



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN VEGETAL**

**Efecto de *Azotobacter* sp, *Pseudomonas* sp y
Bradyrhizobium sp en la disponibilidad de
nutrientes del polvo de roca basáltica para
cultivos de caupí y avena negra**

***Autor:* Ing. Agr. Amalia María Eugenia Romero
Directora: Ing. Agr. (M. Sc.) María Cándida Iglesias**

2021

Agradecimientos

Agradezco

A mi ángel por estar en cada paso

A mis padres por mostrarme los si y los no, por dejarme seguir mis si y mis no; por brindarme su tiempo, su amor y mostrarme su gran fortaleza

A mi hermana por esos espacios de deleite, por su incondicional presencia

A mis hermanos por el apoyo de siempre

A mis sobris, por volver a jugar con ellos

A mis amigas misioneras, correntinas, saladeña, chaqueñas, por estar con sus palabras de aliento en cada momento, por sus preguntas que me llevan a caminar atenta

A la Inge Mary, por su gran apoyo en mi profesión, por su dedicación en lo que hace, mostrándome que no importa el tiempo, siempre se aprende

A Marce y Mariel por las charlas de donde salen muchas ideas, de donde surgen mil dudas que nos llevan por muchos caminos y por toda la ayuda de siempre

A cada uno de los chicos que me ayudó a completar esta etapa, desde cebar un tere o mate a sembrar o cosechar (Ceci, Cristian, Ruben, Amilcar, Vini, Gonzalo, Pucky, Majo), por enseñarme una vez mas el trabajo en equipo

A mi tribunal, sus aportes han sido muy valiosos en mi aprendizaje, un poco motor a más curiosidad y más búsqueda

A la Facultad de agronomía y especialmente al personal de posgrado por su acompañamiento

A Griselda Bóveda y Laura Gimenez por sus aportes estadísticos

En fin, a cada ser que hizo posible concluir un escalón más.

Hay cosas que no puedes alcanzar, pero puedes alcanzarlas durante todo el día. M.O.

¿Tienes tiempo
para quedarte
solo un ratito
de tu ocupado
y tan importante día
con los jilgueros
que se han reunido
sobre un campo de cardos
en una batalla musical [..]
mientras se esfuerzan
melodiosamente
no por tu bien
ni por el mío
ni por el bien de ganar,
sino por puro deleite y gratitud.
Mary Oliver

INDICE

| | |
|---|----|
| LISTADO DE TABLAS..... | 4 |
| LISTADO DE FIGURAS..... | 7 |
| Resumen | 9 |
| Abstract | 10 |
| CAPÍTULO I..... | 11 |
| Polvo de basalto en la agricultura | 11 |
| Rizosfera y la disponibilidad de nutrientes | 13 |
| CAPÍTULO II..... | 15 |
| Cultivos de servicio y disponibilidad de nutrientes. | 15 |
| Cultivos de servicios | 15 |
| Cultivo de avena negra (<i>Avena strigosa</i> Schreb.) | 16 |
| Cultivo de Caupí (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp..... | 16 |
| CAPÍTULO III..... | 18 |
| Introducción | 18 |
| Materiales y método..... | 19 |
| Ensayo de avena en macetas: | 19 |
| Ensayo de avena en condiciones de campo:..... | 22 |
| Análisis estadístico..... | 25 |
| Resultados y discusión | 25 |
| Ensayo en macetas:..... | 25 |
| Ensayo en condiciones de campo: | 35 |
| Análisis multivariado..... | 44 |
| CAPÍTULO IV | 49 |
| Introducción | 49 |
| Materiales y método..... | 50 |
| Ensayo en macetas:..... | 51 |
| Ensayo en condiciones de campo: | 53 |
| Análisis estadístico..... | 57 |
| Resultados y discusión | 58 |
| Ensayo en macetas-Caupí | 58 |
| Ensayo en campo-Caupí..... | 68 |
| Análisis multivariado..... | 78 |
| CAPÍTULO V | 83 |
| Conclusiones y recomendaciones generales | 83 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 84 |

LISTADO DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1 <i>Análisis de macro y micro-elementos total del polvo de basalto</i> | 19 |
| Tabla 2 <i>Esquema de los tratamientos</i> | 19 |
| Tabla 3 <i>Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos</i> | 20 |
| Tabla 4 <i>Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos</i> | 22 |
| Tabla 5 <i>Registros de las precipitaciones y temperaturas mensuales en el período del ensayo.</i> .. | 23 |
| Tabla 6 <i>Análisis de varianza para las variables biométricas del ensayo de avena en maceta</i> ... | 26 |
| Tabla 7 <i>Valores promedios de las variables biométricas del ensayo de avena en macetas</i> | 26 |
| Tabla 8 <i>Valores medios por factor de las variables de producción de avena en macetas</i> | 26 |
| Tabla 9 <i>Análisis de la varianza para macronutrientes en hojas - avena en macetas</i> | 28 |
| Tabla 10 <i>Concentración promedio de macronutrientes en hojas - avena en macetas</i> | 28 |
| Tabla 11 <i>ANAVA para la variable micronutrientes en hojas en avena negra en macetas</i> | 29 |
| Tabla 12 <i>Concentración promedio de micronutrientes en hojas en avena en macetas</i> | 29 |
| Tabla 13 <i>ANAVA para la variable macronutrientes en suelo para avena negra en macetas</i> | 30 |
| Tabla 14 <i>Concentración promedio de macronutrientes en suelo- avena negra en macetas</i> | 30 |
| Tabla 15 <i>ANAVA para la variable micronutrientes en suelo- avena negra en macetas</i> | 32 |
| Tabla 16 <i>Concentración promedio de micronutrientes en suelo -avena negra en macetas</i> | 32 |
| Tabla 17 <i>Análisis de la varianza para la variable micorrización total</i> | 33 |
| Tabla 18 <i>Valores promedios por factores para la micorrización en avena negra en macetas</i> ... | 33 |
| Tabla 19 <i>Análisis de la varianza para la variable actividad biológica global</i> | 34 |
| Tabla 20 <i>Valores medios para la actividad biológica global en avena negra en macetas</i> | 34 |
| Tabla 21 <i>ANAVA para la producción de biomasa seca de la parte aérea en avena</i> | 35 |
| Tabla 22 <i>Valores promedios de la producción en materia seca por factor</i> | 35 |
| Tabla 23 <i>Medias obtenidas para la producción por hectárea de avena negra</i> | 37 |
| Tabla 24 <i>ANAVA para la variable macronutrientes en hoja en el ensayo de avena a campo</i> | 38 |
| Tabla 25 <i>Contenido promedio de macronutrientes foliar en el ensayo de avena a campo</i> | 38 |
| Tabla 26 <i>ANAVA para la variable micronutrientes en hoja en el ensayo de avena a campo</i> | 39 |
| Tabla 27 <i>Valores promedios del contenido foliar de micronutrientes en avena a campo</i> | 39 |
| Tabla 28 <i>ANAVA para la variable macronutrientes en suelo en el ensayo de avena a campo</i> ... 40 | |
| Tabla 29 <i>Valores medios del contenido de macronutrientes en suelo de avena a campo</i> | 40 |
| Tabla 30 <i>ANAVA para la variable micronutrientes en suelo en el ensayo de avena a campo</i> | 41 |
| Tabla 31 <i>Comparación de medias para micronutrientes en suelo de avena a campo</i> | 41 |
| Tabla 32 <i>ANAVA para la variable micorrización total en el ensayo de avena a campo</i> | 42 |

| | |
|--|----|
| Tabla 33 <i>Comparación de medias para la micorrización por factor de avena a campo</i> | 42 |
| Tabla 34 ANAVA para la variable actividad biológica global en <i>avena a campo</i> | 43 |
| Tabla 35 <i>Comparación de medias de la actividad biológica global en avena negra a campo</i> ... | 44 |
| Tabla 36 <i>Análisis de macro y micro-elementos total del polvo de basalto</i> | 50 |
| Tabla 37 <i>Esquema de los tratamientos</i> | 50 |
| Tabla 38 <i>Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos</i> | 51 |
| Tabla 39 <i>Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos</i> | 53 |
| Tabla 40 <i>Registros de precipitaciones y temperaturas mensuales en el período del ensayo</i> | 53 |
| Tabla 41 <i>Análisis de la varianza para las variables biométricas evaluadas en caupí maceta</i> | 58 |
| Tabla 42 <i>Comparación de medias para las variables biométricas de caupí en macetas</i> | 59 |
| Tabla 43 <i>Comparación de medias para las variables de producción de caupí en macetas</i> | 60 |
| Tabla 44 ANAVA para el contenido en macronutrientes foliar de caupí en maceta | 61 |
| Tabla 45 <i>Valores medios para la variable macronutrientes en hoja de caupí en macetas</i> | 61 |
| Tabla 46 ANAVA para el contenido de micronutrientes foliar de caupí en maceta | 62 |
| Tabla 47 <i>Comparación de medias para micronutrientes en hojas de caupí en macetas</i> | 62 |
| Tabla 48 ANAVA del contenido de macronutrientes en suelo para caupí en maceta | 63 |
| Tabla 49 <i>Valores promedios para la variable macronutrientes en suelo de caupí en macetas</i> .. | 64 |
| Tabla 50 ANAVA del contenido de micronutrientes en suelo para caupí en maceta..... | 64 |
| Tabla 51 <i>Concentración promedio para micronutrientes en suelo de caupí en macetas</i> | 65 |
| Tabla 52 ANAVA para la variable micorrización total para caupí en maceta | 65 |
| Tabla 53 <i>Valores medios para la variable micorrización en caupí-ensayo en macetas</i> | 65 |
| Tabla 54 <i>Análisis de la varianza para la actividad biológica global en caupí en maceta</i> | 67 |
| Tabla 55 <i>Valores promedios para la variable actividad biológica global en caupí en macetas</i> . | 67 |
| Tabla 56 ANAVA de la producción de biomasa seca de la parte aérea en caupí campo | 68 |
| Tabla 57 <i>Valores medios para la producción de biomasa seca en vástago de caupí</i> | 69 |
| Tabla 58 <i>Valores promedios de producción de biomasa seca en vástago de caupí</i> | 69 |
| Tabla 59 ANAVA del contenido en macronutrientes foliar en caupí campo | 70 |
| Tabla 60 <i>Valores promedios en macronutrientes foliar de caupí a campo</i> | 71 |
| Tabla 61 ANAVA para micronutrientes a nivel foliar en caupí a campo | 72 |
| Tabla 62 <i>Contenido medio en micronutrientes a nivel foliar estudiadas en caupí a campo</i> | 72 |
| Tabla 63 ANAVA para macronutrientes en suelo en caupí a campo | 73 |
| Tabla 64 <i>Contenido medio en macronutrientes en suelo estudiadas en caupí a campo</i> | 73 |
| Tabla 65 ANAVA para macronutrientes en suelo en caupí a campo | 74 |
| Tabla 66 <i>Comparación de medias para micronutrientes en suelo de caupí a campo*</i> | 75 |

Tabla 67 ANAVA para micorrización total en caupí a campo 76

Tabla 68 *Valores medios para la variable micorrización en caupí a campo* 76

Tabla 69 ANAVA para la actividad biológica global en caupí a campo 77

Tabla 70 *Valores medios para la variable actividad biológica global en caupí a campo*..... 78

LISTADO DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Cultivo de avena en macetas a los 60 días pos-siembra..... | 21 |
| Figura 2. Plantas de avena | 22 |
| Figura 3. Vista satelital del sitio de ensayo de avena..... | 23 |
| Figura 4. Marcación de la parcela | 24 |
| Figura 5. Estado de las plantas de avena al momento de la cosecha | 25 |
| Figura 6. Materia seca total, de vástago y raíz en avena negra en macetas..... | 27 |
| Figura 7. Estructuras micorrizas observadas en microscopio | 33 |
| Figura 8. Medias obtenidas para la variable micorrización total en avena negra en macetas... | 33 |
| Figura 9. Medias para la variable actividad biológica global en avena negra en macetas | 34 |
| Figura 11. Estructuras micorrizas observadas en microscopio | 42 |
| Figura 12. Medias obtenidas para la variable micorrización en avena negra en campo..... | 43 |
| Figura 14. Biplot resultante del ACP de avena en macetas..... | 45 |
| Figura 15. Biplot resultante del ACP de avena en macetas para nutrientes a nivel foliar..... | 46 |
| Figura 16. Biplot resultante del ACP de avena en campo para nutrientes a nivel foliar | 46 |
| Figura 17. Biplot resultante del ACP de avena en maceta para nutrientes en suelo..... | 47 |
| Figura 18. Biplot resultante del ACP de avena a campo para nutrientes en suelo..... | 48 |
| Figura 19. Plantas de caupí a los 20 días pos-siembra | 52 |
| Figura 20. Plantas de caupí con 50 días pos-siembra | 53 |
| Figura 21. Vista satelital del ensayo de caupí | 54 |
| Figura 22. Aplicación del polvo de basalto..... | 55 |
| Figura 23. Siembra del poroto caupí..... | 55 |
| Figura 24. Raleo de las plantas..... | 56 |
| Figura 25. Vista de las parcelas a los 50 días..... | 57 |
| Figura 26. Cosecha del poroto caupí a los 60 días después de la siembra. | 57 |
| Figura 27. Materia seca total, de vástago y raíz en poroto caupí en macetas..... | 60 |
| Figura 28. Estructuras micorrizas observadas en microscopio | 66 |
| Figura 29. Medias obtenidas para la variable micorrización en poroto caupí..... | 66 |
| Figura 30. Medias obtenidas para la variable actividad biológica global de caupí en macetas . | 67 |
| Figura 31. Medias obtenidas para la variable biomasa seca de vástago-caupí a campo..... | 69 |
| Figura 32. Estructuras micorrizas observadas en microscopio | 75 |
| Figura 33. Medias obtenidas para la variable micorrización total en poroto caupí a campo..... | 76 |
| Figura 34. Medias obtenidas para la variable actividad biológica global-caupí a campo..... | 78 |

Figura 35. ACP para las variables biométricas de peso seco vástago 79

Figura 36. Biplot resultante del ACP de caupi en maceta para nutrientes foliar 80

Figura 37. Biplot resultante del ACP de caupi a campo para nutrientes foliar 80

Figura 38. Biplot resultante del ACP de caupi en maceta para nutrientes en suelo..... 81

Figura 39. Biplot resultante del ACP de caupi en campo para nutrientes en suelo..... 82

Resumen

Efecto de *Azotobacter sp*, *Pseudomonas sp* y *Bradyrhizobium sp* en la disponibilidad de nutrientes de polvo de roca basáltica para cultivos de caupí y avena negra

En Argentina la producción orgánica y agroecológica muestra un ritmo creciente, lo que lleva al estudio de alternativas a los fertilizantes de síntesis química y de alta solubilidad, que permitan recuperar o mejorar el nivel de nutrientes en suelo. En este sentido, el trabajo fue conducido con el fin de medir el efecto de la inoculación de *Azotobacter sp*, *Pseudomonas sp* y *Bradyrhizobium sp* en la disponibilidad de nutrientes del polvo de roca de basalto, adicionada a un suelo de baja fertilidad, para dos cultivos, avena negra (*Avena strigosa*) y caupí (*Vigna unguiculata*). Se realizaron ensayos en macetas bajo invernáculo y en parcelas a campo para ambos cultivos. Se midieron variables biométricas, niveles de nutrientes foliares y en suelo, infección micorrícica y actividad respiratoria del suelo. Se encontró que los microorganismos inoculados no tuvieron un comportamiento diferencial significativo combinados al basalto. Las variables número de hojas y altura en avena en maceta fueron significativamente menores con el uso de basalto, la acumulación de materia seca tampoco se vio favorecida; se halló un contenido significativo en Cu en suelo con basalto y un alto contenido en Fe, que combinado a una baja concentración de nitrógeno y fósforo inicial en suelo, resultaron en una baja acumulación de biomasa, considerando también la asociación de los tratamientos con basalto a un alto contenido en Mn foliar. El contenido foliar de hierro y cobre significativamente mayor con el uso de basalto y Fe en suelo para el ensayo a a campo mostraron un potencial aporte de estos elementos, y considerando un mayor contenido de fósforo y nitrógeno inicial comparado al ensayo en maceta permitió un mejor balance en esos nutrientes, y la acumulación de biomasa no se vio perjudicada como se dio en el cultivo de avena en maceta. La biomasa total, de vástago y número de hojas en caupí en macetas se vieron favorecidas significativamente con el uso de basalto, al igual que el contenido foliar en Cu, cuya diferencia también se dio en suelo. En cuanto a las variables microbiológicas estimadas, el uso de basalto no afectó significativamente su actividad. Si bien es necesario considerar un mejor balance en macronutrientes en estos suelos, estos resultados ya representan un antecedente para posteriores estudios en la región.

Palabras claves: polvo de basalto, microorganismos promotores, *Vigna unguiculata*, *Avena strigosa*

Abstract

Effect of *Azotobacter sp*, *Pseudomonas sp* and *Bradyrhizobium sp* on the availability of nutrients from basalt rock dust for cowpea and black oat

In Argentina, organic and agroecological production shows an increasing rate, which leads to the study of alternatives to chemically synthesized and high-solubility fertilizers, which allow recovering or improving the level of nutrients in the soil. Therefore, this study was conducted with the aim of measuring the effect of the inoculation of *Azotobacter sp*, *Pseudomonas sp* and *Bradyrhizobium sp* on the availability of nutrients from basalt rock dust, added to a low fertility soil, for two crops: black oats (*Avena strigosa*) and cowpea (*Vigna unguiculata*). Trials were conducted on plots in greenhouse and in field plots for both crops. Biometric variables, foliar nutrient levels and soil, mycorrhizal infection and soil respiratory activity were measured. Microorganisms inoculated behavior did not differ with basalt. The variables number of leaves and height in avena in pot were significantly smaller with the use of basalt, the accumulation of dry matter not was favored; the application of basalt resulted in significant increase in content in Cu in soil, and combined with a low concentration of nitrogen and phosphorus, they showed low accumulation of biomass, considering also the association of treatments with basalt to a high content in foliar Mn. The leaf content of Fe and Cu significantly higher with the use of basalt and Fe in soil for the field test, showed a potential contribution of these elements, and considering a higher content of P and initial N compared to the trial in pot allowed a better balance in these nutrients, and the accumulation of biomass was not harmed as was the case with the crop of avena in pot. Dry biomass and number of leaves in cowpea in pot were significantly favored with the use of basalt, as well as the foliar content in Cu, this difference was also found in soil. The estimated microbiological variables did not significantly differ with the use of basalt dust. Although it is necessary to consider a better balance in macronutrients in these soils, these results represent a background for further studies in the region.

Keywords: basalt powder, promoter microorganisms, *Vigna unguiculata*, *Avena strigosa*

CAPÍTULO I

Polvo de basalto en la agricultura. Rizósfera y la disponibilidad de nutrientes: rol de las plantas y los microorganismos promotores del crecimiento vegetal.

Polvo de basalto en la agricultura

La aplicación del polvo de roca al suelo es una técnica adoptada desde la antigüedad en la agricultura, y su uso basado en el concepto de pan de piedras es mencionado por Hensel (1894) quien junto a otros investigadores describieron la aplicación de esta técnica en diferentes cultivos (Keller, 1948). Van Strateen (2002) los denomina como agrominerales, definiéndolos como materiales geológicos naturales, que incluyen formas de rocas sin procesar y procesadas, y pueden ser usados en sistemas de producción de cultivos para reponer los contenidos minerales de los suelos y nutrientes, tanto macro como elementos traza o, como enmienda en el suelo. Estos materiales generalmente son utilizados como fuente en la remineralización de suelos pobres o lixiviados, buscando mantener un equilibrio en la fertilidad del suelo y, conservar los recursos naturales con una productividad sostenible (Ramos Gindri et al., 2014; Fyfe et al., 2006).

Entre las propiedades del polvo de rocas a la interfaz de planta-suelo-agua, sin definir un origen geológico particular, se menciona el aporte de macronutrientes importantes, tales como nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S), así como micronutrientes tales como hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn) (Nunes et al., 2014; Ramos Gindri et al., 2014). Tanto los macronutrientes como los micronutrientes se clasifican según su concentración y requerimientos, y la importancia de estos son las múltiples funciones que cumplen, ya que se encuentran formando parte de macromoléculas que constituyen el vegetal. Algunos son activadores enzimáticos, están involucrados en el transporte de electrones en la fotosíntesis, en procesos que desencadenan en la planta tolerancias a estrés, en el crecimiento reproductivo, entre otras funciones.

Se ha encontrado que la aplicación de estos materiales al suelo genera un incremento en el pH mostrando potencial en condiciones ácidas; un aumento en la capacidad de intercambio catiónico mejorando los niveles de cationes en los suelos y el suministro de nutrientes con efecto residual a largo plazo. Además, se resalta la baja disponibilidad de aluminio para el medio acuoso, que resulta una gran ventaja, por ser este un elemento tóxico en el desarrollo de las plantas (Nunes et al., 2014; Ramos Gindri et al., 2014; Melo et al., 2012; Van Strateen, 2002). Así también se pueden mencionar algunos trabajos en la producción de diferentes cultivos; como el efecto positivo que investigadores han conseguido sobre las características biométricas y tecnológicas en caña de azúcar con el uso de basalto molido como remineralizante; mejoras en el rendimiento de tomate con dosis crecientes de polvo de roca; como también resultados promisorios en el uso combinado con fertilizantes de síntesis química en plantines de eucalipto para los niveles de K y P en suelo, entre otros cultivos (Ramos Gindri et al., 2016; Tarumoto et al., 2016; Enciso Garay et al., 2016; Carvalho et al., 2013; Padua, 2012).

La roca de tipo basáltica, es uno de los materiales más estudiados dentro de los agrominerales o polvos de rocas en general, por la gran posibilidad de suplir de nutrientes al suelo debido a su composición, especialmente P, Ca, Mg y micronutrientes; y por presentar en su mayoría bajo contenido de silicio (Si). En los últimos años, con los

nuevos enfoques en la producción sustentable y la reutilización de residuos generados en las diferentes industrias, el uso de polvo de basalto como remineralizante representa un valor agregado al residuo proveniente de las canteras basálticas, como así también una fuente alternativa de nutrientes (Kazmierzac et al., 2019; Enciso Garay et al., 2016; Ramos Grindi et al., 2014).

En Latinoamérica, Brasil es uno de los lugares con mayor difusión en la aplicación de polvo de basalto, mayoritariamente por pequeños agricultores, debido a la facilidad en la obtención de diferentes materiales derivados de las rocas, por ser un país geológicamente diverso y con precipitaciones abundantes que favorecen la mineralización de estos materiales (Almeida et al., 2006; Theodoro y Leonardos, 2006).

En Argentina, en los últimos años el creciente número de productores dedicados a la producción orgánica y agroecológica ha expandido la superficie destinada a la misma, mostrando durante el 2018 un incremento del 18%, sosteniendo la tendencia creciente de años anteriores (SENASA, 2019). Esto lleva al estudio de otras alternativas para los fertilizantes de síntesis química y de alta solubilidad no utilizadas en la producción orgánica, que permitan recuperar o mejorar el nivel de nutrientes disponibles en el suelo, además de las actualmente utilizadas, como son los abonos verdes, compost y lombricompost.

Las canteras de rocas basálticas ubicadas en el territorio argentino, en su proceso de extracción dejan subproductos con posible potencial fertilizante-remineralizante; lo que significa una oportunidad en el uso alternativo de estos residuos, dentro del plan nacional de enmienda y remineralización del suelo para abastecer al sector agrícola con minerales (Infoleg, 2009); centrando la utilidad potencial de estos residuos en una producción ambientalmente sustentable (Inversiones Misiones, 2017; Ciccioli et al., 2013). El uso de este tipo de materiales es económicamente viable cuando no se deben recorrer largas distancias para su búsqueda; ventaja que sitúa a varias regiones del territorio argentino, donde se cuenta con este tipo de material; como ser las canteras ubicadas en el centro y norte del país.

En la mesopotamia argentina, la sucesión basáltica denominada Formación Serra Geral está integrada por potentes derrames basálticos, sobre el cual se ubican varias canteras de extracción. En el trabajo realizado por Madsen et al. (2018), informan que las canteras ubicadas en Corrientes presentan como composición SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , MnO , TiO_2 , P_2O_5 , clasificándolas además en bajo o alto contenido de óxido de titanio.

