudomonas</i> | Huancavelica | 7.46 | suelo | sí | sí | no |

AIA: producción de ácido indolacético SP: Solubilización de fosfatos.

Preparación de inóculos (Figura 1)

Las cepas seleccionadas fueron activadas en placas petri con agar tripticasa de soya (TSA) mediante el método de estriado, incubándolas en una estufa por 24 h para *Pseudomonas* y *Bacillus* y 72 h para Actinomicetos.

Las cepas ya activadas se sembraron en sus respectivos medios de cultivo, caldo de soya tripticasa (TSB) para *Pseudomonas* y *Bacillus* y caldo nutritivo para Actinomicetos y se dejaron en un agitador durante 24 h para *Pseudomonas* y *Bacillus* y durante 48 h para Actinomicetos alcanzando una concentración aproximada de 10^8 ufc/ml (Calvo 2008).

Preparación de sustratos

Se prepararon ocho sustratos con distintas proporciones de arena, musgo y tierra de cultivo, los cuales fueron posteriormente esterilizados por calor a 80°C por 4 h (Tabla 2).

2 Kg de cada uno de estos sustratos fueron enviados al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, aguas y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú para conocer sus características fisicoquímicas (Tabla 3).

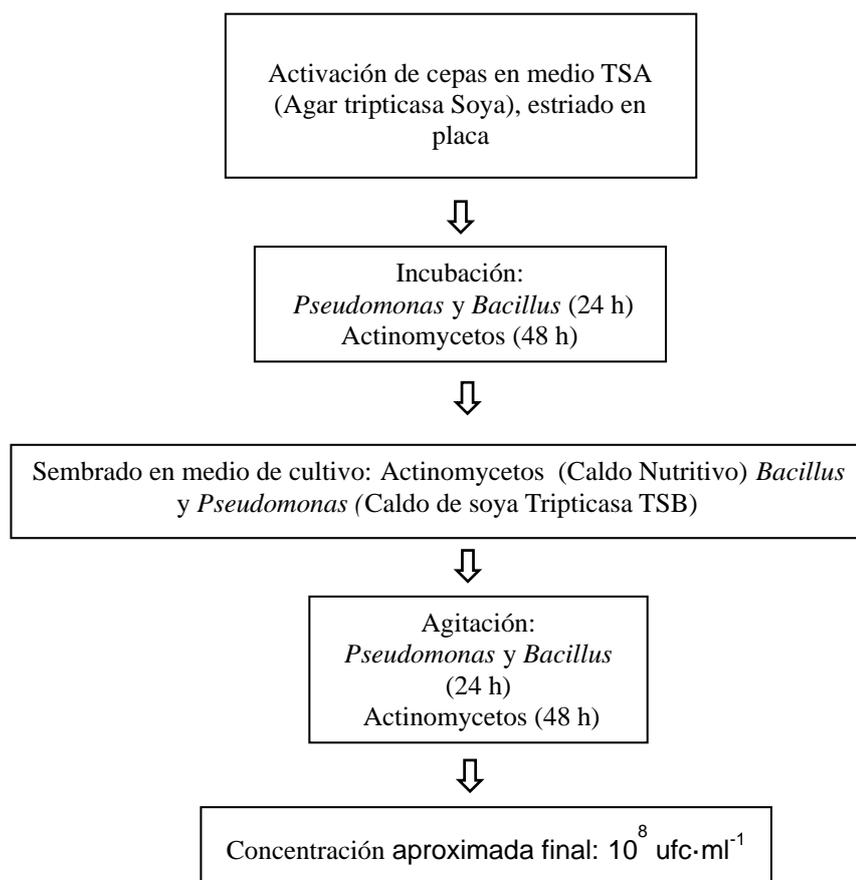


Figura 1. Diagrama de preparación de inóculos.

Tabla 2. Composición de sustratos empleados en el ensayo.

| Sustratos | Abreviatura | Composición |
|------------|-------------|------------------------------|
| Sustrato 1 | S1 | Arena 100% |
| Sustrato 2 | S2 | Arena-Musgo:30-20% |
| Sustrato 3 | S3 | Arena-Musgo:60-40% |
| Sustrato 4 | S4 | Arena-Musgo:40-60% |
| Sustrato 5 | S5 | Musgo-Tierra:10-90% |
| Sustrato 6 | S6 | Musgo-Tierra:25-75% |
| Sustrato 7 | S7 | Musgo-Tierra:50-50% |
| Sustrato 8 | S8 | Arena-Musgo-Tierra:20-40-40% |

Tabla 3. Características fisicoquímicas de sustratos empleados en el ensayo.