Las evaluaciones con este material, dentro del territorio argentino, resultan escasas. En Buenos Aires, dentro de lo que es el cinturón hortícola, Oberti Amaudo y Feld (2015), midieron el efecto de diferentes agroinsumos sobre la producción de plantines de lechuga hasta el trasplante, encontrando que el polvo de basalto no tuvo influencia sobre el crecimiento como si lo logró el lombricompost agregado. En la provincia de Corrientes, también se evaluaron abonos orgánicos y polvo de basalto en un cultivo de albahaca, con un tratamiento control que obtuvo una mayor producción que el uso de basalto, concluyendo con la posibilidad de alguna situación de desbalance de nutrientes o efecto negativo en el crecimiento de ese cultivo (Krynski et al., 2017). También se ha medido el efecto a nivel de actividad biológica del suelo sobre la micorrización (Correa et al., 2017), con el uso combinado de polvo de basalto e inoculantes microbianos, obteniendo un incremento en el porcentaje de micorrización con el uso de basalto. En la provincia de Misiones su uso está difundido en pequeñas a medianas extensiones de cultivo, aunque sin información de resultados.

El uso de estos agrominerales tiene la desventaja de su lenta disponibilidad y, por lo tanto, una baja tasa de liberación de nutrientes a las plantas (Ramos Gindri et al., 2014). Por lo que es necesario prestar atención a las prácticas de manejo del suelo que creen condiciones para mejorar la capacidad solubilizadora de los organismos del suelo o considerar la inoculación de estos, debido a que su acción puede variar desde la simple fragmentación de partículas hasta cambios complejos en la superficie de los minerales, cambiando así sus características químicas (Carvalho et al., 2013b). Esto demuestra la necesidad de mayores evaluaciones en diferentes cultivos y suelos.

Rizosfera y la disponibilidad de nutrientes: rol de las plantas y los microorganismos promotores del crecimiento vegetal.

El término rizósfera, descrito por primera vez por Hiltner, fue en referencia a la zona de mayor actividad bacteriana alrededor de las raíces (Curl y Truelove 2012). La rizodeposición de las plantas es el suministro de energía clave para la biota de la rizosfera (Lynch et al., 2012). En este volumen de suelo, los flujos y gradientes a lo largo de la raíz (longitudinal) y alejados de la raíz (radial), junto con las interacciones físicas, químicas y bioquímicas, desencadenan procesos que influyen, por ejemplo, en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes, su solubilidad, transporte en el suelo y, en última instancia, la absorción por las plantas y su distribución en el interior de estas (Mimmo et al., 2018; Lynch et al., 2012).

La actividad de las raíces tiene un impacto en las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo. El tipo y la composición de los exudados de la raíz deciden principalmente la diversidad de microorganismos que proliferan en la rizósfera. Dentro de los exudados se puede mencionar los ácidos orgánicos, aminoácidos, compuestos fenólicos, fitosideróforos, flavonoides, carbohidratos y enzimas. Algunos estudios han mostrado que el tipo de ácido orgánico producido por las raíces puede inducir a la quimiotaxis de determinados microorganismos e influir sobre la colonización alrededor de la raíz, proporcionando efectos positivos en el desarrollo del vegetal por un incremento en la capacidad de tomar nutrientes, como así también generar tolerancia a ciertos niveles de nutrientes que podrían resultar tóxicos (Dotaniya y Meena, 2015; Tan et al., 2013; Feng Ma y Furukawa, 2003; Dakora y Phillips, 2002).

En cuanto a la eficiencia de movilización en el sistema suelo raíz, influirán tanto del tipo de exudado de la raíz como las características del suelo; por ejemplo, el ácido cítrico ha demostrado ser más eficiente que el ácido oxálico y málico en la movilización de micronutrientes como Fe, Mn y Cu en un suelo ácido; por el contrario, en un suelo alcalino la eficiencia de movilización cambia, los ácidos cítricos mostraron la mayor eficiencia de movilización para Fe y Mn, mientras que el ácido oxálico se desempeñó mejor para Cu; dado por las diferentes eficiencias de movilización relacionadas con los diferentes procesos de meteorización mineral (Mimmo et al., 2018). Esta producción de ácidos ya sea por parte de raíces o microorganismos, se reporta como principal mecanismo en la solubilización de nutrientes, aunque no sólo los de carácter orgánicos, sino también, ácidos inorgánicos como ácido carbónico, formados a partir del CO₂ liberado al suelo. Este es resultante de la respiración de los microorganismos y raíces del suelo (Laurent y Eric, 1994) y es responsable de la liberación, entre otros, de compuestos que contienen P y K. Estos dos nutrientes también ven favorecida su solubilización por la producción de ácidos orgánicos que pueden actuar a través del efecto sobre el pH, como también a través de procesos de quelación y complejación, en el cual los cationes son incorporados a las moléculas de compuestos orgánicos (Mweetwa et al., 2014; Silva et al., 2011; Basak y Biswas, 2009).

Las plantas, hongos y bacterias han desarrollado varios mecanismos para movilizar el P, entre los más investigados se encuentran la liberación de protones que conducen a una disminución del pH del suelo, la liberación de ligandos y quelantes orgánicos e inorgánicos, como bicarbonato o aniones carboxílicos, y la liberación de fosfatasas que mineralizan in situ P (Dotaniya y Meena, 2015). Los quelantes orgánicos son las sustancias conocidas como sideróforos, con alta afinidad por Fe, Ca, Al y Mg (Alves, 2006; Mweetwa et al., 2014). Algunas bacterias y hongos pueden producir, además de ácidos orgánicos que solubilizan directamente K de minerales como micas e illitas, compuestos quelantes de Si y dejando en solución al K.

Otros compuestos como los exopolisacáridos microbianos, excretados por algunas bacterias y hongos en el exterior de sus paredes celulares, han mostrado efectos en la solubilización de fósforo; los géneros de bacterias *Azotobacter sp.*, *Enterobacter sp.*, *Arthrobacter sp.*, *Bradyrhizobium*, *Serratia* y *Pseudomonas sp* presentaron gran producción de estos compuestos demostrando fuerte capacidad para la solubilización de fosfatos (Tan et al., 2014; Mweetwa et al., 2014; Sharma et al., 2013; Badawi et al., 2011). El género *Azotobacter* se ha reportado como eficiente productor de fitohormonas, sideróforos y exopolisacáridos contribuyendo con la solubilización de fosfatos y calcio. Los derivados de catecol producidos por *Azotobacter sp.* y *Streptomyces sp.* se han mencionado como compuestos potencialmente capaces de aumentar la disolución de minerales conteniendo hierro (Behl et al., 2006; Lenin y Jayanthi, 2012; Sharma et al., 2013).

Basak y Biswas (2009) utilizaron a *Bacillus mucilaginosus* sobre micas ricas en K y observaron un mayor rendimiento en *Sorghum vulgare* cultivado en deficiencia de ese nutriente. Pii et al. (2015), encontraron que plantas de pepino deficientes en Fe al ser cultivadas en suelo inoculado con *Azospirillum* mejoraron sus síntomas de deficiencia por este elemento. Este efecto podría atribuirse, al menos en parte, a la contribución de la liberación de sideróforos de *A. brasilense* en la adquisición de Fe por las plantas en el suelo calcáreo. Assainar et al. (2018) evaluaron sobre un suelo con cultivo de trigo la eficacia conjunta de un inoculante microbiano de múltiples especies con un fertilizante mineral a base de roca y comparado a un fertilizante químico; concluyendo que la inoculación junto al fertilizante mineral estimuló el rendimiento de grano de trigo al mismo nivel que los fertilizantes tradicionales aplicados al suelo.

Por lo tanto, los microorganismos representan un punto decisivo para mejorar o restringir los procesos de la rizosfera (Mimmo et al., 2018). La utilización de los mismos en inoculantes está ampliamente difundida, con el fin de aprovechar los múltiples beneficios de las actividades que desarrollan como la solubilización y disponibilidad de nutrientes, producción de fitohormonas y antibióticos, entre otros. Dentro de la producción agrícola el uso de bioinsumos es una práctica aceptable en sistemas sustentables.

Un bioinsumo es definido como aquel producto biológico que consista o haya sido producido por microorganismos o macroorganismos, extractos o compuestos bioactivos derivados de ellos y que esté destinado a ser aplicado como insumo en la producción agropecuaria, agroalimentaria, agroindustrial y/o agroenergética (MAGyP, 2017) con el objetivo de incrementar la producción o calidad del cultivo.

CAPÍTULO II

Cultivos de servicio y disponibilidad de nutrientes. Avena negra (*Avena strigosa*) y caupí (*Vigna unguiculata*)

Cultivos de servicios

Los cultivos de servicio presentan importantes beneficios en las cualidades físicas del suelo; el aporte en materia orgánica que realizan, además de mejorar la estructura del suelo, estimula la actividad de los organismos presentes y suministra nutrientes a los cultivos sucesivos.

Las plantas son consideradas otro factor importante en la solubilización de nutrientes, la inclusión de cultivos para abono verde, en rotaciones o consociaciones con otros cultivos agrícolas, incorporadas al suelo o dejando sobre la superficie, mejora las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo; como así también los exudados generados por las raíces de las plantas funcionando como agentes mineralizantes, que según el tipo de vegetal puede promover la liberación de determinados nutrientes (Meheruna y Akagi, 2006).

Se ha encontrado que el uso de rocas como remineralizantes del suelo no ha disminuido la actividad biológica del suelo, y que los abonos verdes fueron igualmente efectivos en la disponibilización de elementos de las rocas molidas cuando se comparó la actividad del cultivo agrícola y su interacción con microorganismos, encontrando además una buena respuesta en las asociaciones micorrícicas (Carvalho, 2012).

Pantigoso et al. (2020) estudiaron el papel de los exudados radiculares en la asimilación de fósforo en plantas jóvenes y viejas de *Arabidopsis thaliana*, observando que los exudados cambiaron en respuesta a la adición incremental de fósforo, a partir de la etapa vegetativa las plantas pueden liberar compuestos distintos para hacer frente a las necesidades de deficiencia de fósforo influenciadas por el estado nutricional de fósforo en diferentes etapas de desarrollo. En condiciones de déficit del nutriente, Calandrelli y Hernandez (2018) encontraron en lupino una activación de las estrategias para solubilizar el fósforo, mediante el aumento de la exudación de fosfatasas al medio. Algunas de las especies utilizadas con este fin pueden presentar una mayor capacidad para dejar disponible los nutrientes presentes en los polvos de roca utilizados como fertilizantes-remineralizantes. Nwoke et al. (2008) mencionan en su trabajo con caupí, que una de las grandes ventajas de este cultivo en la absorción de nutrientes, principalmente P, es debido a su largo desarrollo radical; como así también la cantidad de ácido cítrico producido por sus raíces como una estrategia involucrada en la adquisición de nutrientes. Rao et al. (2002) describen, además, que los cultivos de leguminosas, tendrían varias vías posibles en la solubilización, ellos mencionan que la acidificación en la rizosfera puede ser tanto por la liberación de protones después de la absorción excesiva de cationes sobre los aniones durante la fijación de nitrógeno, como la exudación de ácidos orgánicos o aminoácidos o la liberación de CO₂ de la respiración de la raíz.

A nivel rizosfera, la presencia de raíces tiene gran influencia en la selección de la diversidad microbiana presente, cada cultivo presenta un microbioma diferente según la especie del vegetal y el ambiente en el que se desarrolla. Por lo cual la eficiencia de los abonos verdes o cultivos de cobertura en el sistema suelo, dependerá de la especie vegetal y los mecanismos que posean para absorber nutrientes de escasa solubilidad del suelo (Calandrelli y Hernandez, 2018).

Cultivo de avena negra (*Avena strigosa* Schreb.)

La avena negra (*Avena strigosa* Schreb.) es una gramínea anual invernal (familia Poaceae) originaria del norte de África y Medio Oriente, cultivada en Sudamérica principalmente como forraje por su buen valor nutritivo y productividad.

Es de hábito erecto, posee un vástago cilíndrico de 25 a 150 cm de altura. Las hojas glabras enfundan los tallos, tienen aproximadamente entre 2 a 10 mm de ancho con una lígula blanca de 2 a 5 mm insertas en el vástago. Las inflorescencias son panículas sueltas con una longitud de 8 a 30 cm, con espiguillas de dos a tres flores, que miden entre 20 y 25 mm de largo; sus flores son hermafroditas (Husson et al., 2012).

El grano de avena es una cariopse, semicilíndrica y aguda en las extremidades, encubierto por lema y palea. La lema inferior es arqueada, recta y negra, lo que le da el nombre de avena negra (Fontaneli et al., 2012). Posee dos sistemas radiculares, un seminal y otro de raíces permanentes y puede producir raíces adventicias en los nudos. Su sistema de raíces fasciculado es relativamente potente, puede enraizarse hasta más de 1,5 m (Fontaneli et al., 2012; Husson et al., 2012). *Avena strigosa* tiene diferencias morfológicas con respecto a la avena común (*Avena sativa*), es más frondosa con panículas laterales (en lugar de equiláteros), granos gordos (en lugar de estrechos) y semillas más pequeñas. Puede crecer desde el nivel del mar hasta una altitud de 1000 m (Fontaneli et al., 2012). En cuanto a su ciclo, la avena negra es un forraje invernal de rápido crecimiento que puede cosecharse 6 semanas después de la siembra. Es poco fotosensible, la floración se realiza de 4 a 5 meses después de la siembra, según las variedades y según las zonas agroecológicas. El período de floración dependerá de la fecha de instalación (Fontaneli et al., 2012; Husson et al., 2012). La avena negra es una especie rústica, poco exigente en fertilidad del suelo, se caracteriza por su crecimiento vigoroso y tolerancia a la acidez extrema del suelo, causada por la presencia de aluminio. Prefiere la luz solar plena por lo que se cultiva solo, pero puede crecer intercalado con otras especies de forraje de clima templado, dado su alto rendimiento de materia seca, calidad forrajera y resistente al pisado (Dial, 2014; Fontaneli et al., 2012; Husson et al., 2012). En la región nordeste de Argentina, la época de siembra va desde otoño hasta fines de invierno, siendo lo más recomendado sembrar para la zona desde el 1 abril al 15 mayo, teniendo en cuenta que se deben evitar los calores de fines del verano y disponer de humedad en el suelo (Pereyra & Gándara, 2013).

Cultivo de Caupí (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.

El caupí, (*Vigna unguiculata* Syn. *Vigna sinensis*), es originaria de África occidental. Se cultiva hoy en día, en los trópicos y subtrópicos entre 35°N y 30°S, en Asia y Oceanía, el Medio Oriente, el sur de Europa, África, el sur de Estados Unidos y América Central y del Sur (Tropical Forages, 2008).

Es una planta herbácea anual, perteneciente a la familia *Fabaceae*, de crecimiento determinado e indeterminado, rastrera, trepadora o sub-erecta a erecta, que crece de 15 a 80 cm de altura. La raíz principal puede alcanzar hasta dos metros de profundidad, forma nódulos producidos por bacterias fijadoras de nitrógeno. Las hojas primarias son unifoliadas y crecen de manera opuesta y las hojas verdaderas son trifoliadas. La forma de los folíolos puede ser lineal, lanceolada u ovalada. El área foliar se incrementa con la edad de la planta. El número de hojas producido por cada planta es alto, de ahí que el caupí pueda usarse como forraje o abono verde. La inflorescencia es racimosa con flores de color blanco, amarillo, azul claro, violeta o púrpura. De toda la inflorescencia solo dos o cuatro flores se convierten en frutos, pues las demás abortan. El fruto es una vaina larga dehiscente de 10 a 23 cm con 10 a 15 semillas/vaina. Las semillas de color, forma y tamaño variable, pueden ser blancas, cremas, amarillas,

purpuras, pardas o negras, también existen multicoloreadas, ya sea veteadas o moteadas (Tropical Forages, 2008).

Para un óptimo crecimiento la siembra debe ser en suelos profundos, fértiles, sin problemas de salinidad. Es un cultivo de clima cálido, muy adaptado a zonas de los trópicos húmedos, también se puede desarrollar en zonas templadas. Prospera en lugares con precipitación entre 650 a 2000 mm. La época de siembra es primavera verano hasta fines de febrero (Albán, 2012; Apáez Barrios et al., 2009). Según Campos et al. (2000) el ciclo del caupí puede dividirse en la Fase Vegetativa (V0 a V9), en donde a partir de V6 comienzan a aparecer los tallos secundarios y las guías; Fase reproductiva (R1 a R5), donde la floración puede comenzar a partir de los 35-45 días después de la siembra y extenderse unos 45-55 días; en R3 comienza la maduración de la primera vaina durando unas 3 semanas aproximadamente.

Se lo cultiva principalmente para el consumo de sus porotos, por su elevado contenido de proteínas (18-23 %) de buena calidad nutricional resultando como una fuente alimentaria interesante para el consumo humano bajo la forma de grano entero o de harinas, inclusive sus hojas son consumidas en algunos países. El uso de esta leguminosa se ha diversificado además como abono verde, cultivo de cobertura, cultivo de servicio, forraje conservado o para consumo animal directo (Apáez Barrios et al, 2009; Avanza y Añon, 2008). El caupí tiene un alto potencial como abono verde, puede incorporarse al suelo o extenderse sobre la superficie del suelo de 8 a 10 semanas después de la siembra aproximadamente y puede proporcionar el equivalente de 80 kg.ha⁻¹ de nitrógeno a un cultivo posterior (Tropical Forages, 2008). En Argentina, en la región NEA su cultivo está difundido en el sector de pequeños productores, tanto para auto consumo y venta, como también en abono verde y alimento animal.

A partir de las informaciones presentadas hasta aquí, surge la hipótesis de que la inoculación de *Azotobacter sp*, *Pseudomonas sp* y *Bradyrhizobium sp* con potencial actividad promotora del crecimiento vegetal, tanto directo como indirecto, podrían aumentar la disponibilidad de los nutrientes presentes en el polvo de roca basáltica para las plantas.

Para tal efecto se planteó como objetivo general, medir el efecto de la inoculación de *Azotobacter sp*, *Pseudomonas sp* y *Bradyrhizobium sp* en la disponibilidad de nutrientes del polvo de roca de basalto, adicionada a un suelo de baja fertilidad, para dos cultivos: avena negra (*Avena strigosa*) y caupí (*Vigna unguiculata*). Con los siguientes objetivos específicos:

- Medir la biomasa total de caupí y avena, cultivados en maceta y campo con y sin aplicación de roca basáltica y, con y sin inoculación de microorganismos.
- Estimar la concentración de nutrientes en parte aérea de caupí y avena sembrados en maceta y campo con y sin aplicación de roca basáltica y, con y sin inoculación de microorganismos.
- Medir la concentración de nutrientes en suelo, luego de la cosecha de los cultivos con y sin aplicación de roca basáltica y, con y sin inoculación de los microorganismos.
- Estimar la influencia de la inoculación y la aplicación con roca basáltica sobre la actividad biológica global.
- Determinar el efecto de la inoculación y la incorporación de basalto sobre la micorrización espontánea en ambos cultivos y la infección de rizobios en caupí.

CAPÍTULO III

Microorganismos y basalto: Efecto sobre las variables productivas en avena negra (*Avena strigosa*), su micorrización y en la actividad biológica global del suelo. Ensayos en invernáculo y a campo.

Introducción

Con una población mundial que superará los 9000 millones de habitantes en 2050 según la FAO (2015), junto al uso intensivo de la tierra, la competencia por agua y los cambios a nivel climático, llevan a la necesidad de aumentar los rendimientos y calidad de los cultivos utilizando los suelos dedicados a la producción actualmente y con insumos aceptables para los sistemas de producción orgánica. De esta manera, representa una demanda creciente la búsqueda de fuentes alternativas de nutrientes para la fertilización del suelo (Tavares et al. 2018; FAO, 2015), además del uso de herramientas conjuntas que mejoren o mantengan la calidad del suelo, como abonos orgánicos y cultivos de servicios.

En Brasil se hicieron diversos trabajos asociando el uso de polvo de rocas con abonos verdes o incluso con la aplicación de estiércoles y materiales compostados buscando incrementar la actividad microbiana en suelos bajo cultivo (Lopes Motizuki et al., 2014; Camargo et al., 2012; Carvalho et al. 2011). El polvo de basalto, mencionado como un agromineral con potencial fertilizante aporta principalmente micronutrientes y es un insumo utilizado dentro de los sistemas de producción sustentables ambientalmente. Sin embargo, es un material que presenta lenta disponibilidad de nutrientes, donde el desafío es mejorar la actividad de meteorización para una mayor eficiencia como fertilizante y remineralizante del suelo.

Dentro de los cultivos de servicios es importante la búsqueda de especies de acuerdo al objetivo que se desea. Franchini et al. (2004) en su ensayo con varios cultivos de cobertura, como lupino, vicia y avena negra, entre otros, observaron la eficiencia para absorber fósforo a través de las raíces ubicadas en el estrato superior y transportar hacia las raíces presentes en las capas del subsuelo, siendo el cultivo de vicia el más eficiente como portador de P en las raíces desde la capa superficial hasta las capas inferiores favoreciendo una mayor extensión del sistema radical. En otro estudio, se encontró que el uso de avena negra como cultivo de cobertura proporcionó fósforo disponible al cultivo de vid como sucesión, concluyendo que el cultivo de avena negra tiene mecanismos que contribuyen solubilizar rocas fosfóricas (Melo et al., 2018).

En la región del noreste argentino, el cultivo de avena negra representa una alternativa viable para sistemas de pastoreo, destacada por su rusticidad, buena producción de forraje y siembra temprana. En la provincia de Corrientes se destina a pastoreo directo por la producción temprana de forraje, así como abono verde en rotaciones cortas.

Como se destaca en algunos trabajos, gran parte del ciclaje de nutrientes ocurre en la rizósfera de las plantas, por lo que la solubilización de los minerales es un proceso directamente relacionado a la actividad biológica presente en el suelo (Almeida et al., 2006; Frioni 2006; Harley y Gilkes, 2000). Por ello, el manejo del polvo de roca será más efectivo cuando se realice de forma conjunta con prácticas culturales que estimulen la microbiota del suelo (Hinsinger et al., 2001), como el uso de abonos verde e inoculantes microbianos con potencial solubilizador de elementos minerales; teniendo en cuenta la complejidad del basalto en composición y tamaño de partícula, el ambiente en el cual

son aplicados; por lo cual resulta importante el estudio de materiales de diferentes orígenes y en diversos ambientes (Ramos Gindri et al., 2014).

Materiales y método

Se realizaron dos ensayos en dos años consecutivos. El primer año se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias, en el invernáculo de la Cátedra de Microbiología Agrícola y; el segundo año a campo en lotes ubicados en la Escuela Regional de Agricultura, Ganadería e Industrias Afines (E.R.A.G.I.A.), ambos en la temporada otoño invierno.

Los microorganismos utilizados fueron dos productos comerciales, conteniendo *Pseudomonas fluorescens* y *Bradyrhizobium japonicum* respectivamente; y un aislamiento A3 (*Azotobacter sp.*) obtenido en la Cátedra de Microbiología Agrícola.

El polvo de basalto utilizado es un residuo de la extracción y procesamiento de la roca de basalto de una cantera ubicada en Cruzú Cuatía (Ruta N° 119 Km 43300), provincia de Corrientes, clasificada según Madsen et al. (2018) como una cantera de alto contenido de óxido de titanio. La granulometría del polvo de basalto fue <0,5 mm, utilizado en una dosis equivalente a 5 t ha⁻¹, el análisis de nutrientes se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. *Análisis de macro y micro-elementos total del polvo de basalto**

| N | P | K | Ca | Mg | Fe | Cu | Mn | Zn |
|-------------|------|------|------|------|------|---------------|-----|----|
| -----%----- | | | | | % | -----ppm----- | | |
| 0,02 | 0,18 | 0,06 | 1,05 | 0,10 | 3,76 | 140 | 130 | 30 |

*Análisis de contenido total realizado en el Centro Tecnológico de Producción (CETEPRO), provincia de Corrientes. K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn por absorción atómica. P por el método de Murphy y Riley. N en digestión ácida.

La distribución de tratamientos fue mediante un arreglo factorial (Tabla 2):

1. Inoculantes, con cuatro niveles (tres inóculos de PGPR más un testigo sin inocular); y
2. Polvo de roca de basalto, con dos niveles (con aplicación y sin aplicación).

Tabla 2. *Esquema de los tratamientos*

| Inoculación | Polvo de basalto | Tratamientos |
|-----------------------|------------------|--------------|
| <i>Azotobacter</i> | Sin aplicación | Az sb |
| <i>Pseudomonas</i> | | Ps sb |
| <i>Bradyrhizobium</i> | | Br sb |
| Sin inoculación | | Co sb |
| <i>Azotobacter</i> | Con aplicación | Az cb |
| <i>Pseudomonas</i> | | Ps cb |
| <i>Bradyrhizobium</i> | | Br cb |
| Sin inoculación | | Co cb |

Ensayo de avena en macetas:

1.1 Suelo y contenedores

Se utilizó como sustrato suelo extraído de un lote con pasturas naturales situado en la localidad de Santa Ana, Corrientes (Latitud 27.464824, Longitud 58.658182). El

suelo se corresponde a la Serie Ensenada Grande, entisoles de baja fertilidad y baja retención de agua. El muestreo se realizó hasta una profundidad de 20 cm, siguiendo la metodología citada por Prause (2006). En la tabla 3 se muestran los resultados del análisis físico-químico.

Tabla 3. *Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos**

| pH | P | K | Ca | Mg | Fe | Cu | Mn | Zn | Corg | N total | Textura** |
|------|------|--|------|------|-------|---------------|-------|------|---------|---------|-----------|
| | ppm | ---Cmol _c .Kg ⁻¹ --- | | | | -----ppm----- | | | ---%--- | | |
| 6,20 | 2,20 | 0,10 | 2,80 | 0,70 | 25,34 | 1,31 | 36,64 | 3,18 | 0,23 | 0,01 | Arenosa |

* Análisis realizado en el Instituto Agrotécnico Pedro M. Fuentes Godo, FCA-UNNE. pH: potenciométrico, relación suelo:agua 1:2,5; para Carbono Orgánico: Walkey-Black; P: Bray Kurtz I; Ca, Mg: complejometría con EDTA; y K: fotometría de llama. Análisis de micronutrientes realizado en el Centro Tecnológico de Producción (CETEPRO): Fe, Cu, Mn, Zn por absorción atómica.

** Composición: 85% de arena; 15% de limo y 0% de arcilla.

1.2 Material biológico

Se utilizaron semillas de *Avena strigosa* (avena negra) con un poder germinativo del 85%.

Los microorganismos utilizados y su concentración fueron:

- *Pseudomonas fluorescens* con un título de 1×10^9 UFC . ml⁻¹
- *Bradyrhizobium japonicum* con un título de 1×10^9 UFC ml⁻¹
- *Azotobacter sp* cultivada en solución salina de Winogradsky libre de nitrógeno, con un título final a la inoculación de $1,87 \times 10^7$ UFC ml⁻¹

1.3 Armado y diseño experimental del ensayo

El ensayo se estableció en macetas de 5 L de capacidad conteniendo como sustrato el suelo muestreado. El polvo de basalto se aplicó a la mitad de las unidades experimentales en una dosis equivalente a 5 t ha^{-1} ($8,9 \text{ g maceta}^{-1}$), incorporando los primeros 5 cm del suelo (Bamberg et al., 2013). La dosis seleccionada fue a partir de diferentes trabajos (Santos et al. 2015; Melo et al. 2012; Beneduzzi, 2011), buscando que sea de fácil aplicación, no llegando a dosis demasiado altas, que provoquen nubes densas por ser un polvo fino.

La siembra se realizó en otoño, colocando 9 semillas por macetas, las cuales germinaron entre los 7-10 días. A las 3 semanas de la siembra se realizó la inoculación por riego, para ello se aplicó 1 ml de cada inoculante por maceta.

Se utilizó un diseño completo al azar conformado por los 8 tratamientos con 5 repeticiones por cada uno de ellos, quedando de esta forma un total de 40 macetas o unidades experimentales. El arreglo factorial fue discriminado en la tabla 2.

1.4 Evaluaciones realizadas

Se midieron las variables biométricas: altura desde la base hasta el extremo foliar, número de hojas y número de macollos (Figuras 1). A los 60 días posteriores a la inoculación (dpi), se realizó la extracción de las plantas por bloques, separando parte aérea y radical de las mismas por maceta (Figura 2), se midió volumen de raíces por

maceta, y una porción de las mismas fue conservada para la tinción y posterior observación de micorrizas en microscopio (Phillips y Hayman, 1970). Luego, tanto la parte aérea y radical fueron acondicionadas para su secado en estufa a 60°C; obteniendo el peso seco total y los pesos de cada fracción, vástago o parte aérea y parte radical.

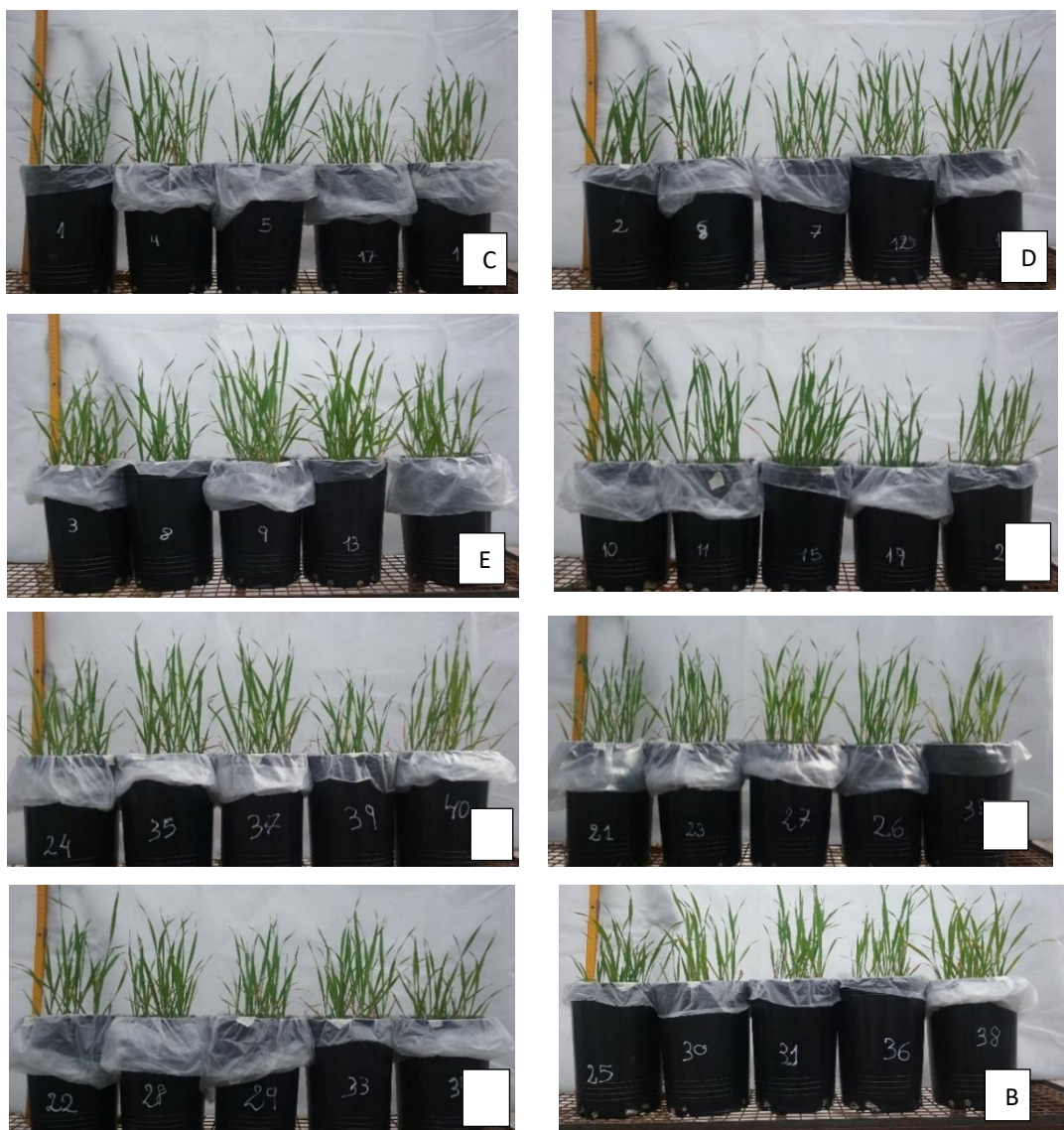


Figura 1. Cultivo de avena en macetas a los 60 días pos-siembra. Por tratamientos: A: CoSb, B: BrSb, C: PsSb, D: AzSb, E: AzCb, F: CoCb, G: BrCb, H: PsCb.

El suelo de las macetas fue acondicionado y secado para la determinación de la actividad biológica global (Frioni, 2011) y enviado a laboratorio para su análisis físico químico. Además, se tomaron muestras del material foliar, y fueron enviadas a laboratorio para el análisis de macro y micronutrientes.



Figura 2. A: Plantas de avena a los 80 días pos-siembra. B: Extracción de las plantas de una maceta.

Ensayo de avena en condiciones de campo:

1.5 Condiciones ambientales

El ensayo se realizó en un lote ubicado en la Escuela regional de agricultura, ganadería e industrias afines-ERAGIA (27°28'48"S 58°46'20"W), suelo perteneciente a la serie Ensenada Grande, ubicado en Corrientes Capital, Provincia de Corrientes (Figura 3). El lote fue fertilizado una semana antes a la siembra con 150 kg de urea ha⁻¹. Los datos físico-químicos del suelo se muestran en la tabla 4 y los datos meteorológicos durante el período de ensayo se encuentran en la tabla 5.

Tabla 4. *Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos**

| pH | P | K | Ca | Mg | Fe | Cu | Mn | Zn | Corg | N total | Textura** |
|------|-------|---|------|------|------|---------------|------|------|---------|---------|-----------|
| | ppm | ----Cmol _c Kg ⁻¹ ---- | | | | -----ppm----- | | | ---%--- | | |
| 5.90 | 10,50 | 0,10 | 4.00 | 1.40 | 5.39 | 0,92 | 6.80 | 2.99 | 0,70 | 0,07 | Arenosa |

* Análisis realizado en el Instituto Agrotécnico Pedro M. Fuentes Godo, FCA-UNNE. pH: potenciométrico, relación suelo:agua 1:2,5; para Carbono Orgánico: Walkey-Black; P: Bray Kurtz I; Ca, Mg: complejometría con EDTA; y K: fotometría de llama. Análisis de micronutrientes realizado en el Centro Tecnológico de Producción (CETEPRO): Fe, Cu, Mn, Zn por absorción atómica.

** Composición: 85% de arena; 15% de limo y 0% de arcilla.

Tabla 5. Registros de las precipitaciones medias mensuales y temperaturas mínimas y máximas mensuales en el período del ensayo*.

| | Abr | May | Jun | Jul | Ago |
|----------------------------------|--------|--------|-------|------|-------|
| Precipitación media mensual (mm) | 573,70 | 257,30 | 81,80 | 7,40 | 77,80 |
| Temperatura Mín. mensual (°C) | 9,50 | 11,70 | 6,10 | 2,00 | 8,2 |
| Temperatura Max. Mensual (°C) | 31,80 | 30,30 | 29,7 | 32,5 | 36,4 |
| Período del ensayo | S | | | | M |

*Estación meteorológica automática instalada en la sede del Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (ICAA) (Latitud 27° 28' 18" S 58° 49' 20" W y su Altitud 59 m)-Período 2017. S: siembra; M: muestreo.

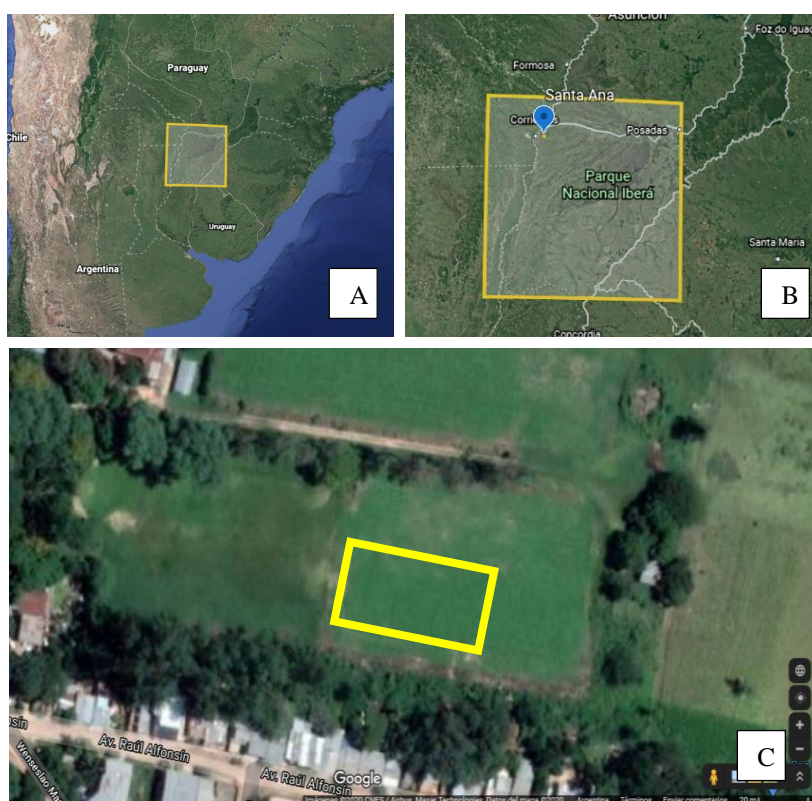


Figura 3. Vista satelital. A: Provincia de Corrientes, Argentina. B: punto de ubicación de la ciudad de Corrientes. C: Lote remarcado en amarillo. Adaptado de <https://earth.google.com/web/@-27.47947277,-58.77321832,68.80255411a,258.54681661d,34.99999823y,0h,0t,0r/data=MicKJQojCiExQmRuaHp5MEIHMkFVbmJ2bnY2eVE1cMtZI9XQjBkS1c6AwoBMA?authuser=0>, Todos los derechos reservados 2020 por Google. Adaptado con permiso del autor.

1.6 Material biológico

El ensayo se realizó sobre un cultivo de *Avena strigosa* (avena negra) sembrada con una densidad de 80 kg ha⁻¹. A los 30 días posteriores a la siembra (dds) las plantas presentaban una altura promedio de 25 cm y 1-2 macollos, momento en el cual se realizó la inoculación de los microorganismos, mediante el uso de un dispositivo pulverizador posterior a la aplicación del polvo de basalto, el cual fue aplicado en superficie. Las dosis utilizadas fueron las equivalentes y recomendadas por kilogramo de semilla, y llevadas con agua a un volumen final de 250 ml m²⁻¹.

La concentración de los microorganismos fue la siguiente:

- *Pseudomonas fluorescens* 1×10^9 UFC ml^{-1} (8 ml kg^{-1} semilla)
- *Bradyrhizobium japonicum* 1×10^{10} UFC. ml^{-1} (2 ml kg^{-1} semilla)
- *Azotobacter sp* cultivada en solución salina de Winogradsky libre de nitrógeno, con un título final a la inoculación de 1.26×10^6 UFC ml^{-1} (16ml kg^{-1} semilla)

1.7 Armado y diseño experimental del ensayo.

El diseño experimental se correspondió a un arreglo factorial distribuido en bloques al azar (DBA) con tres repeticiones (Tabla 1). Se armaron parcelas de 1 m^2 delimitando sus extremos con estacas; el espacio entre parcelas fue de 1m de distancia. Los tratamientos se distribuyeron al azar dentro de cada bloque constituido por 8 parcelas, quedando de esta manera delimitada 24 parcelas o unidades experimentales.

El polvo de basalto se aplicó a la mitad de las unidades experimentales espolvoreando sobre el cultivo (Figura 4) en una dosis de 3 kg m^{-2} (equivalente de 5 t ha^{-1}).

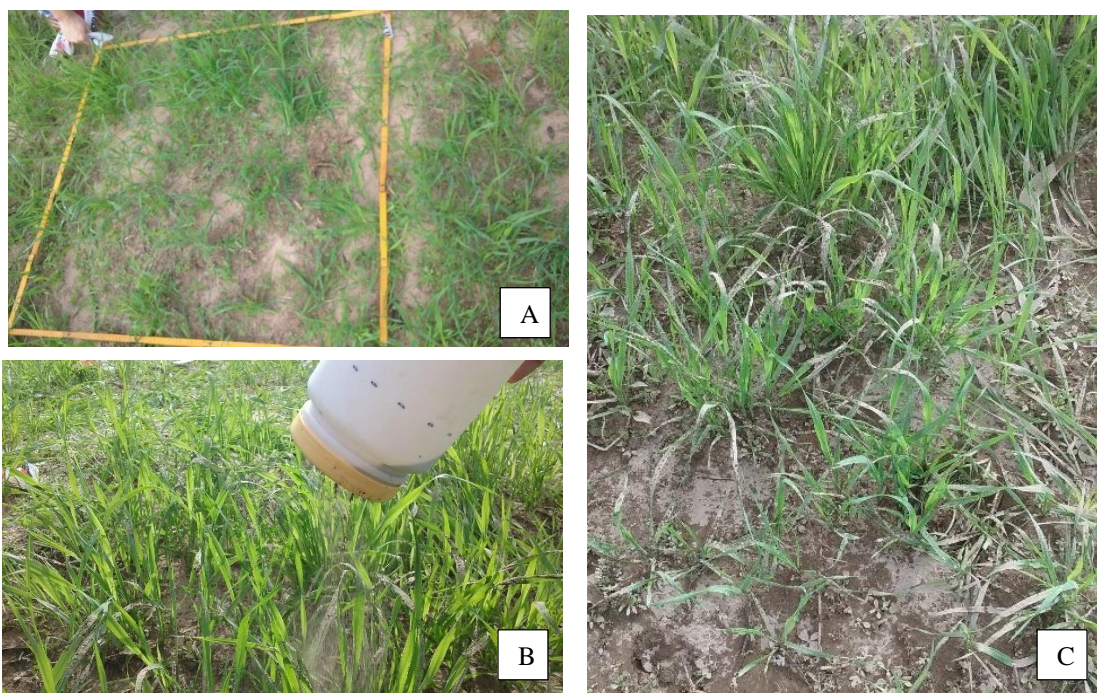


Figura 4. A- Marcación de la parcela B: aplicación del polvo de basalto sobre el cultivo implantado C: cultivo con el polvo de basalto sobre las hojas.

1.8 Evaluaciones realizadas

A los 70 días posteriores a la aplicación de los tratamientos (ddt) y 100 dds se finalizó el ensayo con el muestreo final del cultivo en el estado de floración. Se tomó al azar mediante un cuadrado de madera, una muestra de $0,20 \times 0,20 \text{ m}$ ($0,04 \text{ m}^2$) de cada parcela, recolectando plantas y suelo a una profundidad de muestreo de $0,10 \text{ m}$ (Figura 5), de esta manera se obtuvieron suelo para su posterior análisis químico y, muestras de raíces para la tinción y posterior observación de micorrizas.

Las plantas fueron acondicionadas para la obtención de peso seco y se tomaron muestras foliares para el análisis de nutrientes.



Figura 5. Estado de las plantas de avena al momento de la cosecha de estas. De izquierda a derecha: Az*Sb, Br*Sb, Az*Cb, Br*Cb.

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a pruebas de normalidad (test de Shapiro Wilks modificado) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levene). En ausencia de normalidad o cuando la varianza residual no fue homogénea en la escala original las observaciones referidas a nutrientes y actividad biológica global fueron transformadas mediante la función $x^{0.25}$ y las variables biométricas y las referidas a micorrización fueron transformadas mediante la función $x = \sqrt{x}$.

Se realizó un Análisis de la Varianza (ANOVA) factorial y un análisis de comparación de medias (Test de Tukey, $p \leq 0,05$); además de un análisis multivariado de componentes principales (ACP). Se empleó el software InfoStat (2017).

Resultados y discusión

Ensayo en macetas:

Las variables biométricas medidas en avena mostraron significancia dentro del análisis de varianza para los efectos principales, basalto e inoculación en la variable número de hojas, basalto en la variable altura y, no se presentaron efectos significativos en la interacción (tabla 6).

En el análisis de comparación de medias (tabla 7) muestra a la inoculación con *Pseudomonas*, para la variable número de hojas, significativamente mayor a los demás niveles dentro del factor inoculación. Este resultado coinciden con lo obtenido por Brennecke et al. (2016) donde la inoculación con *Pseudomonas* tanto por semilla como por riego sobre *Brachiaria*, incrementó el número de hojas por macollo. En cuanto a la altura y volumen radical dentro del factor inoculación, no evidenciaron diferencias significativas. El factor basalto tuvo una tendencia negativa con la aplicación de éste, para las variables número de hojas y altura, con valores significativamente menores respecto a la ausencia de basalto (sb), al igual que en volumen radical, aunque la diferencia no fue significativa. En cuanto al efecto interacción, *Pseudomonas* sin agregado de basalto fue mayor para la variable número de hojas frente a los demás tratamientos. La altura de la planta y el volumen radical no mostraron diferencias

significativas ($p>0,05$). Si bien *Pseudomonas* es probada como biosolubilizadora para el basalto, es un microorganismo promotor del crecimiento por producción de auxinas.

El análisis de varianza para los parámetros de biomasa no reveló efectos significativos en los efectos principales como en la interacción de los mismos (tabla 6). Las medias obtenidas en producción de biomasa total (BT), peso seco vástago (PSV) y peso seco radical (PSR) para ambos son mostradas en la tabla 8. Para el factor basalto se observa una tendencia a valores ligeramente menores con el uso de este, sin llegar a ser significativo estadísticamente.

Tabla 6

Análisis de varianza para las variables biométricas del ensayo de avena en maceta

| | N° hojas | Altura | VR | BT | PSV | PSR |
|----------------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | <0,0001* | 0,0348* | 0,3428 ^{ns} | 0,2168 ^{ns} | 0,3575 ^{ns} | 0,1547 ^{ns} |
| Inoculación | 0,0001* | 0,9058 ^{ns} | 0,5477 ^{ns} | 0,9132 ^{ns} | 0,9765 ^{ns} | 0,5289 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,1698 | 0,3252 ^{ns} | 0,8984 ^{ns} | 0,7282 ^{ns} | 0,6405 ^{ns} | 0,9177 ^{ns} |
| CV | 11,57 | 16,31 | 17,57 | 27,38 | 34,13 | 25,53 |

VR: volumen radical; BT: biomasa total; PSV: peso seco vástago; PSR: peso seco radical. ns: no significativo *significativo con $p<0,05$

Tabla 7

*Valores promedios de las variables biométricas del ensayo de avena en macetas**

| Factores de Variación | N° Hojas | ALTURA | VR |
|----------------------------|-----------------------------|----------|----------|
| | Número planta ⁻¹ | ---cm--- | ---ml--- |
| Inoculación | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 5.44 B | 27.52 A | 34.00 |
| <i>Pseudomonas</i> | 6.54 A | 27.85 A | 36.80 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 5.28 B | 28.17 A | 38.40 |
| Control | 5.64 B | 28.03 A | 38.90 |
| Basalto | | | |
| Sin basalto | 6.17 A | 28.58 A | 36.40 |
| Con basalto | 5.28 B | 27.21 B | 37.65 |
| Basalto*inoculación | | | |
| Co*sb | 5.84 B | 27.88 A | 38.20 |
| Az*sb | 5.76 B | 27.99 A | 32.40 |
| Br*sb | 5.76 B | 29.11 A | 39.00 |
| Ps*sb | 7.32 A | 29.33 A | 36.00 |
| Co*cb | 5.44 B | 28.18 A | 39.60 |
| Az*cb | 5.12 B | 27.06 A | 35.60 |
| Br*cb | 4.80 B | 27.22 A | 37.80 |
| Ps*cb | 5.76 B | 26.38 A | 37.60 |

*Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p>0,05$). VR (volumen radical)

Tabla 8

Valores medios por factor de las variables de producción de avena en macetas

| Factores | BT | PSV | PSR |
|-----------------------|---------------------------|------|------|
| | g MS maceta ⁻¹ | | |
| <i>Azotobacter</i> | 5.97 | 3.19 | 2.79 |
| <i>Pseudomonas</i> | 6.49 | 3.30 | 3.19 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 6.29 | 3.08 | 3.21 |
| Control | 6.41 | 3.16 | 3.26 |
| Sin basalto | 6.63 | 3.34 | 3.29 |
| Con basalto | 5.95 | 3.02 | 2.93 |

BT (biomasa total); PSV (peso seco vástago); PSR (peso seco radical).