| Textura de Suelo | pH | C.E. | M.O. | % | | | | | | |
|------------------------------------|------|------|-------|------|--------------------------------|-------------------|------|------|-------|------|
| | | | | %N | %P ₂ O ₅ | %K ₂ O | %CaO | %MgO | %Hd | %Na |
| S1 (Arena 100%) | 7,57 | 1,74 | 1,19 | 0,02 | 0,10 | 0,13 | 1,55 | 1,09 | 2,01 | 0,10 |
| S2 (Arena-Musgo:30-20%) | 6,92 | 1,28 | 1,77 | 0,04 | 0,11 | 0,11 | 1,32 | 0,98 | 1,08 | 0,09 |
| S3 (Arena-Musgo:60-40%) | 6,32 | 1,52 | 3,62 | 0,07 | 0,13 | 0,12 | 0,41 | 1,02 | 1,52 | 0,10 |
| S4 (Arena-Musgo:40-60%) | 5,66 | 1,29 | 6,14 | 0,09 | 0,13 | 0,13 | 1,46 | 1,04 | 2,06 | 0,09 |
| S5 (Musgo-Tierra:10-90%) | 6,91 | 9,21 | 3,27 | 0,11 | 0,32 | 0,32 | 2,17 | 1,47 | 2,60 | 0,08 |
| S6 (Musgo-Tierra:25-75%) | 6,84 | 9,08 | 3,98 | 0,13 | 0,28 | 0,31 | 1,98 | 1,30 | 1,92 | 0,08 |
| S7 (Musgo-Tierra:50-50%) | 6,44 | 6,33 | 5,95 | 0,15 | 0,24 | 0,32 | 1,92 | 1,27 | 2,60 | 0,08 |
| S8 (Arena-Musgo-Tierra: 20-40-40%) | 5,15 | 2,60 | 20,42 | 0,57 | 0,15 | 0,14 | 1,97 | 0,80 | 36,45 | 0,10 |

Instalación del ensayo en Invernadero

Se utilizaron para el ensayo tubérculos de papa de 15g de peso promedio, las cuales fueron embebidas en 100 ml del inoculo correspondiente durante 30 min con el fin de que las bacterias queden adheridas a ellas (Figura 2).

El sembrado de cada tubérculo se realizó en macetas de ocho pulgadas, llenadas con el respectivo sustrato hasta alcanzar los $\frac{3}{4}$ de su

volumen, a cinco cm de profundidad, agregándole además 5 ml del inoculo correspondiente. Se denominó a cada maceta tratamiento, rotulándose con una estaca de plástico. En total se inocularon 40 tratamientos (cinco bacterias en ocho sustratos) con seis repeticiones cada uno, teniendo un tratamiento de control sin bacteria por cada tipo de sustrato (Calvo 2008) (Tabla 4).

**Figura 2.** Inoculación de bacterias en tubérculos de papa.

Tabla 4. Distribución de los tratamientos en el invernadero.

| Sustratos | A1-19/08 | A3-19/03 | A2-19/08 | B1-35/06 | P1-20/08 | Controles |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| S1 | T1(6) | T2(6) | T3(6) | T4(6) | T5(6) | Control 1(6) |
| S2 | T6(6) | T7(6) | T8(6) | T9(6) | T10(6) | Control 2(6) |
| S3 | T11(6) | T12(6) | T13(6) | T14(6) | T15(6) | Control 3(6) |
| S4 | T16(6) | T17(6) | T18(6) | T19(6) | T20(6) | Control 4(6) |
| S5 | T21(6) | T22(6) | T23(6) | T24(6) | T25(6) | Control 5(6) |
| S6 | T26(6) | T27(6) | T28(6) | T29(6) | T30(6) | Control 6(6) |
| S7 | T31(6) | T32(6) | T33(6) | T34(6) | T35(6) | Control 7(6) |
| S8 | T36(6) | T37(6) | T38(6) | T39(6) | T40(6) | Control 8(6) |

Cuidados de plantas en el invernadero

Después del mes de instalación, se completó el volumen total de la maceta con el respectivo sustrato (Aporque). Cada tratamiento fue fertilizado con NPK (20:20:20) ($1,5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), a la semana de la inoculación, siendo esta la única

fertilización durante todo el ensayo. Para controlar una posible población de moscas blancas se colocaron trampas amarillas colgantes en cada mesa donde se ubicaron las macetas.

**Figura 3.** Plantas en invernadero a los tres meses de sembradas.

Evaluación de la población microbiana

Se realizó la evaluación de la población microbiana a las 4, 8 y 12 semanas, tomándose aleatoriamente una maceta de cada tratamiento, incluido el control (Figura 3). Para ello se tomó una muestra de 1 gr. del suelo de la rizósfera diluyéndola en un tubo de ensayo conteniendo 9 ml de agua peptona al 1% (dilución 10^{-1}) diluyéndolo sucesivamente hasta la dilución 10^{-7} . Las placas fueron incubadas a 30° C por 48 h para *Pseudomonas* y *Bacillus*, y 5 a 7 días para Actinomycetos. Trascurrido el tiempo se realizó el recuento de colonias, a la semanas 4, 8 y 12, rigiéndonos por su aspecto morfológico, expresando los resultados en UFC·/g⁻¹.

Parámetros de crecimiento vegetal evaluados

Se utilizó un Diseño Estadístico Completamente al Azar (DCA). Se tomaron en cuenta 22 parámetros, considerados importantes para una evaluación de crecimiento. En el aire: altura de la planta (ALT), número de tallos (NTA), peso fresco de tallos (PFTA), peso seco de tallos (PSTA), porcentaje de materia seca de tallos (%MSTA), número de hojas (NH), peso fresco de hojas (PFH), peso seco de hojas (PSH), porcentaje de materia seca de hojas (%MSH); en el suelo: número de tubérculos (NT), peso fresco de tubérculos (PFT), peso seco de tubérculos (PST), porcentaje de materia seca de tubérculos (%MST), peso fresco de raíces (PFR), peso seco de raíces (PSR), porcentaje de materia seca de raíces (%MSR); con estos datos se calculó el peso fresco de la planta (PFP), peso seco de la planta (PSP) y porcentaje de materia seca de la planta (%MSP). Asimismo, se tomó en cuenta el área foliar total (AFT), el área específica de las hojas (SLA), e índice de cosecha (IC).

Para calcular el área foliar total de la planta (AFT) se tomaron tres foliolos representativos de cada planta inoculada de la partes inferior, media y superior de la respectiva planta y luego con ayuda de un medidor de área foliar (Leaf

area meter CI202), se calculó la superficie de los tres foliolos (cm²); posteriormente estos foliolos fueron secados, pesándolos en fresco y seco (g). Para el cálculo del área específica de la hoja (SLA) se dividió el área foliar total de la planta (AFT) entre el peso seco de los tres foliolos (cm²·g⁻¹). El índice de cosecha (IC) está dado por el peso seco del tubérculo (PST) entre el peso seco de toda la planta (PSP), el cual indica qué porcentaje de la planta es productivo (tubérculo).

Análisis de resultados

El análisis de ambos experimentos se realizó con el programa estadístico R. Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias de los tratamientos con la prueba de Tukey (p<0,05) para poder determinar el efecto de cada cepa sobre la planta con respecto al control negativo.

El análisis estadístico se realizó para cada parámetro evaluado, sin embargo se escogió los ocho más representativos para su análisis: número de tubérculos (NT), peso seco de tubérculos (PST), porcentaje de materia seca de tubérculos (%MST), peso seco de la planta (PSP), porcentaje de materia seca de toda la planta (%MSP), área foliar total (AFT), área específica de la hoja (SLA) e índice de cosecha (IC).

RESULTADOS

En el recuento poblacional de bacterias en el ensayo se observó que las bacterias tuvieron una fase de crecimiento desde la cuarta semana, alcanzando su fase estacionaria aproximadamente entre la sexta y octava semana. Desde la octava semana se observa un decrecimiento de la población. En la semana 12 se observa que la población ha decrecido; observándose así en todos los sustratos (Figura 4).

Respecto al ensayo en invernadero, en el sustrato 1 (100% arena) se encontró diferencias significativas con respecto al control en los parámetros PST, %MST, PSP, %MSP, SLA e IC, presentando todos los tratamientos resultados superiores al control (Tabla 5). El tratamiento inoculado con la cepa A1-19/08 del grupo actinomicetos presentó los mejores resultados en cuanto a peso seco de tubérculos (PST), siendo 172% superior al control; porcentaje de materia seca de tubérculo (%MST) 18% superior al control; peso seco de la planta (PSP) 100% superior al control; e índice de cosecha (IC) 73% mayor al control. El número de tubérculos (NT) no presentó diferencias significativas, pero se observa que todos los tratamientos presentaron mayor número de tubérculos que el control (Tabla 5).

En el sustrato 2 (80% arena, 20% musgo) se encontró diferencias significativas en los parámetros PST, y PSP, AFT, SLA e IC, mostrando también los mejores resultados el tratamiento inoculado con la cepa A1-19/08 del grupo Actinomicetos; siendo el PST, 83% superior al control y el PSP, 46% superior al control. En cuanto al AFT y SLA los tratamientos fueron en su mayoría inferiores al control. El NT y el %MST no presentaron diferencia significativa; sin embargo todos los tratamientos inoculados presentaron mayor número y porcentaje respecto al control (Tabla 5).

En el sustrato 3 (Arena-Musgo:60-40%) se encontró diferencias significativas en los parámetros NT, PST, PSP y AFT. En cuanto al NT el tratamiento inoculado con la cepa A3-19/08 del género *Bacillus* presentó los mejores resultados siendo 113% superior al control; en cuanto al PSP los tratamientos inoculados con las cepas A1-19/08 (Actinomicetos) y A3-19/08 (*Bacillus*) presentaron los mejores resultados, siendo 36% superiores al control. Respecto al PST todos los tratamientos inoculados presentaron mayor peso en

comparación al control; en cuanto al %MST el tratamiento inoculado con la cepa P1-20/08 del género *Pseudomonas* presentó los mejores resultados respecto al control (Tabla 5).

En el sustrato 4 (Arena-Musgo:40-60%) solo se encontró diferencias significativas en el AFT. Sin embargo, en los parámetros NT y PST se observa que los tratamientos inoculados tuvieron resultados mayores al control (Tabla 5).

En el sustrato 5 (Musgo-Tierra:10-90%) solo se encontró diferencias significativas en los parámetros PST e IC, siendo todos los tratamientos inoculados superiores al control en ambos parámetros. Los tratamientos inoculados con las cepas B1-35/06 y A2-19/08 del género *Bacillus* y el tratamiento inoculado con A1-19/08 del grupo Actinomicetos presentaron los valores más elevados en cuanto a PST. El NT no fue significativo, pero se observa que todos los tratamientos presentaron mayor número de tubérculos respecto al control; siendo el tratamiento inoculado con la cepa A1-19/08 del grupo Actinomicetos el que produjo mayor número, siendo éste 152% superior al control (Tabla 5).

En el sustrato 6 (Musgo-Tierra:25-75%) se encontró diferencias significativas en los parámetros PST, %MST, PSP, %MSP e IC. En cuanto al PST y %MST e IC, todos los tratamientos fueron superiores al control; con respecto al PSP la cepa A1-19/08 presentó los mejores resultados respecto al control (Tabla 5).