La producción en biomasa total, vástago y raíz para los tratamientos evaluados es graficada en la figura 6. Se observa una leve tendencia a una producción más alta en ausencia de basalto para la mayoría de los tratamientos, aunque no hubo efecto significativo en la interacción. Estos resultados son coincidentes a lo obtenido por Silva et al. (2022), quienes no hallaron diferencias en el rendimiento de avena cultivado en dos zonas de Brasil, bajo diferentes dosis de basalto originarios de la formación de Serra Geral. Kelland et al. (2020) tampoco lograron cambios significativos en la biomasa de vástago en sorgo, bajo aplicación de polvo de roca basáltica luego de 120 días, aunque si tuvieron un aumento en el rendimiento de granos a una dosis de basalto de 10 kg m⁻². Beneduzzi (2011) trabajando con cultivos continuos de *Phaseolus vulgaris* (2 siembras) y *Avena strigosa* (1 siembra), con una única aplicación de basalto de 5 t ha⁻¹ al inicio del primer cultivo, obtuvo mayor producción de biomasa seca en avena; lo que puede deberse al efecto de solubilización que pudieron aportar los cultivos anteriores, por los ácidos orgánicos producidos en sus raíces, sobre los nutrientes presentes en el basalto, además del efecto residual del mismo. Esto lleva a plantear la necesidad de mayor tiempo de incubación con el basalto en el suelo para el cultivo de avena, así como lo menciona Carvalho et al. (2018) quienes señalan que los resultados desfavorables al uso de rocas en la agricultura se asocian principalmente a experimentos a corto plazo.

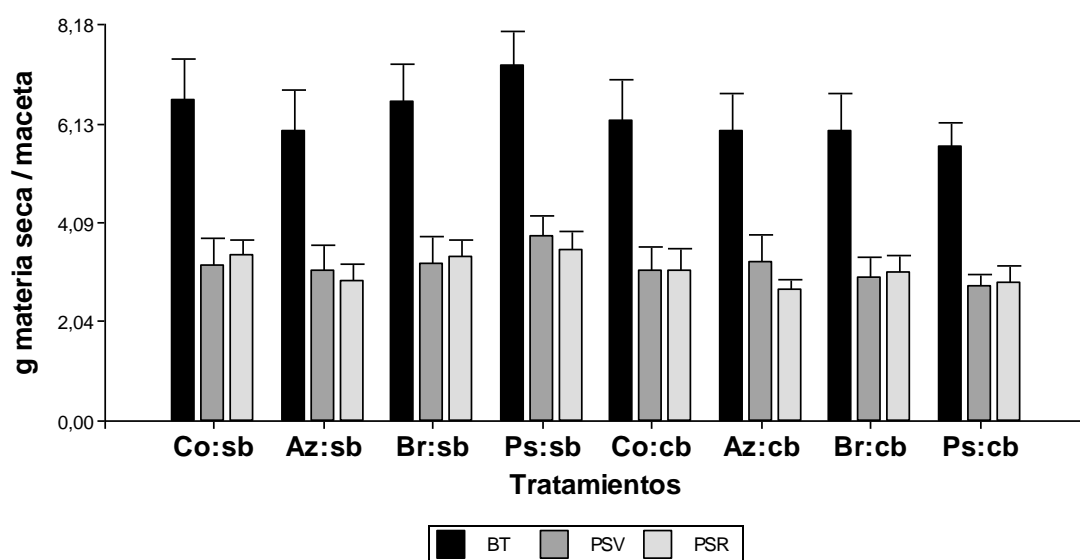


Figura 6. Materia seca total, de vástago y raíz en avena negra en macetas. BT (biomasa total); PSV (peso seco vástago); PSR (peso seco radical).

El análisis de varianza realizado para el contenido de nutrientes a nivel foliar no mostró efectos principales ni interacción significativa entre los datos (tabla 9), en el caso del Mg, no se verificó variabilidad ya que todas la observaciones dieron la misma concentración de ese macronutriente (3 g kg⁻¹). Los valores medios obtenidos para cada macronutriente se presentan en la tabla 10, encontrándose niveles de N y P por debajo del nivel de suficiencia mostrados por Montaña Carrasco et al. (2017) para avena forrajera (*Avena sativa*). Si se observa el contenido inicial del suelo, tanto N y P presentaron valores bajos, por lo cual es de esperarse este resultado en el contenido foliar sin un aporte externo, debido a que el polvo de basalto de la región, generalmente no es fuente de estos nutrientes (Madsen et al., 2018).

Grecco et al. (2015) evaluaron diferentes tipos de fertilización agromineral y su efecto residual sobre *Avena strigosa*, y compararon sus resultados con los rangos de suficiencia en tejido foliar en avena, para los nutrientes K (15-30 g Kg⁻¹), Ca (2,5-5 g Kg⁻¹) y Mg (1,5-5 g Kg⁻¹), obteniendo niveles acordes a estos rangos para Ca y Mg no así

en K. Comparando con los resultados obtenidos en el presente estudio, el contenido de K y Mg se encuentran dentro de los niveles mencionados, si bien este último está mejor en relación al K, que se halla alrededor del límite inferior. En cambio, el contenido de Ca duplica al límite superior de suficiencia mencionado en dicho trabajo, sin hacer diferencias entre el uso o no de basalto, por lo que el suelo fue un aporte de este nutriente. Kelland et al. (2020) después de 120 días de un cultivo de sorgo, no tuvieron incrementos significativos de K, Mg y P, aunque si en Ca, bajo aplicación de polvo de roca basáltica. Santi et al. (2003) analizaron la composición foliar en avena negra bajo diferentes dosis de nitrógeno sobre un suelo Argisol rojo, con niveles de nutrientes más altos al contenido del suelo en el presente estudio, obteniendo para el tratamiento sin adición de fertilizante valores superiores de N y P, contenido similar en K y valores de Ca y Mg menores a los obtenidos en el presente trabajo. Esto indica que se debería de pensar en una fertilización mineral para adecuar el contenido en los nutrientes que resultaron bajar en el suelo y que no son potencialmente aportados por el basalto, teniendo en cuenta que no solo el cultivo los tomaría sino también toda la microflora presente en el suelo, activandola para aportar a la biosolubilización.

Tabla 9

Análisis de la varianza para macronutrientes en hojas - ensayo de avena en macetas

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Basalto | 0,0955 ^{ns} | 0,1844 ^{ns} | 0,9224 ^{ns} | 0,8191 ^{ns} | s/d |
| Inoculación | 0,1378 ^{ns} | 0,3632 ^{ns} | 0,2593 ^{ns} | 0,5063 ^{ns} | s/d |
| Inoculación*basalto | 0,0952 ^{ns} | 0,1079 ^{ns} | 0,5716 ^{ns} | 0,1216 ^{ns} | s/d |
| CV | 11,70 | 22,55 | 11,70 | 12,62 | 0,00 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 10.

Concentración promedio de macronutrientes en hojas - ensayo de avena en macetas

| Factores de variación | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------|----------|-------------------------------|-----------|-----------|
| | | | -----g kg ⁻¹ ----- | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 4,50 | 0,20 | 18,70 | 13,80 | 3,00 |
| <i>Pseudomonas</i> | 2,80 | 0,20 | 16,80 | 13,30 | 3,00 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 3,80 | 0,20 | 18,30 | 13,70 | 3,00 |
| Control | 4,40 | 0,20 | 16,70 | 14,80 | 3,00 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 4,30 | 0,20 | 17,60 | 14,00 | 3,00 |
| Con basalto | 3,40 | 0,20 | 17,70 | 13,80 | 3,00 |
| Basalto*Inoculación | | | | | |
| Co*sb | 3,80 | 0,30 | 16,30 | 16,30 | 3,00 |
| Az*sb | 4,60 | 0,20 | 19,70 | 13,00 | 3,00 |
| Br*sb | 5,50 | 0,20 | 18,00 | 13,00 | 3,00 |
| Ps*sb | 3,50 | 0,10 | 16,30 | 13,70 | 3,00 |
| Co*cb | 4,90 | 0,10 | 17,00 | 13,30 | 3,00 |
| Az*cb | 4,50 | 0,20 | 17,70 | 14,70 | 3,00 |
| Br*cb | 2,10 | 0,20 | 18,70 | 14,30 | 3,00 |
| Ps*cb | 2,10 | 0,20 | 17,30 | 13,00 | 3,00 |

Los micronutrientes analizados, al igual que en macronutrientes, no mostraron efectos significativos para el análisis de la varianza (tabla 11). Si bien puede observarse en los contenidos medios, para ambos factores estudiados, que hubo un mayor contenido en hierro y manganeso con el uso de basalto (tabla 12), resultado esperable dado el alto contenido en Fe del polvo de basalto y Mn por parte del suelo y del basalto. En la interacción entre ambos factores, el contenido de Fe mostró valores superiores

con el uso de basalto combinado a los microorganismos *Azotobacter* y *Bradyrhizobium*; al contrario *Pseudomonas* fue superior sin basalto, aunque sin diferenciarse significativamente en ninguno de los casos. En el contenido de Mn, *Pseudomonas* y *Azotobacter*, mostraron diferencias entre el 40 a 50% a favor de la combinación con polvo de basalto.

Considerando el orden de los micronutrientes según el contenido foliar, se obtuvo una secuencia de Mn>Fe>Zn>Cu; igual al obtenido por Nakagawa y Rosolem (2005) estudiando el efecto de diferentes dosis de fósforo y potasio, dando, además, una tendencia similar a la secuencia considerada adecuada para avena, Fe > Mn > Zn > Cu. Montaña Carrasco et al. (2017) mencionan niveles de suficiencia en hoja para los micronutrientes Cu (5-25 mg kg⁻¹), Fe (40-150 mg kg⁻¹), Mn (25-100 mg kg⁻¹) y Zn (15-70 mg kg⁻¹); en este sentido encontramos que los niveles de Fe, Cu y Zn obtenidos en avena se encuentran dentro de estos rangos; en cambio, el contenido Mn en algunos tratamientos, principalmente los combinados con basalto, con valores que triplican al límite superior de suficiencia (tabla 12); lo que podría deberse a la concentración inicial del suelo para este micronutriente (tabla 3) y la disminución en su concentración en suelo al finalizar el ensayo (tabla 16), además de lo aportado por el basalto; similar a lo expuesto por Mackowiak et al. (2011) en avena forrajera, donde se vio el incremento en la concentración foliar y disminución en el contenido en suelo para este nutriente.

Tabla 11.

Análisis de la varianza para la variable micronutrientes en hojas estudiadas en avena negra para el ensayo en macetas

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,3146 ^{ns} | 0,6063 ^{ns} | 0,1238 ^{ns} | 0,6833 ^{ns} |
| Inoculación | 0,5834 ^{ns} | 0,8719 ^{ns} | 0,6963 ^{ns} | 0,5843 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,8601 ^{ns} | 0,6652 ^{ns} | 0,3176 ^{ns} | 0,7601 ^{ns} |
| CV | 7,87 | 9,71 | 8,97 | 13,33 |

ns: no significativo $p < 0,05$

Tabla 12

Concentración promedio de micronutrientes en hojas en avena-ensayo en macetas*

| Factores | Fe | Cu | Mn | Zn |
|---------------------------|-------|-------|--------|-------|
| -----ppm----- | | | | |
| Inoculantes | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 60,19 | 10,20 | 268,60 | 44,60 |
| <i>Pseudomonas</i> | 65,23 | 11,30 | 281,62 | 59,50 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 52,56 | 9,58 | 230,14 | 38,83 |
| Control | 67,72 | 11,03 | 299,32 | 53,97 |
| Basalto | | | | |
| Sin basalto | 57,94 | 10,24 | 241,78 | 51,96 |
| Con basalto | 64,90 | 10,81 | 298,06 | 46,49 |
| Basalto*Inoculante | | | | |
| Co*sb | 64,37 | 12,38 | 277,58 | 60,74 |
| Az*sb | 53,28 | 9,24 | 195,07 | 40,31 |
| Br*sb | 45,84 | 7,59 | 252,76 | 34,34 |
| Ps*sb | 68,27 | 11,78 | 241,70 | 72,45 |
| Co*cb | 71,06 | 9,67 | 321,06 | 47,21 |
| Az*cb | 67,09 | 11,16 | 342,13 | 48,88 |
| Br*cb | 59,27 | 11,58 | 207,52 | 43,31 |
| Ps*cb | 62,19 | 10,83 | 321,53 | 46,55 |

Como lo sucedido a nivel foliar, los macronutrientes en suelo no mostraron efectos principales ni interacción significativa en el análisis de varianza (tabla 13). El

contenido medio de macronutrientes se muestra en la tabla 14, donde pueden observarse los valores homogéneos entre tratamientos. Estos resultados son coincidentes a lo hallado por Hanisch et al. (2013) quienes no encontraron cambios en los tenores de macro y micronutrientes a los 9 meses post aplicación de dosis crecientes de basalto de 0 a 12 t ha⁻¹. Priyono y Gilkes (2004) mencionan que la roca de basalto con tratamiento de molienda en seco podría liberar hasta el 73 % de K al medio, en la tabla 14 puede observarse que los niveles de K no variaron entre tratamientos y tampoco respecto al nivel inicial del suelo. el contenido de nitrógeno y fósforo fue levemente superior respecto al suelo inicial, sin diferencias significativas entre el uso y no de basalto, esto pudo deberse al aporte rizosférico, ya que el contenido foliar no alcanzó el mínimo de suficiencia para avena. El único nutriente en suelo que presentó una disminución respecto al contenido inicial en suelo fue el Ca; Azinwi et al. (2022) en su trabajo, en el cual hallaron una disminución en el contenido de Ca y Mg respecto al testigo en suelo con un cultivo de remolacha azucarera bajo aplicación de polvo de basalto, fertilización orgánica e inorgánica, atribuyendo a que parte del Ca y Mg liberado al suelo por los diversos tratamientos podría haber sido absorbido por los cultivos; en este caso no hubo una diferencia entre tratamientos en el contenido de Ca.

Tabla 13

Análisis de la varianza para la variable macronutrientes en suelo para avena negra-ensayo en macetas

| | N suelo | P suelo | K suelo | Ca suelo | Mg suelo |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,1261 ^{ns} | 0,3679 ^{ns} | s/d | 0,3727 ^{ns} | 0,5645 ^{ns} |
| Inoculación | 0,6305 ^{ns} | 0,5429 ^{ns} | s/d | 0,5292 ^{ns} | 0,5773 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,8193 ^{ns} | 0,8202 ^{ns} | s/d | 0,9469 ^{ns} | 0,8825 ^{ns} |
| CV | 8,72 | 3,29 | 0.00 | 12,80 | 25,23 |

ns: no significativo $p < 0,05$

Tabla 14

Concentración promedio de macronutrientes en suelo para avena negra-ensayo en macetas

| Factores | N | P | K | Ca | Mg |
|---------------------------|------|------|-----------------------------------|------|------|
| | % | ppm | -----cmolc.kg ⁻¹ ----- | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 0,03 | 3.60 | 0,10 | 2.52 | 0,90 |
| <i>Pseudomonas</i> | 0,03 | 3.25 | 0,10 | 2.30 | 0,78 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 0,03 | 3.27 | 0,10 | 2.38 | 0,87 |
| Control | 0,02 | 3.32 | 0,10 | 2.53 | 0,75 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 0,03 | 3.43 | 0,10 | 2.49 | 0,85 |
| Con basalto | 0,02 | 3.28 | 0,10 | 2.38 | 0,80 |
| Basalto*Inoculante | | | | | |
| Co*sb | 0,03 | 3.43 | 0,10 | 2.57 | 0,80 |
| Az*sb | 0,03 | 3.53 | 0,10 | 2.63 | 0,87 |
| Br*sb | 0,03 | 3.47 | 0,10 | 2.40 | 0,90 |
| Ps*sb | 0,03 | 3.30 | 0,10 | 2.37 | 0,83 |
| Co*cb | 0,02 | 3.20 | 0,10 | 2.50 | 0,70 |
| Az*cb | 0,03 | 3.67 | 0,10 | 2.40 | 0,93 |
| Br*cb | 0,02 | 3.07 | 0,10 | 2.37 | 0,83 |
| Ps*cb | 0,02 | 3.20 | 0,10 | 2.23 | 0,73 |

El contenido de micronutrientes en suelo mostró efecto principal significativo en el análisis de la varianza (tabla 15) para el factor basalto en el elemento Cu, este micronutriente es importante activador enzimático en la fotosíntesis y en la respiración. Al realizar la prueba de comparación de medias se evidenció un incremento significativo para el contenido medio de Cu con el uso de basalto (tabla 16). Este resultado coincide con Sékula (2011), en su trabajo con seis años de muestreos, diferentes campañas de cultivos y con aplicación de basalto en dos dosis, junto al uso de un biofertilizante, sobre un suelo clasificado como latosol, quien obtuvo una concentración de Cu en suelo significativamente mayor con una dosis de 4 t ha^{-1} de polvo de basalto; además, y siguiendo la comparación a los resultados obtenidos en el presente trabajo; obtuvo contenidos mayores de P, K, Ca y Mg, tenores de Fe y Zn similares y, Mn con una concentración del 50% menos respecto a este trabajo. Es importante notar que esta mayor concentración significativa de Cu en suelo no se tradujo en un incremento en el contenido foliar de la avena, encontrando valores similares entre la aplicación y no de basalto, posiblemente resulte interesante esta fuente de Cu que queda en el suelo para posteriores cultivos; como así también la necesidad de evaluar si afectó de alguna forma la acumulación de biomasa seca, ya que aquellos con basalto presentaron una menor biomasa total, si bien los niveles de Cu obtenidos no afectarían a la toma de otros nutrientes, se debería profundizar en la respuesta al aporte de el mismo; Tiecher et al. (2016) exponen que en especies sensibles, contenidos foliares por encima de $15\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cu y $150\text{-}200 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn podrían provocar una reducción en el crecimiento de las plantas, habría que evaluar específicamente en avena niveles de sensibilidad; al igual que la aplicación, si distribuir mejor sobre todo el volumen de suelo en la maceta o dejar los primeros centímetros comparando a los resultados obtenidos en campo con el cultivo con raíces ya explorando el suelo. El contenido en Mn en suelo fue en promedio menor con el uso de basalto, y en el contenido foliar este elemento mostró un ligero incremento en los tratamientos combinados con basalto, de forma no significativa; esto podría indicar que un menor contenido en suelo pudo traducirse en un incremento en su absorción a nivel foliar, como se mencionó anteriormente en el trabajo de Azinwi et al. (2022) para Ca y Mg.

Los valores medios hallados en la interacción de basalto con los microorganismos, muestra en el contenido de Fe concentraciones ligeramente superiores en los tratamientos Control y *Bradyrhizobium*, con basalto versus sin basalto; en cambio *Pseudomonas* y *Azotobacter* tuvieron comportamiento inverso dando sin basalto > con basalto. Los niveles de Fe en todos los tratamientos son superiores al contenido inicial promedio del suelo, al contrario de lo obtenido para Zn y Mn, cuyas concentraciones disminuyeron respecto al análisis inicial del suelo. En Cu se observa una ligera tendencia a mayor contenido con el uso combinado con basalto, inclusive presenta un mayor incremento en la concentración respecto al contenido promedio inicial del suelo. Aunque en todos los casos las diferencias no tuvieron efectos significativos para el contenido de micronutrientes en suelo. Según Bolland y Baker (2000) la mayoría de los estudios han demostrado que cualquier pequeña mejora en las propiedades del suelo o el rendimiento de las plantas, solo se lograron cuando fueron aplicados cantidades muy grandes y poco económicas de los polvos de roca; como así también con tiempos largos de incubación (Gillman, 1980; Roschnik et al, 1967); causa que puede explicar la ausencia de respuesta en la productividad obtenida en el presente trabajo, teniendo en cuenta la posible disponibilidad para cultivos sucesivos, como así también incrementar el número de repeticiones.

Tabla 15

Análisis de la varianza para la variable micronutrientes en suelo para avena negra-ensayo en macetas

| | Fe suelo | Cu suelo | Mn suelo | Zn suelo |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,6758 ^{ns} | 0,0415* | 0,2089 ^{ns} | 0,6308 ^{ns} |
| Inoculación | 0,9237 ^{ns} | 0,9016 ^{ns} | 0,8187 ^{ns} | 0,6169 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,8218 ^{ns} | 0,8231 ^{ns} | 0,5768 ^{ns} | 0,2658 ^{ns} |
| CV | 16,28 | 7,45 | 6,74 | 3,88 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 16

Concentración promedio de micronutrientes en suelo para avena negra-ensayo en macetas

| | Fe | Cu | Mn | Zn | |
|---------------------------|---------------|------|----|-------|------|
| | -----ppm----- | | | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 38.30 | 1.32 | A | 10,91 | 1.27 |
| <i>Pseudomonas</i> | 43.37 | 1.34 | A | 10,10 | 1.30 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 44.78 | 1.34 | A | 10,19 | 1.35 |
| Control | 36.40 | 1.16 | A | 11.23 | 1.21 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 40,90 | 1.10 | B | 11.23 | 1.30 |
| Con basalto | 40,53 | 1.48 | A | 9.99 | 1.26 |
| Basalto*Inoculante | | | | | |
| Co*sb | 31.49 | 1,06 | A | 11.22 | 1.14 |
| Az*sb | 45.44 | 0,99 | A | 10,67 | 1.25 |
| Br*sb | 41.57 | 1.13 | A | 11.41 | 1.36 |
| Ps*sb | 45.11 | 1.21 | A | 11.62 | 1.46 |
| Co*cb | 41.32 | 1.26 | A | 11.25 | 1.28 |
| Az*cb | 31.16 | 1.65 | A | 11.16 | 1.30 |
| Br*cb | 48.00 | 1.55 | A | 8.97 | 1.34 |
| Ps*cb | 41.64 | 1.46 | A | 8.57 | 1.13 |

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Dentro de las variables microbiológicas medidas, la micorrización total obtenida no mostró significancia en el análisis de la varianza (tabla 17). En la figura 7 pueden apreciarse las diferentes estructuras de los hongos micorrícicos que establecieron simbiosis con la raíz de avena, si bien la presencia de arbusculos y vesículas pueden ser medidas, estas resultan muy dinámicas, pudiendo reabsorberse dentro de la célula vegetal, cambiando permanentemente durante el ciclo del cultivo. De la micorrización total, para el factor basalto, la presencia de hifas estuvo alrededor del 20%, arbusculos en un 7% con basalto y 12% sin basalto, siendo las vesículas inversa a la proporción de arbusculos. Los valores promedios de micorrización para el factor inoculación y el factor basalto sobre avena negra se muestran en la tabla 18. En la figura 8 se muestran la interacción entre los microorganismos y el polvo de basalto. La infección micorrícica total estuvo en un rango de 25 a 60 %, valores más bajos a los obtenidos por Correa et al. (2017) en avena negra (70-80%) bajo la misma dosis de polvo de basalto y microorganismos inoculados.

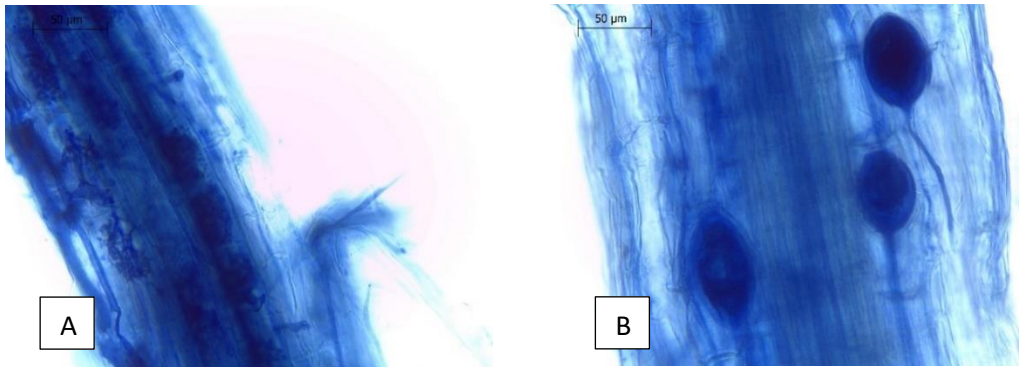


Figura 7. Estructuras observadas en microscopio Leica ICC50 aumento 40X. A: arbusculos presentes en las raíces de avena; B: vesículas presentes en las raíces de avena.