En el sustrato 7 (Musgo-Tierra: 50-50%) se encontraron diferencias significativas en los parámetros PST, %MST y PSP, siendo todos los tratamientos inoculados superiores al control en los tres parámetros. El tratamiento inoculado con la cepa A3-19/08 del grupo Actinomicetos presentó los mejores resultados en cuanto a PST, siendo 80% superior al control y en cuanto a %MST, 23% superior al

control (Tabla 5).

En el sustrato 8 (Arena-Musgo-Tierra: 20-40-40%) únicamente se encontró diferencias significativas en el parámetro PST siendo

todos los tratamientos inoculados superiores al control. El tratamiento inoculado con la cepa P1-20/08 del género *Pseudomonas* presentó los mejores resultados, siendo 56% superior al control (Tabla 5).

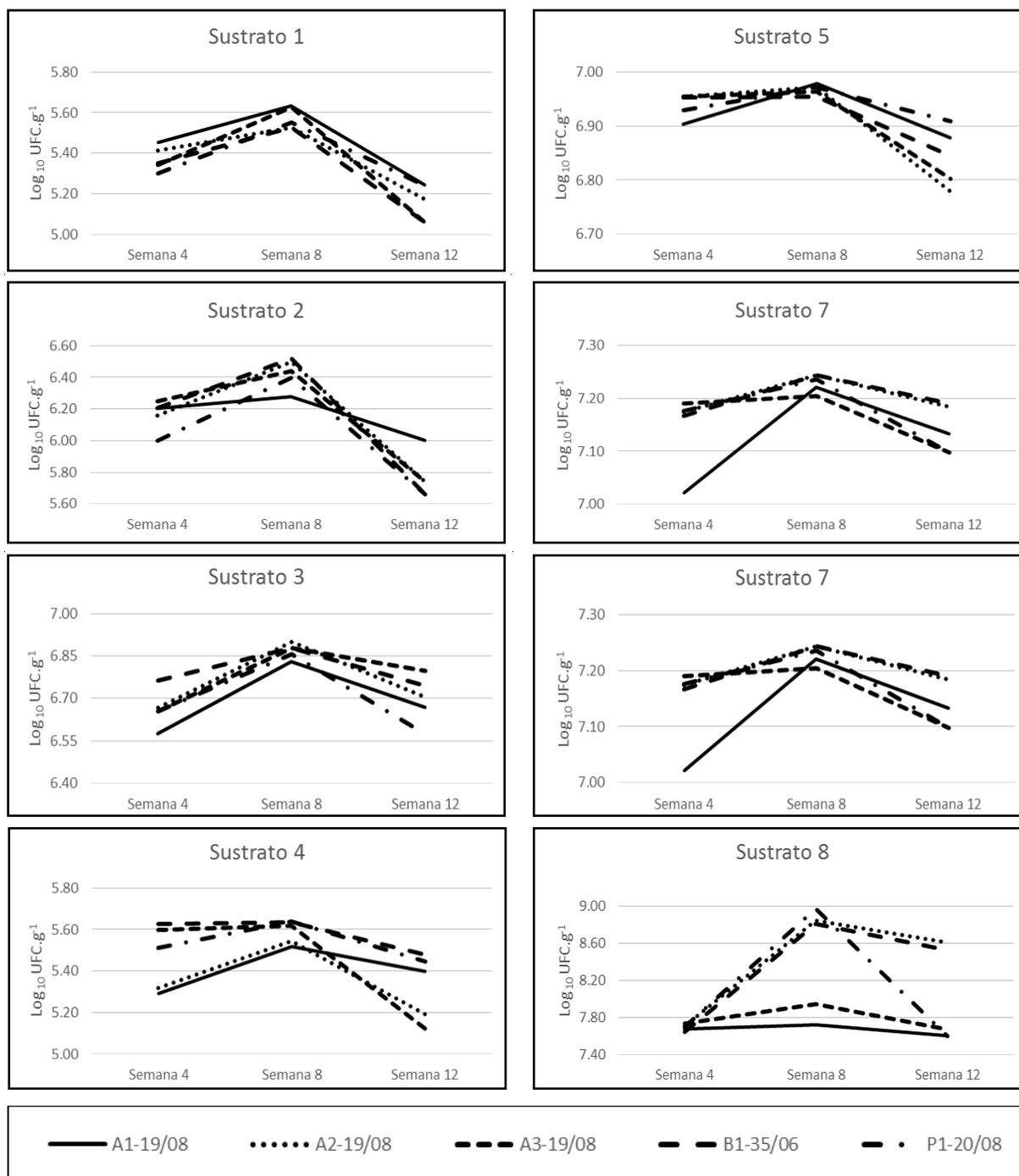


Figura 4. Dinámica poblacional de bacterias inoculadas en los ocho sustratos.