Tabla 17

Análisis de la varianza para la variable micorrización total

| | MT |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,8753 ^{ns} |
| Inoculación | 0,1499 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,1228 ^{ns} |
| CV | 26,68 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 18. Valores promedios por factores para la micorrización en avena negra-ensayo en macetas

| Factores | MT |
|-----------------------|-------|
| Inoculantes | |
| <i>Azotobacter</i> | 33.40 |
| <i>Pseudomonas</i> | 38.40 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 41.80 |
| Control | 55.40 |
| Basalto | |
| Sin basalto | 41.80 |
| Con basalto | 42.70 |

MT: micorrización total

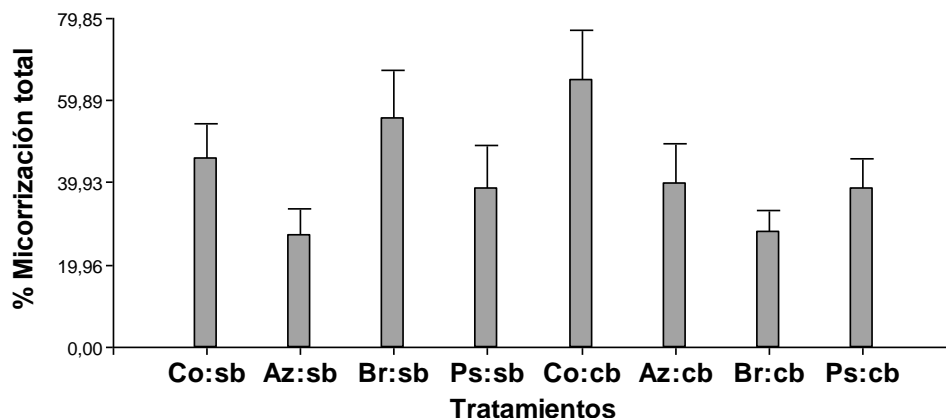


Figura 8. Medias obtenidas para la variable micorrización total en avena negra en macetas. MT: micorrización total.

Con las muestras de suelo obtenidas por maceta se determinó la actividad biológica global y el análisis de la varianza (tabla 19). En esta variable los resultados

promedios para el análisis por factor fueron similares y no marcaron una tendencia particular entre tratamientos (tabla 20). El producto de la actividad biológica global es un importante agente meteorizante, formando ácidos carbónicos que ayudarían a la solubilización de nutrientes. La combinación de los microorganismos con el basalto no modificó significativamente la actividad microbiana y por ende la producción de CO₂, mostrando similar actividad dentro de los tratamientos Control, *Azotobacter* y *Bradyrhizobium*, con y sin basalto, siendo *Pseudomonas* el de mayor incremento con el uso de basalto (figura 9). Resultados similares fueron los obtenidos por Souza et al. (2011) evaluando diferentes polvos de basalto en una dosis de 3 t ha⁻¹, sin lograr un efecto significativo en la actividad respiratoria del suelo. En cambio, Priyono et al. (2009) evaluó rocas silicatadas molidas en diferentes suelos obteniendo un incremento significativo en la actividad biológica en tres de los seis suelos evaluados. Estos resultados muestran poca respuesta de los microorganismos a la aplicación de basalto, por un lado es positivo que no se vea afectado negativamente la microflora presente, sin embargo tampoco provocó un estímulo significativo, que podría haber ayudado en la biosolubilización.

Tabla 19

Análisis de la varianza para la variable actividad biológica global (abg)

| | ABG |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,7856 ^{ns} |
| Inoculación | 0,8380 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,9470 ^{ns} |
| CV | 17,55 |

ABG: actividad biológica global ns: no significativo

Tabla 20

Medias por factores para la variable actividad biológica global en avena negra-ensayo en macetas

| Factores | ABG mgCO ₂ 100gsuelo ⁻¹ |
|-----------------------|--|
| <i>Azotobacter</i> | 3.67 |
| <i>Pseudomonas</i> | 4.53 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 4.92 |
| Control | 4.72 |
| Sin basalto | 4.22 |
| Con basalto | 4.70 |

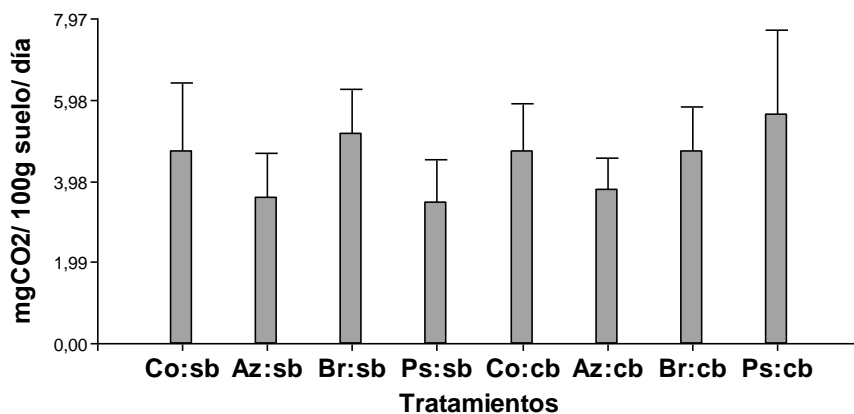


Figura 9. Medias obtenidas para la variable actividad biológica global en suelo del ensayo en avena negra en macetas

Ensayo en condiciones de campo:

El análisis de varianza para la producción en biomasa de avena negra a campo no mostró efectos significativos dentro de los factores como en la interacción (Tabla 21). Aunque mostró un comportamiento diferente respecto al dado en maceta para el factor basalto, con una mayor biomasa con el uso del mismo, según los datos mostrados en la tabla 22. En cuanto al factor inoculante el microorganismo que destacó fue *Pseudomonas* al igual que en el ensayo en maceta.

En la figura 10 se muestra la biomasa de avena negra obtenida por tratamiento. Como puede observarse, el uso de microorganismos incrementó la producción frente al control, y cuando la aplicación fue con basalto, el incremento fue mayor, con una máxima producción en la combinación *Pseudomonas* con polvo de basalto, aunque sin efectos significativos, al igual a lo obtenido por Silva et al. (2022) evaluando en dos zonas de Brasil el uso de diferentes dosis de basalto (0 a 10 tn ha⁻¹), quienes no obtuvieron diferencias estadísticas entre lugares ni entre dosis aplicadas sobre la biomasa de avena negra, aunque si observaron un incremento no significativo del 16% en la producción de avena con una dosis de 7 tn ha⁻¹ de basalto frente al tratamiento control, porcentaje de incremento similar al obtenido aquí, con un valor alrededor del 20% con uso de basalto frente a la ausencia del mismo. Assainar et al. (2020) evaluando el efecto de un fertilizante mineral de roca recubierto con un polímero con y sin un inoculante de múltiples especies sobre el crecimiento de trigo, en un suelo arenoso, encontraron al fertilizante mineral de roca con posibilidad de sustituir o complementar a fertilizantes solubles, pero no hubo beneficios en la inclusión del inoculante microbiano, al contrario de lo obtenido en este trabajo. Comparado a lo obtenido en avena, aquí el suelo presentó un nivel de P superior en suelo y un aporte de nitrógeno en presiembra, lo que podría haber mejorado la producción.

Tabla 21

Análisis de varianza para la variable producción de biomasa seca de la parte aérea en avena negra (g parcela⁻¹)

| Factores de variación | p-valor |
|----------------------------|----------------------|
| basalto | 0,0809 ^{ns} |
| inoculación | 0,1250 ^{ns} |
| Basalto*inoculación | 0,4375 ^{ns} |
| CV | 35,45 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 22

Valores promedios de la producción en materia seca (g parcela⁻¹) por factor

| Factores | BV g parcela ⁻¹ |
|-----------------------|-------------------------------|
| <i>Azotobacter</i> | 23,00 |
| <i>Pseudomonas</i> | 26,83 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 23,67 |
| Control | 15,50 |
| Sin basalto | 19,25 |
| Con basalto | 25,25 |

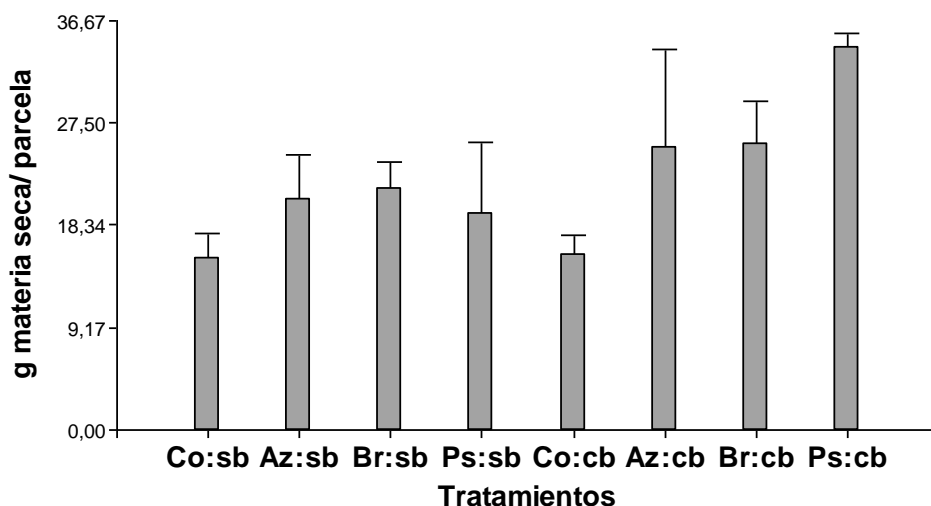


Figura 10. Medias obtenidas para la variable biomasa seca de vástago por parcela del ensayo avena negra en campo.

Los datos de producción obtenidos por planta fueron llevados a producción por hectárea (tabla 23); donde analizando por microorganismo con uso o no de basalto, se observa la superioridad en todos los casos con el uso del mismo, logrando duplicar la producción obtenida en el tratamiento *Pseudomonas* con basalto respecto a *Pseudomonas* sin basalto, además los valores de biomasa rondaron entre 3800 y 8500 kg ha⁻¹ aproximadamente. Estos rendimientos están por encima de los mencionados para la provincia de Corrientes por Borrajo et al. (2011) con valores promedios de 2500 kg ha⁻¹ durante la campaña 2003-2010 y los obtenidos por Royo y Brach (2016) para la provincia de Santa Fe con rindes de 4000 kg ha⁻¹. Borges Filho (2019) trabajó con diferentes blend de polvo de roca aplicados a los 23 días post siembra, a nivel foliar combinado con microorganismos eficientes o aplicados en forma separada en avena negra, sobre un suelo arcilloso, obteniendo rendimientos alrededor de 4000 kg ha⁻¹ con diferencias frente al testigo de 1000 kg ha⁻¹, se destaca este trabajo por la similaridad en la aplicación, ya que fue realizada post siembra al igual que lo hecho en campo en este trabajo. Wolschick et al. (2016) obtuvieron rendimientos de 9000 kg ha⁻¹ en avena negra como cultivo de cobertura también en un suelo arcilloso, valor levemente superior al tratamiento con mayor rinde para este ensayo (*Pseudomonas* con basalto). En otro ensayo en el cual evaluaron la respuesta de la avena negra al aporte de abonos orgánicos y fertilizante mineral tuvieron una producción de 602,78 kg ha⁻¹ de biomasa seca para el tratamiento control y 5166,67 kg ha⁻¹ de biomasa seca con agregado de abono orgánico (Vaz de Melo et al., 2011). Si se considera 6 t ha⁻¹, según lo mencionado por Alvarenga et al. (2001), como una cantidad adecuada de biomasa seca producida por la parte aérea de las plantas, para una buena tasa de cobertura del suelo en planteos de siembra directa; se puede decir que el uso combinado de microorganismos y basalto puede incrementar el rendimiento en avena negra, mejorando el aporte como cultivo de cobertura, teniendo en cuenta los resultados no significativos estadísticamente.

Tabla 23. Medias obtenidas para la producción por hectárea de avena negra*

| Tratamientos | BV |
|--------------|---------------------|
| | Kg ha ⁻¹ |
| Co*sb | 3833,33 |
| Az*sb | 5166,67 |
| Br*sb | 5416,67 |
| Ps*sb | 4833,33 |
| Co*cb | 3916,67 |
| Az*cb | 6333,33 |
| Ps*cb | 8583,33 |
| Br*cb | 6416,67 |

El contenido en macronutrientes a nivel foliar no mostró significancia estadística en el análisis de varianza (tabla 24). Los valores promedios obtenidos por factor y por interacción son mostrados en la tabla 25. Se destacan dentro del factor inoculación el tratamiento control para el contenido de nitrógeno y *Pseudomonas* en el contenido de potasio. Dentro del factor basalto, el contenido en macronutrientes fue similar y no mostraron una diferencia estadística a favor de alguno de ellos.

La concentración de macronutrientes a nivel foliar dentro de los tratamientos realizados pueden compararse a los obtenidos por Vaz de Melo et al. (2011) en el cultivo de avena negra, bajo diferentes fórmulas de fertilizante mineral y abono orgánico, con valores de nitrógeno, fósforo y potasio en el tratamiento sin fertilizante de 5 - 2 y 12 kg ha⁻¹, respectivamente, duplicando esos valores en el tratamiento con fertilizante más una dosis extra de nitrógeno en cobertura; y como se observa en la tabla 25, el contenido de nitrógeno y fósforo resultaron similares al tratamiento sin fertilizante, y el contenido de potasio ligeramente menor al resultado obtenido en el tratamiento fertilizado.

El contenido de P y Mg fueron similares a los obtenidos por Wolschik et al. (2016) en avena negra utilizada como cultivo de cobertura de un suelo arcillo-limoso; el contenido de nitrógeno representó un tercio de lo obtenido por este autor, aunque los valores de K y Ca fueron ampliamente superiores. Situación similar se observó con Santi et al. (2003) con avena negra bajo diferentes dosis de nitrógeno en forma de urea; donde el contenido de nitrógeno duplicó a los valores obtenidos en el presente trabajo en dosis utilizadas desde 0 a 80 kg Urea ha⁻¹, siendo razonable este resultado dado el aporte de nitrógeno; en cambio el P no difirió con lo obtenido aquí; y para K, Ca y Mg las concentraciones estuvieron muy por debajo de los tenores de nutrientes observados en este ensayo.

Como se mencionó en el ensayo de avena en maceta, Grecco et al. (2015) en su trabajo con diferentes tipos de fertilización agromineral y su efecto residual sobre *Avena strigosa*, consideró niveles de suficiencia en tejido foliar para los nutrientes K (15-30 g Kg⁻¹), Ca (2,5-5 g Kg⁻¹) y Mg (1,5-5 g Kg⁻¹), obteniendo por estos autores niveles acordes a estos rangos en Ca y Mg, no así en K. Al observar los datos en la tabla 25, resulta similar a lo obtenido en macetas, con un contenido Mg dentro de los rangos mencionados por el autor, el K alrededor del mínimo de suficiencia y el contenido de Ca triplicando el límite superior de suficiencia. En el suelo ensayado, la avena logró tener buena capacidad de reciclar nutrientes como K, Ca y Mg, y aunque tuvo un aporte inicial de nitrógeno, sería necesario un aporte mayor o distribuido en el ciclo de cultivo para mejorar el contenido del mismo en hojas. También considerar otras herramientas que mejoren la disponibilidad de nutrientes del basalto; Tavares et al. (2018) en su trabajo con fenolita en polvo y compost sobre brachiaria (*Urochloa decumbens*) concluyeron que la aplicación conjunta de la fonolita en polvo con compost orgánicos, ya sea como componente inicial de la mezcla o como aditivo de los compost estabilizados, es una estrategia que aumenta la liberación de nutrientes de la fuente mineral.

Tabla 24

Análisis de la varianza para la variable macronutrientes en hoja *en el ensayo de avena a campo*

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,7404 ^{ns} | 0,2011 ^{ns} | 0,3075 ^{ns} | 0,7765 ^{ns} | 0,0581 ^{ns} |
| Inoculación | 0,7198 ^{ns} | 0,7245 ^{ns} | 0,2535 ^{ns} | 0,8210 ^{ns} | 0,3953 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,6245 ^{ns} | 0,6288 ^{ns} | 0,0735 ^{ns} | 0,2200 ^{ns} | 0,2526 ^{ns} |
| CV | 14,96 | 23,70 | 10,61 | 3,87 | 15,19 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 25

Contenido promedio de macronutrientes foliar en el ensayo de avena a campo

| Factores | N foliar | P foliar | K foliar | Ca foliar | Mg foliar |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | -----g kg ⁻¹ ----- | | | | |
| Inoculación | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 4,60 | 2,30 | 18,92 | 18,50 | 3,30 |
| <i>Pseudomonas</i> | 4,90 | 2,70 | 19,05 | 18,20 | 3,00 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 4,60 | 2,70 | 17,27 | 18,30 | 3,50 |
| Control | 6,00 | 2,70 | 17,30 | 18,20 | 3,30 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 5,10 | 2,80 | 17,69 | 18,30 | 3,10 |
| Con basalto | 5,00 | 2,40 | 18,58 | 18,30 | 3,50 |
| Basalto*inoculación | | | | | |
| Co*sb | 5,30 | 3,00 | 16,33 | 18,00 | 3,00 |
| Az*sb | 4,50 | 2,30 | 19,47 | 19,00 | 3,30 |
| Br*sb | 4,60 | 2,70 | 17,80 | 18,00 | 3,00 |
| Ps*sb | 6,10 | 3,00 | 16,20 | 18,00 | 3,00 |
| Co*cb | 6,70 | 2,30 | 16,77 | 18,30 | 3,70 |
| Az*cb | 4,70 | 2,30 | 17,37 | 18,00 | 3,30 |
| Br*cb | 4,70 | 2,70 | 18,80 | 18,70 | 4,00 |
| Ps*cb | 3,80 | 2,30 | 17,20 | 18,30 | 3,00 |

Al realizar el análisis de varianza para la variable micronutriente se encontraron efectos principales significativos en los elementos Fe y Cu (tabla 26). El factor basalto influyó significativamente para estos microelementos con la aplicación de polvo de basalto, llegando casi a duplicar su contenido foliar promedio (tabla 27). En maceta si bien se obtuvieron mayores concentraciones en estos dos micronutrientes con el uso de basalto, las diferencias no alcanzaron a ser significativas; posiblemente el mayor contenido en fósforo en este suelo haya proporcionado un mejor crecimiento radical y, como toda gramínea, eficiente en producción de fitosideroforos a través del sistema radical para la toma principalmente de Fe, provocó una mayor concentración foliar de Fe y Cu. Nakagawa y Rosolem (2005) con diferentes dosis de fertilizantes conteniendo fósforo y potasio, sobre avena negra, obtuvieron valores ligeramente por encima de los encontrados en el presente trabajo para los elementos hierro y manganeso, y tenores inferiores para Zn y Cu, con una diferencia del 50% en este último microelemento.

Considerando la interacción de ambos factores, puede observarse en la mayoría de los nutrientes, que el uso combinado con basalto tuvo valores superiores a los tratamientos sin basalto dentro de cada microorganismo utilizado, aunque estas diferencias no alcanzaron a ser significativas estadísticamente. Al igual a lo observado en el ensayo en maceta, se mantuvo una secuencia Mn>Fe>Zn>Cu, dando una secuencia invertida en Fe>Mn, la cual es considerada como adecuada en avena (Nakagawa y Rosolem, 2005). Comparando las concentraciones obtenidas a los niveles de suficiencia en hoja por Montaña Carrasco et al. (2017), nuevamente el Zn, y Cu y Fe se encuentran dentro de esos rangos; exceptuando al Fe (nivel de suficiencia 40-150

mg kg⁻¹) en los tratamientos con basalto solo y combinado a *Bradyrhizobium* y *Pseudomonas*. En cuanto al Mn, vuelve a superar el nivel de suficiencia (25-100 mg kg⁻¹) como lo dado en maceta; sin embargo, el contenido inicial en suelo (tabla 4) fue inferior al contenido del suelo en maceta (tabla 3), de igual manera las concentraciones finales (tabla 31) estuvieron en la mayoría de los tratamientos con basalto ligeramente superiores al contenido inicial, posiblemente favorecido por el pH del suelo, con mayor disponibilidad para estos micronutrientes.

Es importante destacar que los polvos de basalto se caracterizan por su aporte en sílice, micronutrientes y en Ca y Mg de manera general; siendo la formación de Serra Geral que abarca la zona centro de Corrientes rica en basaltos con alto contenido en Fe, con variaciones en los contenidos de Ca, Mg y Mn (Madsen et al. 2018).

Tabla 26

Análisis de la varianza para la variable micronutrientes en hoja en el ensayo de avena a campo

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,0038* | 0,0189* | 0,1220 ^{ns} | 0,3041 ^{ns} |
| Inoculación | 0,7024 ^{ns} | 0,8193 ^{ns} | 0,2072 ^{ns} | 0,5166 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,5309 ^{ns} | 0,8513 ^{ns} | 0,8272 ^{ns} | 0,9707 ^{ns} |
| CV | 10,72 | 8,46 | 10,25 | 11,28 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 27

Valores promedios del contenido foliar de micronutrientes en avena a campo*

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------|---------|--------|-------|
| -----ppm----- | | | | |
| Inoculación | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 108,88 A | 10,17 A | 188,48 | 46,86 |
| <i>Pseudomonas</i> | 148,36 A | 10,48 A | 299,71 | 42,50 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 161,19 A | 12,13 A | 293,30 | 52,03 |
| Control | 135,55 A | 12,08 A | 231,72 | 63,35 |
| Basalto | | | | |
| Sin basalto | 94,87 B | 8,97 B | 220,95 | 47,07 |
| Con basalto | 182,12 A | 13,46 A | 285,65 | 55,30 |
| Basalto*Inoculación | | | | |
| Co*sb | 86,02 A | 10,36 A | 240,69 | 63,22 |
| Az*sb | 99,91 A | 8,69 A | 155,77 | 37,93 |
| Br*sb | 88,62 A | 8,34 A | 233,56 | 50,59 |
| Ps*sb | 104,94 A | 8,47 A | 253,79 | 36,52 |
| Co*cb | 185,07 A | 13,80 A | 222,75 | 63,48 |
| Az*cb | 117,85 A | 12,26 A | 221,69 | 55,78 |
| Br*cb | 233,77 A | 15,91 A | 353,04 | 53,46 |
| Ps*cb | 191,79 A | 11,87 A | 345,62 | 48,49 |

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

El análisis de varianza para el contenido de macronutrientes en suelo no reveló significancia estadística en los factores e interacción estudiados (tabla 28). Los niveles promedio de los macronutrientes son similares entre si (tabla 29), con disminución en la concentración respecto al contenido del suelo al inicio del ensayo. Al igual que Hanish et al. (2013) quienes observaron una disminución en el contenido de Ca y Mg después de 21 meses de aplicación y ligeros cambios después de 14 meses de aplicación de polvo de basalto en un suelo rojo de Brasil para los elementos Cu, Fe, Mg y P. Esto representan tiempos de incubación con basalto mayores a los estudiados en el presente trabajo, donde solo permaneció el cultivo durante 3 meses en el campo. Diferente fue lo obtenido por Borges Filho (2019) quien no observó cambios en la composición química

del suelo con diferentes blend de polvo de basalto y microorganismos efectivos en avena negra. Shamshuddin y Anda (2012) han conseguido aumentar los niveles de P en suelo con aplicaciones de 10 tn ha⁻¹ de roca de basalto, Mg con aplicaciones de 20 tn ha⁻¹ y de K y Ca con aplicaciones de 40 tn ha⁻¹ de roca de basalto en un cultivo de cacao; Ramos et al. (2012) reportaron incrementos en los niveles de P en suelos ultisoles y oxisoles con el uso de rocas de basalto; sin embargo, en este ensayo no se ha encontrado una mayor disponibilidad con el basalto procedente del sur de Corrientes, si bien como se mencionó antes, Madsen et al. (2018) clasifican a estas rocas como basaltos ricos en Fe principalmente, con aportes en Ca, Mn y Mg, no realizando aportes en fósforo.

Tabla 28

Análisis de la varianza para la variable macronutrientes en suelo *en el ensayo de avena a campo*

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,4262 ^{ns} | 0,7401 ^{ns} | 0,1220 ^{ns} | 0,9999 ^{ns} | 0,3050 ^{ns} |
| Inoculación | 0,2985 ^{ns} | 0,8175 ^{ns} | 0,7245 ^{ns} | 0,4284 ^{ns} | 0,6482 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,8795 ^{ns} | 0,9382 ^{ns} | 0,7245 ^{ns} | 0,9328 ^{ns} | 0,7088 ^{ns} |
| CV | 3,55 | 26,41 | 8,90 | 12,61 | 23,71 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 29

Valores medios por factor para el contenido de macronutrientes en suelo de avena a campo*

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|------|------|-----------------------------------|------|------|
| | % | ppm | -----cmolc kg ⁻¹ ----- | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 0,04 | 7,40 | 0,12 | 2,62 | 0,58 |
| <i>Pseudomonas</i> | 0,04 | 8,32 | 0,15 | 2,80 | 0,68 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 0,04 | 8,47 | 0,13 | 2,85 | 0,68 |
| Control | 0,04 | 7,87 | 0,13 | 2,57 | 0,65 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 0,04 | 8,16 | 0,15 | 2,71 | 0,68 |
| Con basalto | 0,04 | 7,87 | 0,12 | 2,71 | 0,62 |
| Basalto*Inoculantes | | | | | |
| Co*sb | 0,04 | 7,87 | 0,17 | 2,60 | 0,70 |
| Az*sb | 0,04 | 7,33 | 0,13 | 2,60 | 0,57 |
| Br*sb | 0,04 | 8,50 | 0,13 | 2,90 | 0,77 |
| Ps*sb | 0,04 | 8,93 | 0,17 | 2,73 | 0,70 |
| Co*cb | 0,03 | 7,87 | 0,10 | 2,53 | 0,60 |
| Az*cb | 0,03 | 7,47 | 0,10 | 2,63 | 0,60 |
| Br*cb | 0,04 | 8,43 | 0,13 | 2,80 | 0,60 |
| Ps*cb | 0,04 | 7,70 | 0,13 | 2,87 | 0,67 |

El análisis de varianza para la variable micronutriente difirió significativamente en los elementos Fe para el factor Basalto y Zn en el factor Inoculación (tabla 30). Con respecto al contenido en Zn, este se vio favorecido con *Bradyrhizobium* frente a *Azotobacter* (tabla 31), el Zn es un microelemento importante en la síntesis de triptófano un precursor de auxinas; al comparar con el contenido a nivel foliar, *Bradyrhizobium* también superó a *Azotobacter*, aunque la diferencia no resultó significativa. En cuanto a los tenores medios de micronutrientes en suelo dentro del factor basalto (tabla 31), el contenido de hierro resultó significativamente superior con la aplicación del polvo de basalto, al igual que lo sucedido en el contenido foliar, lo que podría deberse a la

solubilización del Fe presente en el polvo de basalto. Estos incrementos de la disponibilidad de los micronutrientes en suelo debido al agregado de polvo de basalto han sido reportado por varios autores (Silva 2022; Melo et al. 2012; Sekula 2011). Römheld (1991) menciona a las gramíneas como buenas productoras de fitosideróforos para la adquisición de Fe principalmente, aunque también movilizan Zn, Mn y Cu; por lo cual la mayor disponibilidad en suelo con el uso de basalto, un contenido de P mayor respecto al ensayo en maceta pudo mejorar la adquisición en Fe por la planta, como fue mencionado antes. En el análisis de los tratamientos, los micronutrientes Cu y Zn mostraron comportamientos homogéneos; con una leve tendencia no significativa a valores superiores en Zn sin uso de basalto. En el elemento Mn, considerando cada microorganismo, *Azotobacter* y *Bradyrhizobium* tuvieron un leve incremento con el uso de basalto, al igual que el tratamiento sin microorganismo; *Pseudomonas* en cambio presentó una mayor concentración de Mn sin el uso de basalto; aunque sin diferencias significativas. El contenido de Fe presenta diferencias más amplias, principalmente para *Azotobacter* y los tratamientos sin microorganismos, con aproximadamente un 50% más con el uso de basalto. Las diferencias significativas obtenidas en el factor basalto no se reflejaron en la interacción con el factor inoculante. Borges Filho (2019) no logró diferencias para los contenidos de Fe y Cu en un cultivo de avena bajo la aplicación de diferentes polvos de basalto. Sin embargo, Sékula (2011) reporta un nivel de Cu en suelo significativamente superior con una dosis de 4 t ha^{-1} en un suelo latosol de Brasil.

Tabla 30

Análisis de la varianza para la variable micronutrientes en suelo *en el ensayo de avena a campo*

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,0417* | 0,5797 ^{ns} | 0,3006 ^{ns} | 0,0736 ^{ns} |
| Inoculación | 0,4802 ^{ns} | 0,1920 ^{ns} | 0,9344 ^{ns} | 0,0731* |
| Inoculación*basalto | 0,4087 ^{ns} | 0,8982 ^{ns} | 0,3374 ^{ns} | 0,4582 ^{ns} |
| CV | 10,44 | 7,57 | 29,11 | 12,58 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 31

Comparación de medias por factor para el contenido de micronutrientes en suelo de avena a campo *

| Factores | Fe | Cu | Mn | Zn |
|---------------------------|---------|------|------|---------|
| ppm | | | | |
| Inoculantes | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 8.17 A | 1.53 | 7.27 | 2.02 B |
| <i>Pseudomonas</i> | 5.42 A | 1,08 | 7.02 | 2.26 AB |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 7.90 A | 1.59 | 7.05 | 2.49 A |
| Control | 7.59 A | 1.37 | 6.54 | 2.25 AB |
| Basalto | | | | |
| Sin basalto | 5.76 B | 1.36 | 6.41 | 2.38 A |
| Con basalto | 8.78 A | 1.42 | 7.52 | 2.13 A |
| Basalto*Inoculante | | | | |
| Co*sb | 5.65 A | 1.26 | 5.96 | 2.26 A |
| Az*sb | 4.89 A | 1.39 | 5.59 | 2.13 A |
| Br*sb | 7.11 A | 1.69 | 6.82 | 2.59 A |
| Ps*sb | 5.40 A | 1.10 | 7.29 | 2.52 A |
| Co*cb | 9.53 A | 1.47 | 7.11 | 2.24 A |
| Az*cb | 11.45 A | 1.66 | 8.95 | 1.91 A |
| Br*cb | 8.70 A | 1.50 | 7.28 | 2.40 A |
| Ps*cb | 5.43 A | 1,06 | 6.74 | 1.99 A |

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

En cuanto a las variables microbiológicas medidas, el análisis de varianza no reveló significancia estadística por efecto principal o a nivel interacción para la micorrización (Tabla 32). Los porcentajes de infección micorrícica total estuvieron alrededor del 50% tanto para inoculación como para basalto (tabla 33). En la figura 11 se pueden observar diferentes estructuras micorrícicas como arbuscúlos y vesículas formadas en la raíz de avena. Del total de micorrización, el porcentaje de hifas fue de alrededor del 40% con basalto y 30% sin basalto, los arbuscúlos en un 5% sin basalto y 10% con basalto y vesículas alrededor del 3% en ambos niveles del factor basalto.

Tabla 32

Análisis de la varianza para la variable micorrización total *en el ensayo de avena a campo*

| | MT |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,1236 ^{ns} |
| Inoculación | 0,8915 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,6479 ^{ns} |
| CV | 14,79 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 33

*Comparación de medias para la variable micorrización por factor de avena a campo **

| Factores | MT |
|-----------------------|-------|
| <i>Azotobacter</i> | 48.00 |
| <i>Pseudomonas</i> | 53.00 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 50,17 |
| Control | 48.67 |
| Sin basalto | 45.42 |
| Con basalto | 54.50 |

MT: micorrización total

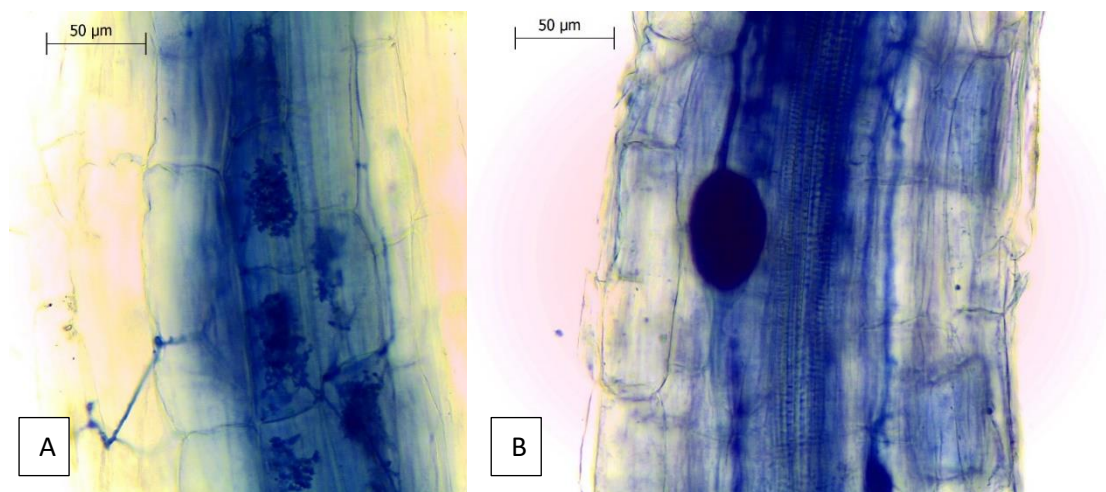


Figura 11. Estructuras observadas en microscopio Leica ICC50 aumento 40X. A: arbuscúlos presentes en las raíces de avena cultivada en campo; B: vesícula presente en las raíces de avena cultivada en campo.

Los porcentajes de infección fueron superiores a los obtenidos en maceta (figuras 12), aunque más bajos a las halladas por Correa et al. (2017), donde se trabajó con un cultivo de avena negra implantado en un suelo de las mismas características que el presente ensayo y con una dosis igual a la estudiada. Si se relaciona la micorrización

total con la biomasa seca obtenida, los tratamientos con basalto para los tres microorganismos fueron los de mayor producción en materia seca, y tienen altos porcentajes de micorrización, sin embargo, los tratamientos sin microorganismos habían dado la menor producción, y en cambio el control con basalto presenta una alta infección micorrícica.

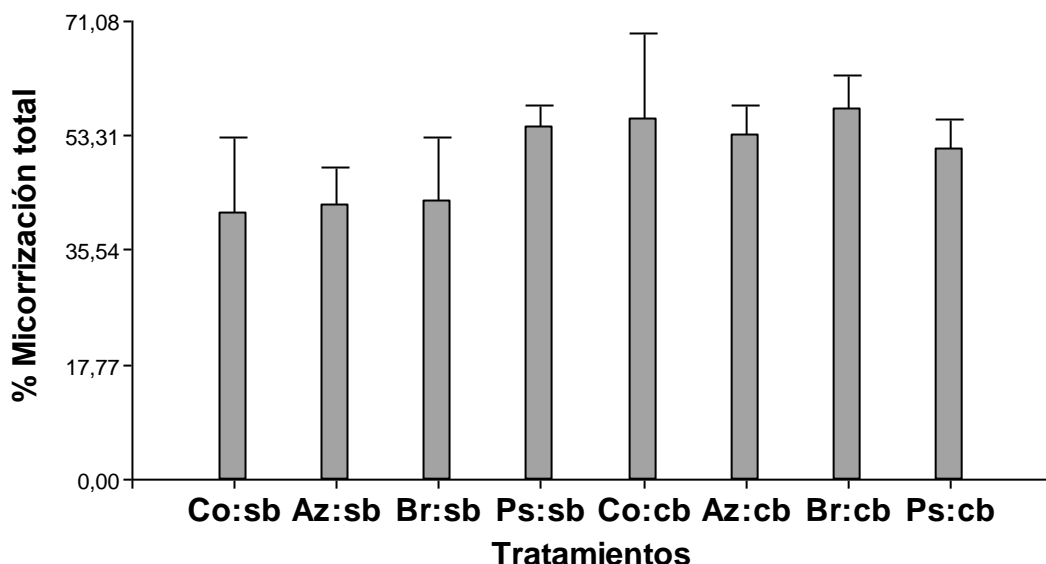


Figura 12. Medias obtenidas para la variable micorrización en avena negra en campo.

Los resultados de la actividad biológica global medida como la respiración del suelo no acusaron efectos principales o de interacción significativos para el análisis de varianza (tabla 34). Los valores obtenidos por factor fueron ligeramente superiores a los obtenidos en el ensayo en macetas (tabla 35), al igual que en la interacción (figura 13); Souza et al. (2011) trabajaron con diferentes polvos de basalto en dosis de 3 t ha⁻¹, obteniendo valores homogéneos como resultado; en cambio, Priyono et al. (2009), evaluaron rocas silicatadas molidas en seis diferentes suelos, obtuvieron un incremento significativo en la actividad biológica en tres de ellos.

Serían necesarios más estudios para determinar si los tratamientos aplicados tienen efecto sobre la actividad del suelo, ya que no han mostrado un efecto negativo respecto al control; similar a lo obtenido en macetas; considerar la posibilidad de que el polvo de basalto actúe como un sumidero del CO₂ desprendido por los microorganismos colaborando en el proceso de meteorización y por ende en la liberación de nutrientes, mecanismos expuestos al principio (Berling et al. 2020; Laurent y Eric 1994).

Tabla 34

Análisis de la varianza para la variable actividad biológica global en *avena a campo*

| | ABG |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,2093 ^{ns} |
| Inoculación | 0,1848 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,5714 ^{ns} |
| CV | 19,68 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 35

Comparación de medias por factores para la variable actividad biológica global (actividad respiratoria) en avena negra-ensayo en campo*

| Factores | Actividad biológica global mgCO ₂ 100g de suelo ⁻¹ día ⁻¹ |
|-----------------------|---|
| <i>Azotobacter</i> | 5.94 |
| <i>Pseudomonas</i> | 6.63 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 5.24 |
| Control | 5.41 |
| Sin basalto | 6.11 |
| Con basalto | 5.50 |

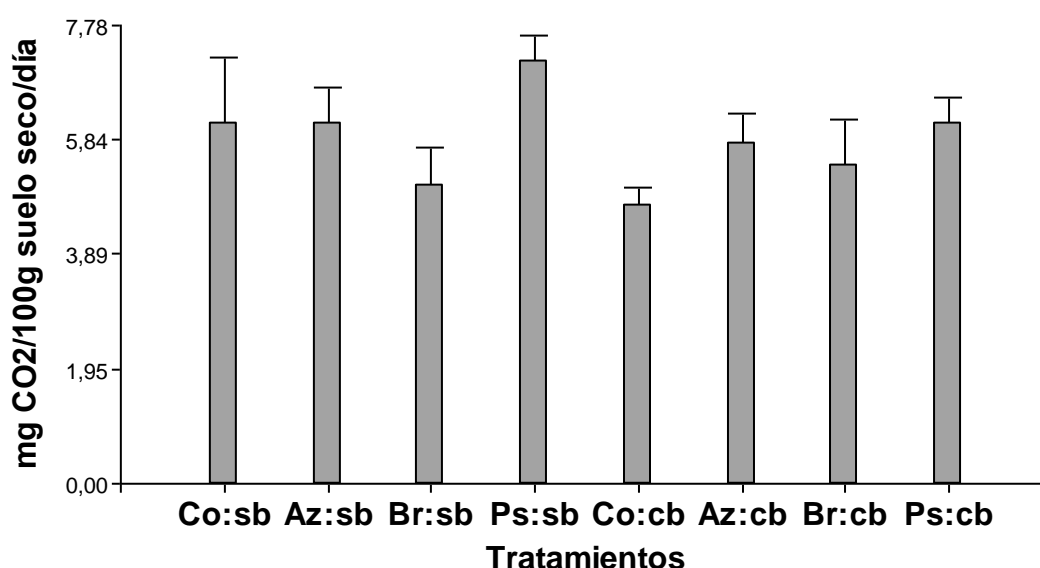


Figura 13. Medias obtenidas para la variable actividad biológica global en suelo del ensayo en avena negra en macetas

Análisis multivariado

El suelo considerado como ese organismo vivo, es un sistema dinámico donde además, al incluir el vegetal, se vuelve un sistema más tridimensional e influenciado por múltiples factores; por lo cual algunas veces es necesario realizar análisis que permitan ver las influencias de diferentes variables como también las relaciones que puedan llegar a establecerse entre ellas. En este sentido se realizó el análisis multivariado de las variables biométricas, las referidas a nutrientes en suelo y las referidas a nutrición foliar.

En el análisis de componentes principales (ACP) para las variables peso seco vástago (PSV), peso seco radical (PSR), altura (ALT), volumen radical (VR), micorrización total (MT) y actividad biológica global (ABG) se observa que en el biplot obtenido (figura 14) las dos primeras componentes representan el 78% de la variabilidad total de las observaciones. La primer componente conserva casi el 45% de la variabilidad total, y en términos absolutos las variables que más contribuyen son ALT, PSR y PSV y la CP 2 reúne el 34% de la variabilidad total, con la MT, VR y ABG dando la mayor contribución. Los vectores de ALT, PSR y PSV presentan un ángulo agudo, lo

que indica alta asociación entre estas variables. Respecto al eje horizontal, valores altos en PSR, ALT y PSV están asociados a los tratamientos sin basalto excepto la combinación con *Azotobacter*. Hacia el otro extremo del eje con valores bajos en esas variables se encuentran los tratamientos con basalto exceptuando al basalto sin inoculación microbiana. Las variables productivas estuvieron más asociadas a la ausencia de basalto.

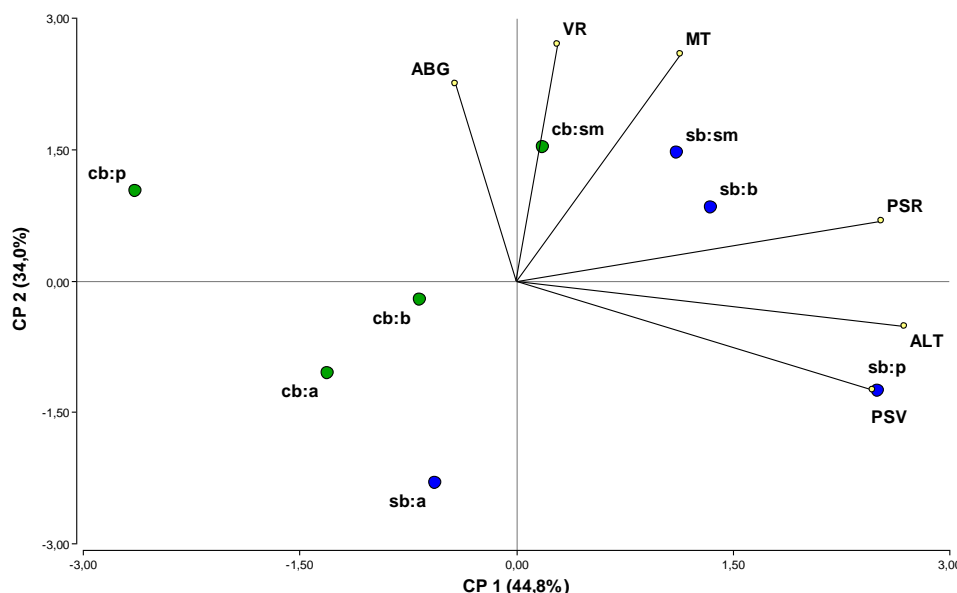


Figura 14. Biplot resultante del ACP de avena en macetas para las variables peso seco vástago (PSV), peso seco radical (PSR), altura (ALT), volumen radical (VR), micorrización total (MT) y actividad biológica global (ABG) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin micrororganismo (sm).

En el ACP para avena en maceta con las variables referidas a concentración de nutrientes a nivel foliar se observa a las 2 componentes abarcando un 60% de la variabilidad (figura 15). La CP1 reúne un 37% y la CP2 un 23% de la variabilidad total. A la derecha se encuentran todos los micronutrientes, en el cuadrante superior el Zn junto al Ca y el PSV y PSR y en el cuadrante inferior los demás micronutrientes. Los que mayor aporte hacen a la CP1 son los elemento Fe, Cu, Zn y en menor medida el Ca. Aportando mayormente a la CP2 se encuentra el PSV, PSR y Mn. Los tratamientos con basalto combinado a *Azotobacter*, *Pseudomonas* y sin inoculación están relacionados a un alto contenido foliar en Mn principalmente, también Fe y Cu, y en menor contenido de N y P. El tratamiento control y el tratamiento sin basalto combinado a *Pseudomonas* está asociado a un contenido mayor en Zn.

Al igual que en maceta, el ACP en avena en condiciones de campo muestra las 2 componentes cubriendo casi un 60% de la variabilidad (Figura 16). La CP1 reúne casi un 37% y la CP2 casi un 23% de la variabilidad total. Teniendo en cuenta el eje horizontal, a la derecha se encuentran todos los micronutrientes, en el cuadrante superior el Zn, Fe, Cu junto al Mg y K y en el cuadrante inferior el Mn, Ca y PSV asociados a estos cuadrantes los tratamientos con basalto. Los que mayor aporte hacen a la CP1 son los elemento Fe, Cu, Mg y Mn. Aportando mayormente a la CP2 se encuentra el PSV, N y Zn. Hacia la izquierda se encuentran los vectores N y P, y todos los tratamientos sin basalto asociados a estos dos cuadrantes. Los tratamientos con basalto estuvieron más asociados a los vectores de micronutrientes.

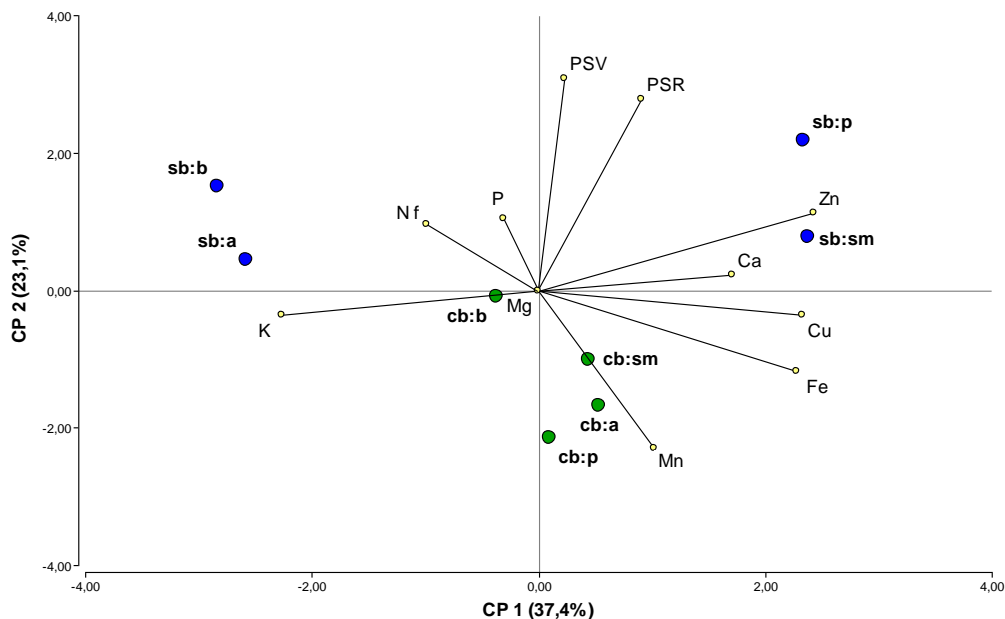


Figura 15. Biplot resultante del ACP de avena en macetas para nutrientes a nivel foliar junto al peso seco vástago (PSV) y peso seco radical (PSR) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin microorganismo (sm).

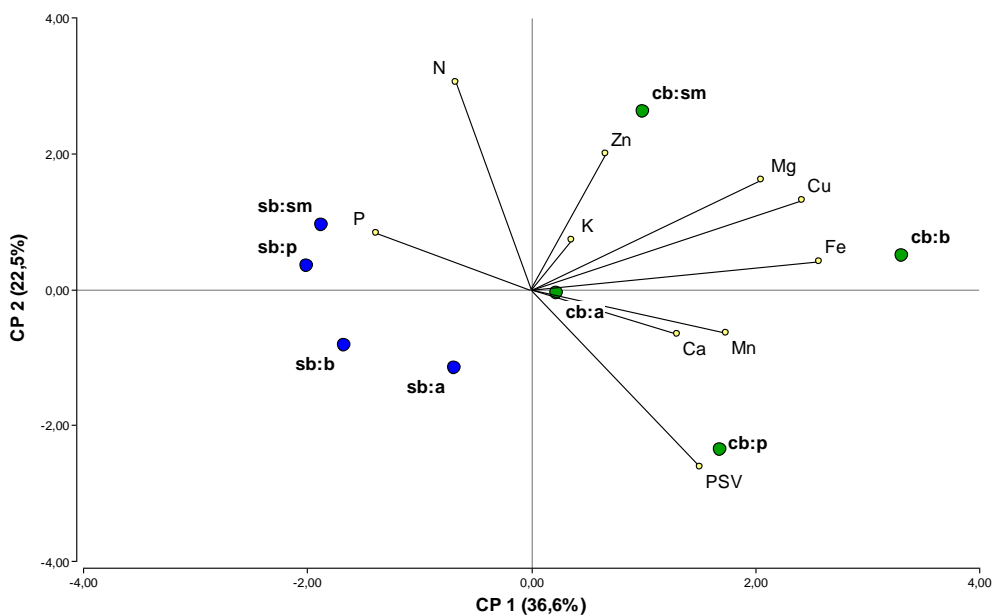


Figura 16. Biplot resultante del ACP de avena en campo para nutrientes a nivel foliar junto al peso seco vástago (PSV) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin microorganismo (sm).