Tabla 5. Resultados de la evaluación de los principales parámetros de crecimiento sobre el cultivo de papa.

| Sustrato | Cepa | Parámetros ¹ | | | | | | | |
|----------|----------|-------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|------------------------|------------------|-----------------|
| | | NT | PST (g) | %MST | PSP (g) | %MSP | AFT (cm ²) | SLA | I.C |
| 1 | A1-19/08 | 5,50 | 9,81a | 19,76a | 13,22a | 15,69a | 360,33 | 557,637a | 0,7401a |
| | A2-19/08 | 5,00 | 8,22ab | 20,34a | 11,09ab | 17,15a | 226,14 | 492,037ab | 0,7413a |
| | A3-19/08 | 6,50 | 6,11bc | 18,60ab | 9,30bc | 15,56a | 327,32 | 572,481a | 0,6431ab |
| | B1-35/06 | 5,75 | 8,76ab | 20,21a | 12,24ab | 17,08a | 319,00 | 451,746b | 0,7149a |
| | P1-20/08 | 4,75 | 7,06ab | 19,76a | 9,76b | 16,34a | 367,88 | 498,219ab | 0,7196a |
| | Control | 2,50 | 3,60c | 16,74b | 6,57c | 15,25a | 364,10 | 541,684a | 0,5430b |
| 2 | A1-19/08 | 7,75 | 11,42a | 20,05 | 14,60a | 17,78 | 231,10ab | 572,42a | 0,7823 |
| | A2-19/08 | 8,00 | 8,41b | 18,86 | 11,50b | 15,72 | 216,13ab | 505,43ab | 0,7308 |
| | A3-19/08 | 6,00 | 10,02ab | 20,15 | 13,21ab | 16,90 | 315,52ab | 526,16ab | 0,7582 |
| | B1-35/06 | 4,50 | 11,42a | 19,09 | 11,89b | 16,29 | 327,91a | 502,01ab | 0,7455 |
| | P1-20/08 | 6,00 | 9,36b | 20,11 | 12,26ab | 16,57 | 154,71b | 415,05b | 0,7642 |
| | Control | 3,75 | 6,23c | 18,71 | 8,68c | 16,56 | 364,94a | 553,24a | 0,7280 |
| 3 | A1-19/08 | 4,75ab | 10,13a | 18,45 | 14,21a | 16,45 | 442,77a | 563,99 | 0,7176 |
| | A2-19/08 | 4,75ab | 11,43a | 18,60 | 13,50ab | 15,44 | 141,91b | 494,94 | 0,8673 |
| | A3-19/08 | 8,00a | 10,42a | 19,33 | 14,11a | 14,98 | 367,78a | 500,86 | 0,7388 |
| | B1-35/06 | 7,75ab | 9,79a | 18,51 | 12,69ab | 15,92 | 410,55a | 566,02 | 0,7690 |
| | P1-20/08 | 5,75ab | 10,02a | 23,07 | 13,24ab | 17,28 | 308,15ab | 465,87 | 0,7570 |
| | Control | 3,75b | 6,34b | 18,42 | 10,24b | 17,57 | 434,47a | 576,00 | 0,6440 |
| 4 | A1-19/08 | 11,00 | 11,55 | 19,450 | 15,49a | 15,13 | 427,59ab | 543,18 | 0,7857 |
| | A2-19/08 | 7,00 | 10,27 | 18,820 | 13,07a | 15,98 | 381,76ab | 589,76 | 0,7281 |
| | A3-19/08 | 5,75 | 8,84 | 18,482 | 12,04a | 14,56 | 529,39a | 594,26 | 0,7165 |
| | B1-35/06 | 7,50 | 11,38 | 18,508 | 14,95a | 16,39 | 290,62b | 553,31 | 0,7604 |
| | P1-20/08 | 9,25 | 11,06 | 20,139 | 13,70a | 16,38 | 412,33ab | 553,84 | 0,8063 |
| | Control | 4,75 | 6,85 | 18,086 | 13,88a | 22,17 | 475,32ab | 595,18 | 0,4967 |

Continua Tabla 5

Continua Tabla 5

| Sustrato | Cepa | Parámetros ¹ | | | | | | | |
|----------|----------|-------------------------|----------------|----------------|-----------------|---------------|------------------------|--------|----------------|
| | | NT | PST (g) | %MST | PSP (g) | %MSP | AFT (cm ²) | SLA | I.C |
| 5 | A1-19/08 | 13,25 | 10,96a | 21,46a | 16.1125 | 16,79 | 423,21 | 572,75 | 0,6567a |
| | A2-19/08 | 9,25 | 10,04ab | 21,05a | 14.7175 | 16,1 | 411,63 | 551,33 | 0,6879a |
| | A3-19/08 | 11,50 | 10,41a | 21,37a | 15.64 | 15,81 | 417,10 | 572,48 | 0,6600a |
| | B1-35/06 | 10,25 | 12,00a | 21,01a | 17.2775 | 16,83 | 339,77 | 538,73 | 0,6910a |
| | P1-20/08 | 8,25 | 7,41ab | 16,86a | 11.95 | 14,2 | 397,58 | 533,41 | 0,6107a |
| | Control | 5,25 | 5,18b | 16,50a | 13.715 | 19,81 | 416,46 | 554,84 | 0,3818b |
| 6 | A1-19/08 | 8,00 | 13,78a | 19,88a | 20,82a | 16,62b | 437,71 | 543,87 | 0,6607a |
| | A2-19/08 | 11,00 | 11,81a | 21,68a | 16,60bc | 17,31b | 439,72 | 590,30 | 0,7116a |
| | A3-19/08 | 14,25 | 13,78a | 20,01a | 19,32ab | 17,24b | 526,34 | 599,51 | 0,7123a |
| | B1-35/06 | 12,25 | 11,72a | 19,45ab | 16,92abc | 16,42b | 432,30 | 544,60 | 0,6919a |
| | P1-20/08 | 11,75 | 10,59a | 21,50a | 15,01c | 16,56b | 378,90 | 526,40 | 0,7047a |
| | Control | 6,50 | 6,74b | 15,92b | 19,54ab | 22,85a | 319,87 | 502,95 | 0,3453b |
| 7 | A1-19/08 | 8,75 | 17,29ab | 20,44ab | 22,83a | 18,62 | 372,05 | 533,72 | 0,7554 |
| | A2-19/08 | 13,50 | 16,01ab | 21,08ab | 20,94a | 17,24 | 442,97 | 550,35 | 0,7636 |
| | A3-19/08 | 10,75 | 17,40a | 21,34a | 21,96a | 17,03 | 446,67 | 560,93 | 0,7923 |
| | B1-35/06 | 10,75 | 16,62ab | 20,54ab | 21,78a | 17,48 | 394,51 | 520,89 | 0,7628 |
| | P1-20/08 | 10,25 | 16,34ab | 19,68ab | 21,33a | 17,10 | 380,70 | 546,02 | 0,7655 |
| | Control | 6,25 | 9,65b | 17,34b | 15,15b | 16,47 | 509,05 | 561,49 | 0,6421 |
| 8 | A1-19/08 | 8,00 | 15,02ab | 23,26 | 20,65 | 19,72 | 440,94 | 599,69 | 0,7259 |
| | A2-19/08 | 9,00 | 17,22ab | 24,38 | 21,59 | 19,62 | 467,41 | 584,22 | 0,7978 |
| | A3-19/08 | 8,25 | 14,88ab | 20,94 | 22,06 | 20,23 | 396,10 | 581,37 | 0,6862 |
| | B1-35/06 | 9,25 | 15,64ab | 23,16 | 21,61 | 20,06 | 521,86 | 558,10 | 0,7214 |
| | P1-20/08 | 9,50 | 18,88a | 23,65 | 24,12 | 19,61 | 527,60 | 588,02 | 0,7807 |
| | Control | 6,75 | 12,05b | 19,69 | 18,77 | 19,73 | 451,79 | 575,23 | 0,6398 |