En cuanto al análisis de todos los nutrientes en suelo evaluados junto al PSV y PSR del ensayo en maceta (figura 17), se puede observar que las dos componentes abarcan alrededor de un 60% de la variabilidad al igual a lo dado a nivel foliar. La primer componente reúne un 39% y la CP2 un 23% de la variabilidad total. Respecto al eje horizontal, la mayoría de los vectores variables están a la derecha exceptuando el Fe y Cu, todos los tratamientos sin basalto se ubicaron hacia la derecha siguiendo el eje horizontal. En el cuadrante superior derecho se ubican los micronutrientes Zn y Mn junto al PSV y PSR asociándose a ellas los tratamientos sin basalto combinados con

Pseudomonas y *Bradyrhizobium*, el PSV se relaciona inversamente al contenido de Cu en suelo el cual se ubica en el cuadrante inferior izquierdo. En el cuadrante superior izquierdo se ubica el vector de la variable Fe, donde se encuentran los tratamientos con basalto combinado a *Bradyrhizobium* y sin inoculación no tan cercanos al vector, los que se caracterizan por un bajo contenido en P, Mg y N. En cuanto a los tratamientos sin basalto, combinado con *Pseudomonas* y *Bradyrhizobium* presentaron mayor PSV, PSR, y mayor contenido en Zn y Mn y bajo en Cu; los tratamientos control y el combinado a *Azotobacter* con mayor contenido en N, P y Mg y bajo en Fe, el vector K no aportó a ninguna componente.

En cuanto al ACP de los datos de avena en campo (Figura 18) se muestra un 65% de la variabilidad total para los macro y micronutrientes en suelo junto al PSV. La primer componente reúne casi un 43% y la CP2 un 23% de la variabilidad total. En el cuadrante superior derecho se ubican el micronutriente Zn con todos los macronutrientes exceptuando el K que se ubica en el inferior derecho; asociándose a estas variables los tratamientos combinados con *Bradyrhizobium*. Hacia la izquierda en el cuadrante superior están los demás micronutrientes junto al PSV cuyo vector no realiza mayor aporte. Los tratamientos están distribuidos sobre los 4 cuadrantes.

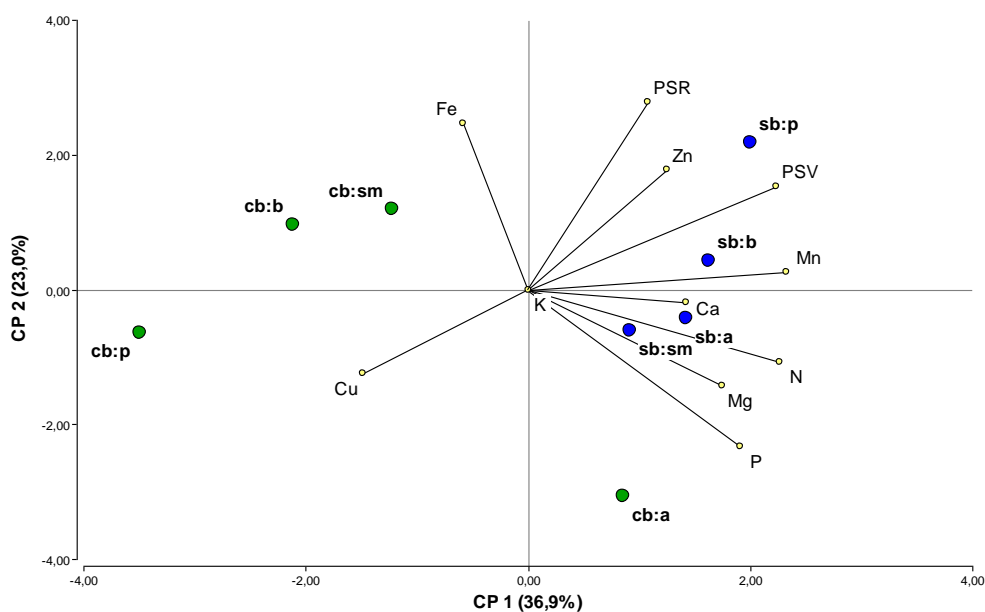


Figura 17. Biplot resultante del ACP de avena en maceta para nutrientes en suelo junto al peso seco vástago (PSV) y peso seco radical (PSR) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin microorganismo (sm).

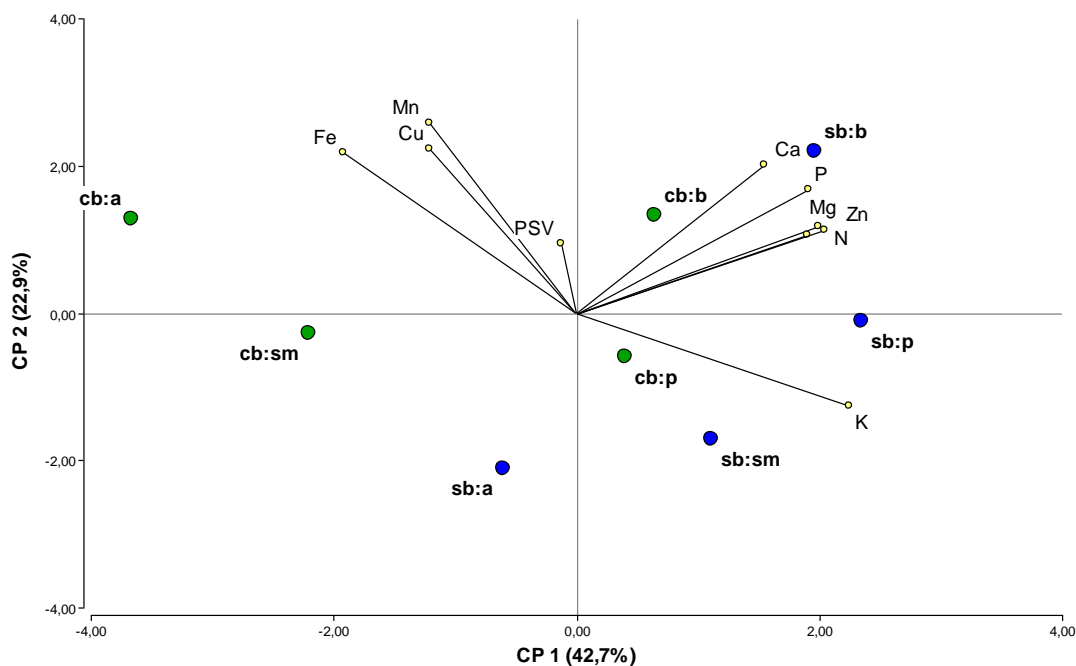


Figura 18. Biplot resultante del ACP de avena a campo para nutrientes en suelo junto al peso seco vástago (PSV) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin microorganismo (sm).

Solo con los vectores de variables productivas en el ensayo de avena en maceta las componentes lograron reunir casi el 80% de la variabilidad total; encontrándose los tratamientos con basalto opuestos a estos vectores, indicando una menor producción. En maceta los niveles iniciales de Fe fueron mucho mayor al del ensayo a campo; un alto contenido de Fe y Cu en suelo pudo afectar de alguna manera la acumulación de biomasa en la avena en maceta, dado su relación inversa del vector peso seco con el contenido de Cu en suelo (figura 17), como así también puede verse la menor distancia en el contenido foliar de los tratamientos con basalto hacia el vector de Mn principalmente, y también de Fe y Cu (figura 15). Alves (2021) en su trabajo sobre la respuesta del maíz a diferentes dosis de polvo de basalto obtuvo como respuesta al ACP una asociación entre las dosis de 3 y 5 t ha⁻¹ con la disponibilidad de Fe, y en una dosis de 3 t ha⁻¹ con los macronutrientes, no así con Mn, Cu y Zn.

A nivel foliar en ambos ensayos, los vectores de las variables micronutrientes estuvieron asociados más a los tratamientos con basalto, a nivel de suelo, los vectores del Fe y Cu estuvieron hacia el lado opuesto a los tratamientos sin basalto y ligeramente más cercanos a algunos tratamientos con basalto. Los tratamientos sin basalto estuvieron a menor distancia del vector de peso seco en maceta; al contrario Zuffo et al (2022) encontraron una asociación positiva en el número de granos por hilera y el rendimiento de granos con una dosis de 6 t ha⁻¹ de polvo de rocas, aunque no resultó significativo en la altura de planta y número de hileras por mazorca.

CAPÍTULO IV

Microorganismos y basalto: Efecto sobre variables productivas en caupí (*Vigna unguiculata*), su micorrización espontánea y la actividad biológica del suelo. Ensayos en invernáculo y a campo.

Introducción

Las leguminosas son un cultivo importante ya que aportan carbono y nitrógeno al suelo, principalmente a suelos arenosos con baja capacidad de retención de nutrientes; además de favorecer el ciclo de otros nutrientes debido a la movilización que pueden ejercer de capas más profundas del suelo, y mejorar sus condiciones físicas en general (Faria et al, 2004; Andrade et al, 2009a).

El poroto caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) es una leguminosa muy cultivada por los agricultores familiares del nordeste argentino. Su grano, maduro o inmaduro, es utilizado como alimento humano, cultivado en consociación con otros o en forma pura. También se lo emplea en la alimentación de animales domésticos, ya sea como forraje verde en pastoreo directo o por cortes, en cultivos puros o consociados con gramíneas, o como reserva forrajera en forma de heno o silo. También se lo puede encontrar como abono verde o cultivo de cobertura, contribuyendo a la conservación de la fertilidad del suelo y al control de la erosión (Paredes et al., 2012).

Algunos trabajos han encontrado resultados satisfactorios en los cultivos de leguminosas con polvo de basalto; entre ellos se pueden nombrar los trabajos de Crusciol y Soratto (2013) que evaluaron la efectividad de una roca de fonolito molida en un latosol rojo distroférico como fuente de potasio y silicio, encontrando una mejor nutrición del cultivo en cuanto al contenido de K y Si, además se logró un aumento de la productividad de grano alrededor del 15% en comparación con el tratamiento control. Ferreira et al. (2009) evaluaron en un cultivo de poroto común sobre un suelo cambisol húmico la aplicación de polvo de basalto conjunta con estiércol bovino, encontrando una productividad similar respecto al tratamiento con fertilización convencional, al igual que Santos et al. (2015) en un cultivo agroecológico de poroto común obtuvieron la mayor productividad en granos con una dosis de 4,15 t ha⁻¹. Andrade et al. (2009b) encontró los mejores resultados en la biomasa aérea de caupí cuando fue aplicado un biofertilizante a base de rocas fosfatos y potásicas, especialmente con la inoculación de *Bradyrhizobium*, dada su interacción simbiótica.

Otros estudios se han referido a las ventajas del polvo de rocas en el suelo, como Theodoro y Leonardos (2006) que encontraron un aumento en los niveles de pH y Ca, Mg, P y K después del primer año de evaluación del potencial de una roca volcánica sobre un suelo arenoso. Así también Silva et al. (2012) concluyeron que el uso combinado de rocas y microorganismos resulta de interés su estudio en los sistemas de producción vegetal, ya que, a partir de un ensayo de lixiviación sobre un suelo, vio que el tenor de nutrientes en solución en presencia de polvo de basalto tuvo una tendencia creciente, con un mayor estímulo en la liberación de nutrientes en aquellos tratamientos con inoculación de microorganismos en adición a la microbiota del suelo.

Así también otros estudios se han basado en los mecanismos de solubilización en las rocas basálticas; Carvalho (2012) en su trabajo sobre la disponibilidad de nutrientes en rocas silicatadas bajo la influencia del CO₂, ácidos orgánicos y la microbiota del suelo concluyó que el aporte de CO₂ resulta importante en la mineralización de estos materiales; el CO₂ es el resultado principal de la actividad respiratoria de los organismos del suelo, su medida además permite detectar cambios en el suelo frente al manejo que está recibiendo el mismo.

Otro grupo de microorganismos, los hongos micorrícicos arbusculares (HMA), pueden desempeñar un papel importante en la disponibilidad de nutrientes de las rocas; por la producción de ácidos orgánicos y la liberación significativa de CO₂ durante la respiración fúngica que contribuye a un aumento en ácido carbónico en el suelo capaz de atacar a estos materiales (Johnson et al., 2002).

Materiales y método

Se realizaron dos ensayos, uno en macetas en el invernáculo de la Cátedra de Microbiología de la Facultad de Ciencias Agrarias; y el otro en condiciones de campo en un lote ubicado en la localidad de Santa Ana de los Guácaras, Corrientes. El suelo utilizado en el ensayo en contenedores fue muestreado del lote en el cual se estableció el ensayo a campo (suelo avena), ambos iniciados en la primavera del mismo año.

Los microorganismos utilizados fueron dos productos comerciales, conteniendo *Pseudomonas fluorescens* y *Bradyrhizobium japonicum* respectivamente; y un aislamiento A3 (*Azotobacter* sp.) obtenido en la Cátedra de Microbiología Agrícola.

El polvo de basalto utilizado es un residuo de la extracción y procesamiento de la roca de basalto de una cantera ubicada en Cruzú Cuatía (Ruta N° 119 Km 43300), provincia de Corrientes, clasificada según Madsen et al. (2018) como una cantera de alto contenido de óxido de titanio. La granulometría del polvo de basalto fue <0,5 mm, utilizado en una dosis equivalente a 5 t ha⁻¹, el análisis de nutrientes se muestra en la tabla 36.

Tabla 36

*Análisis de macro y micro-elementos total del polvo de basalto**

| N | P | K | Ca | Mg | Fe | Cu | Mn | Zn |
|-------------|------|------|------|------|------|---------------|-----|----|
| -----%----- | | | | | % | -----ppm----- | | |
| 0,02 | 0,18 | 0,06 | 1,05 | 0,10 | 3.76 | 140 | 130 | 30 |

*Análisis de contenido total realizado en el Centro Tecnológico de Producción (CETEPRO), provincia de Corrientes. K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn, Zn por absorción atómica. P por el método de Murphy y Riley. N en digestión ácida.

La distribución de tratamientos fue mediante arreglo factorial (Tabla 37):

1. Inoculantes, con cuatro niveles (tres inóculos de PGPR más un testigo sin inocular); y
2. Aplicación de polvo de roca de basalto, con dos niveles (con aplicación y sin aplicación).

Tabla 37

Esquema de los tratamientos

| Inoculación | Polvo de basalto | Tratamientos |
|-----------------------|------------------|--------------|
| <i>Azotobacter</i> | Sin aplicación | Az sb |
| <i>Pseudomonas</i> | | Ps sb |
| <i>Bradyrhizobium</i> | | Br sb |
| Sin inoculación | | Co sb |
| <i>Azotobacter</i> | Con aplicación | Az cb |
| <i>Pseudomonas</i> | | Ps cb |
| <i>Bradyrhizobium</i> | | Br cb |
| Sin inoculación | | Co cb |

Ensayo en macetas:

a. Suelo y contenedores

Se utilizó como sustrato suelo extraído de un lote con pasturas naturales situado en la localidad de Santa Ana, Corrientes (Latitud 27.464824, Longitud 58.658182). El suelo se corresponde a la Serie Ensenada Grande, entisoles de baja fertilidad y baja retención de agua. El muestreo se realizó hasta una profundidad de 20 cm, siguiendo la metodología citada por Prause (2006). En la tabla 38 se muestran los resultados del análisis físico-químico.

Tabla 38

*Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos**

| pH | P | K | Ca | Mg | Corg | N total | Textura** |
|-----|------|-----|--|-----|------|---------|-----------|
| | ppm | | -----Cmol _c .Kg ⁻¹ ----- | | | ---%--- | |
| 5.9 | 11.2 | 0,2 | 2.9 | 1.1 | 0,39 | 0,04 | Arenosa |

* Análisis realizado en el Instituto Agrotécnico Pedro M. Fuentes Godo, FCA-UNNE. pH: potenciométrico, relación suelo:agua 1:2,5; para Carbono Orgánico: Walkey-Black; P: Bray Kurtz I; Ca, Mg: complejometría con EDTA; y K: fotometría de llama.

** Composición: 85% de arena; 15% de limo y 0% de arcilla.

b. Material biológico

Se utilizaron semillas de *Vigna unguiculata* (caupi) con un poder germinativo del 87%.

Los microorganismos utilizados y su concentración fueron:

- *Pseudomonas fluorescens* con un título de 1×10^9 UFC.ml⁻¹
- *Bradyrhizobium japonicum* con un título de 1×10^9 UFC.ml⁻¹
- *Azotobacter sp* cultivada en solución salina de Winogradsky libre de nitrógeno, con un título final a la inoculación de 9.8×10^8 UFC.ml⁻¹

c. Armado y diseño experimental del ensayo

El ensayo se estableció en macetas de 5 litros de capacidad conteniendo el suelo muestreado como sustrato. El polvo de basalto se aplicó a la mitad de las unidades experimentales en una dosis equivalente a 5 t ha^{-1} ($8,9 \text{ g maceta}^{-1}$), incorporando los primeros 5 cm del suelo.

La siembra se realizó en primavera, colocando 2 semillas por macetas. A los 5 días de la siembra (dds) se realizó la inoculación por riego, para ello se aplicó 1 ml de cada inoculante por maceta.

Se utilizó un diseño completo al azar con 5 repeticiones por cada tratamiento, quedando de esta forma un total de 40 unidades experimentales. El arreglo factorial fue discriminado en la tabla 32.

d. Evaluaciones realizadas

A las dos semanas posterior a la siembra se realizó el raleo de plantas dejando una por maceta. Durante la etapa de crecimiento se midió número de hojas semanalmente hasta el momento de cosecha (Figura 19 y 20).

La extracción de las plantas se realizó a los 60 días posteriores a la inoculación, separando parte aérea y radical. La parte aérea fue acondicionada para ser llevada a estufa a 60°C para obtener peso seco. De la parte radical se midió volumen radical por el desplazamiento de agua en una probeta (Bruns y Croy, 1985), presencia de nódulos y una porción de raíces fue conservada para la tinción y posterior observación de micorrizas (Phillips y Hayman, 1970) para lo cual se tomaron de las muestras teñidas con azul de tripán, 10 segmentos de raíces de aproximadamente 1 cm, los cuales fueron observados en 50 puntos a través del microscopio Leica DMZ ICC50 en un aumento de

40X. Las restantes raíces fueron acondicionadas y llevadas a estufa a 60°C para obtener peso seco.

El suelo de las macetas fue acondicionado y secado para la determinación de la actividad biológica global (Frioni, 2011) y otra porción enviado a laboratorio para su análisis físico-químico.

Además, una vez seco la parte aérea del vegetal se tomaron muestras del material foliar, y fueron enviadas al laboratorio para el análisis de macro y micro nutrientes.



Figura 19. Plantas de caupí a los 20 días pos-siembra. A: Co*sb, B: Br*sb, C: Ps*sb, D: Az*sb, E: Co*Cb, F: Br*cb, G: Az*cb, H: Ps*cb.



Figura 20. Plantas de caupí con 50 días pos-siembra. A: Co*sb, B: Ps*sb, C: Co*Cb, D: Ps*cb.

Ensayo en condiciones de campo:

a. Condiciones ambientales

El ensayo se realizó en un lote ubicado en la localidad de Santa Ana de los Guácaras, Provincia de Corrientes (Latitud 27.464824, Longitud 58.658182) (Figura 21). El suelo se corresponde a la Serie Ensenada Grande, entisoles de baja fertilidad y baja retención de agua. El análisis físico-químico se muestra en la tabla 39 y las condiciones meteorológicas durante el ensayo en la tabla 40.

Tabla 39

*Características químicas y clase textural del suelo utilizado en los experimentos**

| pH | P | K | Ca | Mg | Corg | N total | Textura** |
|-----|------|---|-----|-----|-------------|---------|-----------|
| | ppm | -----Cmol _c Kg ⁻¹ ----- | | | -----%----- | | |
| 5.9 | 11.2 | 0,2 | 2.9 | 1.1 | 0,39 | 0,04 | Arenosa |

* Análisis realizado en el Instituto Agrotécnico Pedro M. Fuentes Godo, FCA-UNNE. Métodos utilizados: para pH: potenciométrico, relación suelo:agua 1:2,5; para Carbono Orgánico: Walkey-Black; para P: Bray Kurtz I; para Ca, Mg: complejometría con EDTA; y K: fotometría de llama.

** Composición: 85% de arena; 15% de limo y 0% de arcilla.

Tabla 40

*Registros de las precipitaciones medias mensuales y temperaturas mínimas y máximas mensuales en el período del ensayo**

| | Sept | Oct | Nov | Dic | Ene |
|----------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| Precipitación media mensual (mm) | 18.7 | 284.6 | 125.8 | 320,4 | 203.5 |
| Temperatura Mín. mensual (°C) | 7.5 | 12.4 | 11.8 | 16.3 | 17.9 |
| Temperatura Max. Mensual (°C) | 36.9 | 37.2 | 37.7 | 37.8 | 39.4 |
| Etapas del cultivo | S | | | M | |

*Estación meteorológica automática instalada en la sede del Instituto Correntino del Agua y del Ambiente (ICAA) (Latitud 27° 28' 18" S 58° 49' 20" W y su Altitud 59 m)-Período 2016-2017. S: siembra; M: muestreo.



Figura 21. Vista satelital. A: Provincia de Corrientes, Argentina. B: punto de ubicación de la localidad de Santa Ana. C: Lote remarcado en amarillo. Adaptado de <https://earth.google.com/web/@-27.46401128,-58.65736578,64.68770354a,704.54008519d,34.99999552y,0h,0t,0r/data=MicKJQojCiExQmRuaHp5MEIHMkFVbmJ2bnY2eVE1cIMtZl9XQjBkS1c6AwoBMA?authuser=0>

b. Material biológico

Se utilizaron semillas de *Vigna unguiculata* (caupí colorado) y la inoculación de los microorganismos se realizó sobre la semilla el día de la siembra, aplicando 5 ml de cada inoculante por cada 80 g de semilla y se dejó orear para su posterior siembra. Las semillas utilizadas como control se inocularon con agua de canilla.

Los microorganismos presentaron la concentración siguiente:

- *Pseudomonas fluorescens* 1×10^9 UFC ml⁻¹
- *Bradyrhizobium japonicum* 1×10^{10} UFC ml⁻¹
- *Azotobacter* sp 9.8×10^8 UFC ml⁻¹

c. Armado y diseño experimental del ensayo

El diseño experimental se correspondió a un arreglo factorial distribuido en bloques al azar (DBA) con tres repeticiones para cada tratamiento (Tabla 32). Se delimitaron 24 parcelas de 3x2 metros cada una, con calles de 1 metro dentro del bloque y 1.5 metros entre bloques. Los tratamientos se dispusieron al azar en cada bloque.

El polvo de basalto se aplicó espolvoreando sobre la superficie (Figura 22) e incorporando posteriormente con la ayuda de un rastrillo en una dosis equivalente a 5 t ha⁻¹ (3 kg parcela⁻¹)



Figura 22. Aplicación del polvo de basalto. A: llenado del dispositivo con polvo de basalto; B y C: distribución en la parcela; D: incorporación con rastrillo del polvo de basalto y E: vista de la tapa del dispositivo distribuidor.

Para la siembra se marcaron 5 líneas por parcela distanciados a 0,7 m, sembrando una semilla cada 0,10m para su posterior raleo a 0,30m (Figura 23).



Figura 23. Siembra del poroto caupí. A: semillas en recipiente previa inoculación; B y C: tabla con marcas cada 10 cm para la distribución de semillas en la siembra.

d. Evaluaciones realizadas

A los 30 días pos-siembra (dps) se realizó el raleo de plantas dejando una distancia de 0,30 m entre plantas, se realizó el seguimiento del cultivo respecto a presencia de plagas y enfermedades, y limpieza manual de malezas en las parcelas (figura 24). A los 60 días después de la siembra se realizó la extracción de plantas. Las mismas se encontraban en estado de floración inicio de fructificación (R2-R3). Se tomaron dos líneas centrales, sacando planta entera, con un trozo de raíz ya que estas estaban demasiado profundas, por lo cual no se realizó un conteo de nódulos; igualmente fueron obtenidos los que estaban en la porción de raíz extraída para visualizar su tamaño y coloración interior mediante un corte longitudinal de los mismos (Figuras 25 y 26); de esa porción radical se obtuvieron además las raíces más finas para su tinción (Phillips y Hayman, 1970) y posterior observación de micorrizas en un microscopio Leica DMZ en un aumento de 40X, para ello se tomaron de las muestras teñidas con azul de tripán, 10 segmentos de raíces de aproximadamente 1 cm, los cuales fueron observados en 50 puntos obteniendo el porcentaje de micorrización total, arbuscúlos, vesículas e hifas.