Medias con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales $P=0,05$ con la Prueba de Tukey.

¹Promedios de seis repeticiones para cada parámetro. NT, nro. de tubérculos; PST, peso seco de tubérculos ; %MST, % materia seca de tubérculo; PSP, peso seco de la planta; %MSP, %materia seca de la planta; AFT, área foliar total; SLA, peso específico de la hoja, IC, índice de cosecha.

DISCUSIÓN

La dinámica poblacional de las bacterias, como afirmaron Vandenhove *et al.* (1993), cuando las bacterias son inoculadas en el suelo; tienen en la primera semana una fase de crecimiento exponencial; a partir de ahí, el número de colonias por g de suelo se reduce, hasta alcanzar la fase estacionaria, con una población de 33 a 50 unidades formadoras de colonias por g de suelo seco. Esta fase estacionaria se inicia en la quinta semana y se

prolonga mientras no existan condiciones adversas que mermen las poblaciones. En este estudio se observa de forma similar la fase de crecimiento a la cuarta semana y la fase estacionaria aproximadamente a la sexta semana. A la octava semana de evaluación decrece el número de bacterias (Figura 1); por lo tanto se podría afirmar que sí hubo una colonización de la rizósfera por las bacterias inoculadas, variando el número de UFC (unidades formadoras de colonia) en cada sustrato.

En cuanto al ensayo de invernadero, de los resultados obtenidos se observa que en todos los sustratos, los tratamientos inoculados tuvieron un mejor resultado en todos los parámetros de crecimiento en comparación con el control, sin embargo algunos de ellos no tuvieron diferencia significativa. Los parámetros PST y PSP fueron los que tuvieron diferencias significativas en la mayoría de sustratos. El sustrato 4 compuesto por 40% arena y 60% musgo no presentó diferencias significativas en ningún parámetro de crecimiento; sin embargo se puede observar en la figura 2 que en este sustrato el número de colonias de bacterias PGPR fue mucho más bajo que en los otros sustratos (10^5 UFC) y tal vez no hubo una buena colonización de la raíz; y la capacidad de las bacterias para afectar el crecimiento de las plantas no únicamente depende de su abundancia, sino de su capacidad para proliferar a través de la raíz (Loper *et al.* 1985). Por otra parte, este sustrato, contenía más materia orgánica que los sustratos 1, 2, 3, 5, 6 y 7 (tabla 2) y eso podría haber ayudado al crecimiento de la planta que si bien no fue significativo en los parámetros de crecimiento evaluados con respecto al control reportaron mejores resultados que éste.

Los actinomicetos en el suelo se encuentran en casi todos los tipos y bajo condiciones extremas disminuyen levemente la concentración de la población. El tamaño de la comunidad depende del tipo del suelo, particularmente de algunas de las características físicas, del contenido de materia orgánica y del pH del medio ambiente (Tate 2000). En este trabajo el tratamiento A1-19/08 del grupo actinomicetos tuvo un efecto promotor en los sustratos 1, 2 y 3, que son en su mayor porcentaje arenosos, observándose esto en los resultados de los parámetros peso seco y materia seca del tubérculo y de la planta. El peso seco representa la cantidad de azúcares, proteínas y almidón que posee el tubérculo y/o la planta. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Goudjal *et al.* (2013), quienes

aislaron actinomicetos del Sahara de un suelo arenoso y seco y probaron sus efecto promotor de crecimiento en plántulas de tomates en un sustrato de características fisicoquímicas similares a los sustratos 1, 2 y 3 de este estudio, es decir sustratos arenosos y de pocos nutrientes; observándose que las plantas inoculadas con *Streptomyces* aumentaron el peso fresco y seco de la raíz y las semillas e incrementaron el número de brotes.

En los sustratos 5, 6 y 7, hubo diferencia significativa principalmente en los parámetros PST y %MST y el tratamiento A1-19/08 del grupo Actinomicetos tuvo los mejores resultados. Cabe resaltar que estos sustratos presentaban una alta CE (Tabla 3), y son suelos ligeramente salinos y la salinidad del suelo es uno de los factores más graves que limitan la nodulación, el rendimiento y la respuesta fisiológica en los cultivos, sin embargo aún no se ha establecido el posible papel de las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) en la restricción de nutrientes minerales y así aliviar el estrés de salinidad del suelo durante el crecimiento vegetal. Han & Lee (2005) estudiaron los efectos beneficiosos de la inoculación con cepas de PGPR en plantas salinoestresadas en condiciones de invernadero y sus resultados sugieren que la inoculación de estas plantas con cepas PGPR podría aliviar el estrés de salinidad. Estos sustratos también presentaron un mayor porcentaje de P_2O_5 que los sustratos arenosos; las bacterias PGPR por su capacidad de solubilizar fosfatos podrían haber ayudado a la asimilación de fósforo a la planta.

En el caso de los tratamientos inoculados con cepas de *Bacillus* también promovieron el crecimiento del cultivo en todos los sustratos. Las tres cepas de este género tuvieron un similar efecto promotor en todos los sustratos, por lo que no resalta una que tenga mayor eficacia. En los suelos compuestos en mayores proporciones por arena, el PST fue superior respecto al control significativamente. Las

bacterias de este género están presentes y pueden adaptarse a varios tipos de sustratos, debido a que tienen más posibilidad de sobrevivir gracias a su capacidad de formar esporas (Claus & Berkeley 1986). Egamberdiyeva (2007) reportó el efecto promotor del crecimiento al inocular cepas de *Bacillus subtilis* (Ehrenberg, 1835) sobre frejol en un suelo franco arenoso con muy poca materia orgánica, observando un aumento en la materia seca con respecto al control. Asimismo este género posee además una alta habilidad fisiológica soportando altas salinidades y distintos pH; como se observa en los sustratos 5, 6 y 7 que como ya se dijo, presentan alta CE y por lo tanto son salinos. En sustrato 8 que contenía abundante materia orgánica se observa diferencia significativa en el PST, similares resultados registró Cakmakci *et al.* (2001) al inocular *Bacillus polymixa* (Prazmowski, 1880) en suelo con abundante materia orgánica sobre remolacha, incrementando el peso seco de este cultivo.

En cuanto a los tratamientos inoculados con *Pseudomonas* también se observó un efecto promotor el crecimiento del cultivo, observándose en los parámetros de PST, MST y % MST en la mayoría de los sustratos. Resultados similares obtuvieron Howie & Ehandi (1983) que inocularon *Pseudomonas fluorescens* (Migula, 1895) y *P. putida* (Treviban, 1889) en semillas de papa en suelo franco arenoso, arenoso arcilloso y arenosos no estéril, observando que los inóculos promovieron el crecimiento del peso seco de las raíces en 22% y el de los tubérculos en 80%, teniendo mayor rendimiento en el suelos arenosos arcilloso.

Cakmakcy *et al.* (2001) probaron el efecto promotor de *P. putida* sobre remolacha azucarera en dos tipos de suelos uno con 15,9% de materia orgánica y el otro con 2,4% de materia orgánica, observándose incremento en peso fresco de hojas y raíces en ambos sustratos respecto al control, pero siendo

mucho mayor el efecto en el sustrato con mayor MO. En este estudio se obtuvieron resultados similares, debido a que el mayor efecto promotor del tratamiento inoculado con *Pseudomonas* se observa en el sustrato 8, el cual contenía mayor porcentaje de la materia orgánica, observándose un incremento en el PST superior al control y a los otros tratamientos.

En general, el número, la diversidad, y la actividad de los organismos del suelo están influenciadas por las propiedades de materia orgánica del suelo (Kobabe *et al.* 2004). El contenido de materia orgánica puede contribuir al desarrollo de diferentes estructuras en la comunidad microbiana en los suelos (Marschner *et al.* 2004). En el sustrato 8, aunque solo presentó diferencias significativas para PST, fue el que reportó los mayores valores de los parámetros que en los otros sustratos.

Se observaron mayor cantidad de parámetros que tuvieron diferencia significativa en los sustratos más pobres, es decir con más contenido de arena y muy poca o nada de materia orgánica; esto sugiere que la inoculación bacteriana podría tener mucho mejor efecto estimulante sobre crecimiento de las plantas en suelos deficientes en nutrientes que en un suelo rico en nutrientes, concordando con lo registrado por Upadhyay & Singh (2014) quienes encontraron un mayor efecto promotor de bacterias PGPR sobre cultivo de maíz en suelo calcisol que en suelo franco arenoso.

Se concluye que todas las bacterias promovieron el crecimiento del cultivo en todos los sustratos. La cepa del grupo actinomicetos A1-19/08 obtuvo el mejor efecto promotor del crecimiento de la papa en todos los sustratos evaluados y la cepa P1-20 del género *Pseudomonas* promovió mejor el efecto de crecimiento de la papa en el sustrato con mayor contenido de materia orgánica.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Internacional de la Papa (CIP) por darnos la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación. A Andreas Oswald, Pamela Calvo y Mercy Rojas por su colaboración en el presente trabajo. A los profesores de la Escuela de Biología de la Universidad Nacional Federico Villarreal por guiarnos y brindarnos la base del conocimiento para ser buenos profesionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cakmakci, R.; ahin F. & Kantar, F. 2001 Sugar beet and barley yields in relation to inoculation with N₂-fixing and phosphate solubilizing bacteria Plant and Soil 265, 123-129.
- Calvo, P. 2008. *Capacidad PGPR de Bacterias del genero Bacillus aisladas de la rizosfera del cultivo de Papa (Solanum tuberosum) en los andes del Peru*. Tesis para optar el Titulo de Biólogo. Lima - Perú.
- Chiarini, L.; Bevivino, A.; Dalmastrri, C.; Nacamulli, C. & Tabacchioni, S. 1998. Influence of plant development, cultivar and soil type on microbial colonization of maize roots. Applied Soil Ecology, 8: 11-18.
- Claus D. & Berkeley R.C.W. 1986. *Genus Bacillus. En Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Sneath, P.H.; Mair, N.; Sharpe, M.E & Holt J.G), Baltimore, Williams and Wilkins, 9^{na} Ed. Vol. 2, pp. 1105-1139.
- Cook, R.J. & Baker, O.F. 1993. *The nature and practice of biological control of plant disease*. American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota. 150 p.
- Egamberdiyeva, D. 2007. *The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils*. Centre of Agroecology, Tashkent State University of Agriculture, University str. 1, 700140 Tashkent, Uzbekistan.
- Goudjal, Y; Toumatia, O.; Sabaou, N.; Barakate, M.; Mathieu, F. & Zitouni, A. 2013. Endophytic actinomycetes from spontaneous plants of Algerian Sahara: indole-3-acetic acid production and tomato plants growth promoting activity. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 29: 1821-1829.
- Han, H.S. & Lee, K.D. 2005. Plant growth promoting rhizobacteria. Effect on antioxidant status, photosynthesis, mineral uptake and growth of lettuce under soil salinity. Research Journal of Agriculture and Biological Sciences, 1: 210-215.
- Howie, W & Echandi E. 1983. *Rhizobacteria: influence of cultivar and soil Type on plant growth and yield of potato* Department of plant pathology. North Carolina State University, Raleigh, Nc 27650. USA.
- Karlen, D.; Andrews, S; Wienhold, B. & Zobeck, T. 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. Journal of Integrative Biosciences, 6: 3-14.
- Khalid, A. & Arshad, M. 2004. Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. Journal of Applied Microbiology, 96: 473-480.
- Kloepper, J.W. 1989. Host specificity in microbe-microbe interactions. BioScience, 46: 406-409.
- Kloepper, J.W. & Schroth, M.N. 1980. *Plant growth-promoting rhizobacteria on radishes*. In: Proceedings of the fourth international conference on plant pathogenic bacteria, INRA. Angers (Francia) v.2.
- Kobabe, S.; Wagner, D. & Pfeiffer, E.M. 2004. Characterization of microbial community composition of a Siberian tundra soil by fluorescence *in situ*

- hybridization. FEMS Microbiology and Ecology, 50: 13-23.
- Latour, X. & Lemanceau, P. 1997. Métabolisme carboné et énergétique des *Pseudomonas* spp. fluorescents saprophytes à oxydase positive. Agronomie, 17:427-443.
- Loper, J.E.; Haack, C. & Scoth, M.N. 1985. Population dynamics of soil pseudomonads in the rhizosphere of potato. Applied Environmental Microbiology, 49: 416-422.
- Maier, A; Riedlinger, J; Fiedler, H, Hampp, R. 2004. Actinomycetales bacteria from a spruce stand: characterization and effects on growth of root symbiotic and plant parasitic soil fungi dual culture. Mycological Progress, 3: 129-136.
- Marschner, P.; Crowley, D. & Yang, C.H. 2004. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. Plant and Soil, 261:199-208.
- Ministerio de Agricultura 2006. OGPA-DGPA *Plan Estratégico de la Cadena de La Papa*. Perú. pp.1-51.
- Okon, Y. & Labandera, C. 1994. Agronomic Applications of *Azospirillum*: An evaluation of 20 years worldwide field inoculation. Soil Biology & Biochemistry, 26: 1591-1601.
- Sorensen, J.; Jensen, L.E. & Nybroe, O. 2001. Soil and rhizosphere as habitats for *Pseudomonas* inoculants: new knowledge on distribution, activity and physiological state derived from micro-scale and single-cell Studies. Plant and soil, 232:97-108.
- Tate, R.L. 2000. *Soil Microbiology* (2nd ed.). Wiley, New York, pp. 47-56.
- Upadhyay, S.K. & Singh, D.P. 2014. Effect of salt-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria on wheat plants and soil health in a saline environment. Journal of Applied Microbiology, 17: 288-293.
- Vandenhove, H.; Merckx, R.; Steenbergen, M.; & Vlassak, K. 1993. Microcalorimetric characterization, physiological stages and survival ability of *Azospirillum brasilense*. Soil Biology Biochemistry, 25: 513-519.

Received March 11, 2015
Accepted June 29, 2015.