Las plantas fueron acondicionadas para la obtención de peso seco y se tomaron muestras foliares para su análisis de nutrientes. Además de obtener una muestra de suelo por parcela para su análisis químico y determinación de la actividad biológica global mediante la medición de la respiración.



Figura 24. A y B: raleo de las plantas a los 30 días después de la siembra



Figura 25. A, B y C: vista de las parcelas a los 50 días después de la siembra.



Figura 26. Cosecha del poroto caupí a los 60 días después de la siembra. A y B: vista del corte longitudinal en nódulos con el interior verde y rojizo y vista del trozo de raíz con los nódulos; C y D: plantas de caupí cosechadas.

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a pruebas de normalidad (test de Shapiro Wilks modificado) y homogeneidad de varianzas (prueba de Levenne). Cuando fue necesario las variables biométricas y las referidas a micorrización fueron transformadas mediante la función $x = \sqrt{x}$; y el contenido foliar de nutrientes en suelo y hoja fueron transformados por la función $X^{0.25}$, al igual que la variable actividad biológica global.

Con los datos obtenidos en ambos ensayos se realizó un Análisis de la Varianza (ANOVA) factorial y un análisis de comparación de medias (Test de Tukey, $p \leq 0,05$) y un análisis multivariado mediante componentes principales (ACP). Se empleó el software InfoStat (2017).

Resultados y discusión

Ensayo en macetas-Caupí

Con relación a las variables biométricas, el análisis de varianza fue significativo para el factor polvo de basalto, en las variables número de hojas, volumen radical, biomasa total y peso seco de vástago y para el factor inoculación la variable de volumen radical; además hubo efecto de interacción para el peso seco de vástago (tabla 41).

Mediante la comparación de medias, se destacó la inoculación con *Bradyrhizobium* en el número de hojas y volumen radical, superando a los otros microorganismos utilizados y al control sin inocular, y diferenciándose estadísticamente de *Azotobacter* en el volumen radical (tabla 42); el caupí es considerado una especie promiscua en la nodulación por lo cual se esperaría que se asocie simbióticamente a *Bradyrhizobium*, obteniendo alguna ventaja en su crecimiento, como así también a rizobios nativos. Evaluando inoculación versus sin inocular, Farias (2012) en su trabajo con inoculación en *Cajanus cajan* no obtuvo diferencias significativas para las variables número de hojas y biomasa de vástago entre tratamientos inoculados con *Bradyrhizobium* y no inoculados.

Los datos del factor uso de polvo de basalto, muestran al número de hojas y el volumen radical estadísticamente superiores con la aplicación de basalto (tabla 42); similar a lo hallado por Farias (2012) para el número de hojas y biomasa de vástago en poroto guandú con el uso de roca fosfato frente al tratamiento control; podría decirse que el polvo de basalto de alguna forma logró una mejora en el crecimiento, ya que en la interacción de los microorganismos con el polvo de basalto, las variables número de hojas y volumen radical fueron para la mayoría de los tratamientos ligeramente superiores en presencia de basalto, exceptuando a *Bradyrhizobium*, quien tuvo un mejor comportamiento en la variable número de hojas, sin el uso de basalto, y junto a *Pseudomonas* con basalto, lograron superar significativamente a *Azotobacter* sin basalto, mostrando que la posible asociación simbiótica con *Bradyrhizobium* fue efectiva para estos parámetros tanto combinado como no con polvo de basalto (tabla 42). Al igual que en avena a campo, los niveles iniciales de P en suelo fueron superiores al suelo del ensayo en maceta.

Tabla 41

Análisis de la varianza para las variables biométricas evaluadas en caupí maceta

| | N° Hojas | VR | BT | PSV | PSR |
|----------------------------|----------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,0157* | 0,0180* | 0,0141* | 0,009* | 0,0667 ^{ns} |
| Inoculación | 0,1426 ^{ns} | 0,0571* | 0,0711 | 0,0784 ^{ns} | 0,1085 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,1526 ^{ns} | 0,0201 | 0,0662 | 0,0384* | 0,2404 ^{ns} |
| CV | 24,59 | 25,81 | 15,20 | 14,02 | 23,14 |

VR: volumen radical; BT: biomasa total; PSV: peso seco vástago; PSR: peso seco radical. ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 42

Comparación de medias para las variables biométricas estudiadas en el ensayo de caupí en macetas*

| Factores | Hojas | | VR | |
|---------------------------|-----------------------------|---|----------|----|
| | Número planta ⁻¹ | | ---ml--- | |
| Inoculantes | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 2.10 | A | 7.90 | B |
| <i>Pseudomonas</i> | 2.40 | A | 10,20 | AB |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 3.00 | A | 12.30 | A |
| Control | 2.80 | A | 10,50 | AB |
| Basalto | | | | |
| Sin basalto | 2.15 | B | 8.50 | B |
| Con basalto | 3.00 | A | 11.95 | A |
| Basalto*Inoculante | | | | |
| Co*sb | 2.40 | A | 9.80 | AB |
| Az*sb | 1.40 | A | 5.00 | B |
| Br*sb | 3.20 | A | 12.20 | A |
| Ps*sb | 1.60 | A | 7.00 | AB |
| Co*cb | 3.20 | A | 11.20 | AB |
| Az*cb | 2.80 | A | 10,80 | AB |
| Br*cb | 2.80 | A | 12.40 | AB |
| Ps*cb | 3.20 | A | 13.40 | A |

VR: volumen radical; *Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05).

El análisis de varianza para las variables biomasa total (BT), peso seco vástago (PSV) y peso seco radical (PSR) mostraron efecto principal en basalto para BT y PSV y efecto interacción en PSV (tabla 42).

La producción en biomasa seca total para el factor inoculación tuvo como protagonista a *Bradyrhizobium*, diferenciándose estadísticamente de *Azotobacter*, tendencia que no se mantuvo para la biomasa de vástago y raíz (tabla 43). Por otro lado, el factor basalto obtuvo diferencias significativas en la biomasa total y biomasa seca de vástago con el uso del mismo.

En el análisis de interacción, la variable BT obtuvo un mejor comportamiento en las combinaciones Ps*cb y Br*sb, diferenciándose estadísticamente de Az*sb (figura 27). Si observamos la tabla 42, en la variable número de hojas, el valor más bajo fue para Az*sb y dentro de los más altos estuvieron Ps*cb, Br*sb y el Co*cb; es decir que la biomasa seca de vástago fue el componente de mayor incidencia en la biomasa total. La variable PSV siguió una tendencia de Ps*cb > Br*sb > Br*cb > Az*cb > Co*cb > Co*sb > Ps*sb > Az*sb; donde las combinaciones de microorganismos con basalto, junto a Br*sb, fueron superiores estadísticamente al tratamiento Az*sb. Labib et al. (2011) lograron aumentar la producción de caupí en un suelo arenoso inoculando las semillas con *Azotobacter* y utilizando una dosis inicial de fertilizante junto a un feldespato fuente de K y Andrade et al. (2009b) inoculando *Bradyrhizobium* junto a un biofertilizante hecho a partir de rocas minerales, logró mayor biomasa de vástago en caupí, además de un aumento en la biomasa seca de nódulos en el mismo tratamiento. Sin embargo, Plewka et al. (2009) y Koseira et al. (2009) no lograron detectar diferencias estadísticas en la producción de *Phaseolus vulgaris* y *Vigna angularis* respectivamente, bajo diferentes dosis de polvo de basalto, atribuyendo los resultados a la necesidad de prácticas que incrementen la actividad biológica del suelo y por ende la solubilización de la fuente mineral. A pesar de no ser un suelo rico en materia orgánica se han obtenido resultados positivos en las variables biométricas medidas, seguramente prácticas que mejoren la disponibilidad de nitrógeno y carbono incrementen la actividad microbiana y por ende los

efectos de los tratamientos aplicados: Algunos autores reportan que el uso de basalto se potencia o eleva los parámetros productivos con prácticas que incrementen la actividad biológica en suelos (Enciso Garay et al. 2016; Campos Ferreira et al. 2009).

Tabla 43

Comparación de medias para las variables de producción estudiadas en el ensayo de caupí en macetas*

| Factores | BT | -----gMS planta ⁻¹ ----- | | BR | |
|-----------------------|------|-------------------------------------|------|----|------|
| <i>Azotobacter</i> | 1.83 | B | 1.24 | A | 0,59 |
| <i>Pseudomonas</i> | 2.18 | AB | 1.52 | A | 0,66 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 2.54 | A | 1.65 | A | 0,89 |
| Control | 2.11 | AB | 1.49 | A | 0,62 |
| Sin basalto | 1.91 | B | 1.30 | B | 0,60 |
| Con basalto | 2.42 | A | 1.65 | A | 0,77 |

BT: biomasa total; BV: biomasa de vástago; BR: biomasa radical. *Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

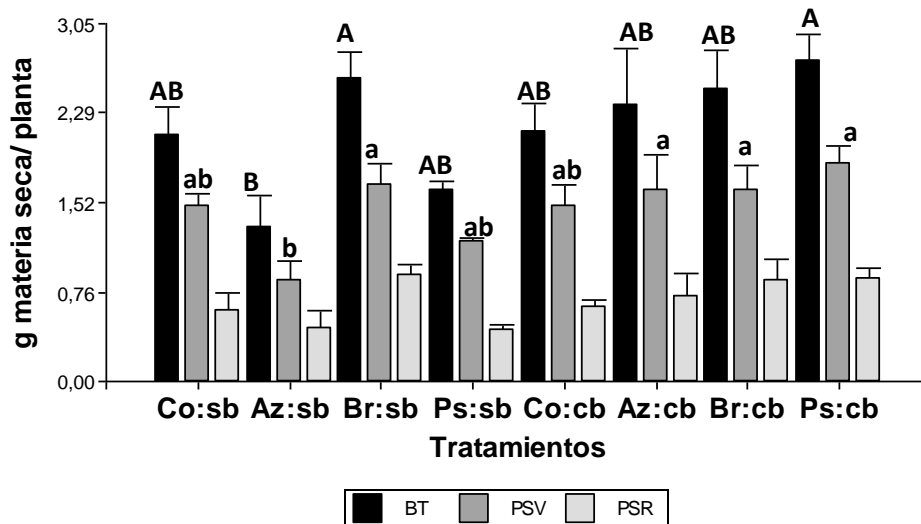


Figura 27. Materia seca total (BT), de vástago (PSV) y raíz (PSR) en poroto caupí en macetas. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Los resultados del análisis de varianza para la variable nivel de macronutrientes en hoja no presentó efectos principales ni de interacción (tabla 44). El contenido promedio en macronutrientes expresados en $g\ kg^{-1}$ para el factor inoculación (tabla 45) muestran contenidos similares en K, Ca y Mg y leves diferencias en el contenido de N y P, destacándose *Azotobacter* sobre los demás y con un *Bradyrhizobium* que tuvo aporte mínimo de nitrógeno en hoja, no siendo lo esperado para un microorganismo que establece una simbiosis para la fijación del nitrógeno con leguminosas. Resultado similar se dio al analizar el factor uso de polvo de basalto, donde el contenido foliar en macronutrientes resultó similar con el uso o sin el uso del mismo.

En cuanto a los resultados obtenidos en la interacción, el contenido en macronutrientes a nivel foliar mostró a la combinación de *Az*sb* con el mayor contenido en nitrógeno aunque no alcanzó a diferenciarse estadísticamente de *Br*sb* el cual obtuvo el menor contenido en nitrógeno. *Azotobacter* sin polvo de basalto fue el tratamiento con menor número de hojas y biomasa seca de vástago, y, comparado a los demás tratamientos, podría haberse dado un efecto dilución en aquellos con un número superior de hojas dando menor contenido de nitrógeno en el tejido foliar; como lo menciona Farias (2012) para el contenido de fósforo en poroto guandú bajo fertilización

con fosfato natural, donde los tratamientos sin aplicación de fósforo tuvieron un menor crecimiento proporcionando una mayor concentración de este nutriente en la planta. También se debe considerar el aporte de nitrógeno fijado en forma libre por *Azotobacter*, que pudo contribuir a una mayor disponibilidad hacia la planta, aunque no se tradujo en mayor crecimiento como se observa en los resultados mostrados en la tabla 42.

Comparando con los resultados obtenidos por Silva et al. (2012b) en *Phaseolus* bajo la misma dosis de polvo de basalto utilizada en este trabajo, los niveles de N y P fueron inferiores a lo obtenido por este autor; y en cambio Ca y Mg se vieron favorecidos, duplicando e incrementando su concentración en un 30% respectivamente. Comparando al trabajo de Campos Ferreira (2009) en *Phaseolus* con dosis de 2,5-5 y 10 tn ha⁻¹ de polvo de basalto los niveles de N, P, K, Ca y Mg fueron superiores a este cultivo. Logrando lo mismo para estos dos últimos macronutrientes respecto a lo dado por Farias (2012) en otra leguminosa (*C. cajan*) con roca fosfato. Cavalcante et al. (2012) obtuvieron sobre un suelo argisol rojo en diferentes leguminosas para N entre 13-28 g kg⁻¹, P 2-4 g kg⁻¹, K 13-28 g kg⁻¹, Mg 1-4 g kg⁻¹, y Ca 3-11 g kg⁻¹, ubicándose los resultados aquí obtenidos alrededor del límite inferior para nitrógeno, concentraciones menores en P, y superando ligeramente en K y Mg, con amplia diferencia en Ca. En este ensayo en maceta, se podría mejorar el aporte en nitrógeno y fósforo, nutrientes que no son aportados naturalmente por el polvo de basalto aplicado, al igual que lo ocurrido en avena en maceta.

Tabla 44

Análisis de la varianza para el contenido en macronutrientes foliar de caupí en maceta

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,3814 ^{ns} | 0,8428 ^{ns} | 0,1162 ^{ns} | 0,8481 ^{ns} | 0,7622 ^{ns} |
| Inoculación | 0,3065 ^{ns} | 0,5160 ^{ns} | 0,0650 ^{ns} | 0,9180 ^{ns} | 0,8900 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,3527 ^{ns} | 0,6803 ^{ns} | 0,2709 ^{ns} | 0,1555 ^{ns} | 0,1460 ^{ns} |
| CV | 24,46 | 14,02 | 16,39 | 8,66 | 17,88 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 45

Valores medios para la variable macronutrientes en hoja obtenidas en caupí en macetas

| | N | P | K | Ca | Mg |
|-------------------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| -----g kg ⁻¹ ----- | | | | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 13,25 | 0,55 | 29,50 | 36,25 | 5,75 |
| <i>Pseudomonas</i> | 10,21 | 0,41 | 35,00 | 36,92 | 5,50 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 8,88 | 0,43 | 28,00 | 36,50 | 5,67 |
| Control | 11,12 | 0,33 | 27,50 | 35,67 | 5,33 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 10,67 | 0,43 | 31,67 | 36,46 | 5,63 |
| Con basalto | 11,06 | 0,43 | 28,33 | 36,21 | 5,50 |
| Basalto*inoculante | | | | | |
| Co*sb | 11,23 | 0,40 | 29,33 | 34,67 | 5,67 |
| Az*sb | 14,90 | 0,50 | 32,00 | 38,00 | 6,50 |
| Br*sb | 6,90 | 0,37 | 26,33 | 34,67 | 5,33 |
| Ps*sb | 9,65 | 0,45 | 39,00 | 38,50 | 6,00 |
| Co*cb | 11,00 | 0,27 | 25,67 | 36,67 | 5,00 |
| Az*cb | 11,60 | 0,60 | 27,00 | 34,50 | 5,00 |
| Br*cb | 10,87 | 0,50 | 29,67 | 38,33 | 6,00 |
| Ps*cb | 10,77 | 0,37 | 31,00 | 35,33 | 5,00 |

El análisis de varianza del contenido foliar en micronutrientes mostró efecto principal del factor basalto para el elemento Cu (tabla 46). El contenido medio en este

nutriente fue favorecido con la aplicación de basalto marcando diferencia estadística frente a la ausencia de basalto (tabla 47); y si bien los demás micronutrientes marcaron una ligera tendencia de $cb > sb$, no lograron esa misma diferencia significativa.

El análisis de interacción muestra un nivel máximo de Fe con *Bradyrhizobium* sin basalto; y a un *Azotobacter* con basalto duplicando no significativamente su contenido respecto a *Azotobacter* sin basalto. Situación similar ocurre con el elemento Cu, donde *Azotobacter* y *Pseudomonas* con basalto dieron contenidos de aproximadamente el doble respecto a los tratamientos sin basalto, con un contenido máximo en el tratamiento control con basalto, sin alcanzar diferencias. En Mn el tratamiento con *Azotobacter* presentó las mayores diferencias entre el uso y no de basalto siendo el valor máximo el obtenido por Az^*cb , no significativamente.

Las concentraciones foliares de micronutrientes fueron cercanas a las obtenidos por Silva et al. (2012) en *Phaseolus vulgaris* con 5 t ha^{-1} de polvo de basalto, ligeramente superiores en Cu, Mn y Zn. Ferreira Campos et al. (2009) con el agregado de dos tipos de polvo de basalto obtuvo una secuencia en contenido foliar en *Phaseolus* de $Fe > Mn > Zn > Cu$, en cambio en caupí se obtuvo una secuencia de $Mn > Fe > Zn > Cu$, igual a lo obtenido en los ensayos en avena. Si bien el contenido en Mn fue ligeramente superior en los tratamientos con basalto, en ningún caso se dio diferencias significativas, posiblemente debido a que el suelo contenía buena proporción de este elemento.

Tabla 46

Análisis de la varianza para el contenido de micronutrientes foliar de caupí en maceta

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,3704 ^{ns} | 0,0282* | 0,5605 ^{ns} | 0,6960 ^{ns} |
| Inoculación | 0,5328 ^{ns} | 0,4369 ^{ns} | 0,9629 ^{ns} | 0,5496 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,4317 ^{ns} | 0,9381 ^{ns} | 0,4565 ^{ns} | 0,8517 ^{ns} |
| CV | 13,20 | 12,75 | 8,75 | 6,28 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 47

Comparación de medias para la variable micronutrientes en hojas estudiadas en caupí para el ensayo en macetas*

| | Fe | Cu | | Mn | Zn |
|---------------------------|--------|-------|---|--------|-------|
| -----ppm----- | | | | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 174.62 | 13.01 | A | 381,00 | 59.09 |
| <i>Pseudomonas</i> | 150,77 | 11.34 | A | 333.62 | 68.12 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 248.09 | 17.41 | A | 364.81 | 73.43 |
| Control | 222.97 | 18.02 | A | 337.42 | 71.12 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 180,09 | 11.62 | B | 341.53 | 66.67 |
| Con basalto | 218.14 | 18.28 | A | 366.90 | 69.21 |
| Basalto*inoculante | | | | | |
| Co*sb | 192.14 | 14.21 | A | 332.87 | 72.32 |
| Az*sb | 104.29 | 8.41 | A | 286.92 | 60,22 |
| Br*sb | 257.49 | 15.77 | A | 398.63 | 71.47 |
| Ps*sb | 166.43 | 8.08 | A | 347.69 | 62.66 |
| Co*cb | 253.81 | 21.84 | A | 341.97 | 69.91 |
| Az*cb | 244.95 | 17.62 | A | 475.08 | 57.96 |
| Br*cb | 238.69 | 19.06 | A | 330,99 | 75.39 |
| Ps*cb | 135.10 | 14.59 | A | 319.55 | 73.58 |

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Del análisis nutricional del suelo al finalizar el ensayo, no se obtuvieron niveles significativos para los factores ni para la interacción en macronutrientes (tabla 48). Con el factor inoculación las concentraciones resultantes para los diferentes macronutrientes fueron similares, destacándose *Azotobacter* y *Bradyrhizobium* y con el factor basalto hay una leve tendencia en incrementar sus concentraciones con el uso de este (tabla 49).

Los aportes nutritivos con basalto son variables, según las especies vegetales, el tipo de basalto, el suelo utilizado; en este sentido Carvalho (2012) obtuvo en *Phaseolus vulgaris*, un incremento solo en los niveles de fósforo con el uso de polvo de basalto, manteniéndose los demás nutrientes similares entre los tratamientos, en cambio Campos Ferreira et al. (2009) no lograron incrementos significativos para nutrientes en suelo con dos tipos de polvo de basalto.

Para la interacción de microorganismos y uso de basalto, el contenido del suelo para los nutrientes N, P, Ca y Mg mostraron valores homogéneos, aunque *Bradyrhizobium* con basalto y *Azotobacter* sin basalto lograron incrementar el nivel de P frente a *Bradyrhizobium* sin basalto y *Azotobacter* con basalto. Silva et al. (2012) en *Phaseolus vulgaris* con diferentes dosis de polvo de basalto (0- 2,5- 5- 10 y 20 t ha⁻¹) con y sin agregado de estiércol bovino y con un tratamiento con fertilización convencional, no verificaron diferencias para Ca, Mg y P entre los tratamientos; siendo el K el único nutriente beneficiado en el tratamiento de fertilización convencional frente al testigo, según los autores por la fuente soluble agregada como cloruro de potasio lo que contribuyó a un aumento temporal de este elemento en el suelo. Hanisch et al. (2013) lograron un incremento en los niveles de K en el suelo a los 9 meses post aplicación en forma conjunta con abonos orgánicos; ya que el uso de polvo de basalto sin agregados orgánicos no marcó incrementos en ninguno de los nutrientes medidos. Esto conlleva a evaluar el uso conjunto de polvo de basalto con compuestos orgánicos, sean abono o lombricompuestos para incrementar la actividad biológica del suelo, ya que los microorganismos necesitan C, N y P como fuente de energía y estructura para llevar a cabo todos sus procesos metabólicos, entre ellos, mecanismos de solubilización de nutrientes; al igual a lo dado en macetas. Además según la composición inicial en suelo, sería bueno lograr un aporte en K, posiblemente con microorganismos específicos en su biosolubilización.

Tabla 48

Análisis de la varianza del contenido de macronutrientes en suelo para caupí en maceta

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,2220 ^{ns} | 0,5794 ^{ns} | 0,1590 ^{ns} | 0,2568 ^{ns} | 0,4984 ^{ns} |
| Inoculación | 0,4197 ^{ns} | 0,8844 ^{ns} | 0,1620 ^{ns} | 0,9394 ^{ns} | 0,9651 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,9090 ^{ns} | 0,1740 ^{ns} | 0,1447 ^{ns} | 0,7992 ^{ns} | 0,7734 ^{ns} |
| CV | 7,46 | 6,16 | 10,88 | 11,98 | 21,87 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 49

Valores promedios para la variable macronutrientes en suelo de caupí en macetas

| Factores | N | P | K | Ca | Mg |
|---------------------------|------|------|-------------------------------|------|------|
| | % | ppm | ---cmolc kg ⁻¹ --- | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 0,03 | 6.52 | 0,23 | 2.47 | 0,82 |
| <i>Pseudomonas</i> | 0,03 | 5.78 | 0,17 | 2.40 | 0,83 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 0,04 | 6.27 | 0,12 | 2.50 | 0,80 |
| Control | 0,03 | 5.95 | 0,15 | 2.48 | 0,78 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 0,03 | 5.90 | 0,14 | 2.39 | 0,78 |
| Con basalto | 0,04 | 6.36 | 0,19 | 2.53 | 0,83 |
| Basalto*inoculante | | | | | |
| Co*sb | 0,03 | 5.17 | 0,17 | 2.37 | 0,77 |
| Az*sb | 0,03 | 7.17 | 0,13 | 2.37 | 0,77 |
| Br*sb | 0,04 | 5.13 | 0,1 | 2.4 | 0,83 |
| Ps*sb | 0,03 | 6.13 | 0,17 | 2.43 | 0,77 |
| Co*cb | 0,04 | 6.73 | 0,13 | 2.6 | 0,8 |
| Az*cb | 0,03 | 5.87 | 0,33 | 2.57 | 0,87 |
| Br*cb | 0,05 | 7.4 | 0,13 | 2.6 | 0,77 |
| Ps*cb | 0,03 | 5.43 | 0,17 | 2.37 | 0,9 |

Según los resultados obtenidos en el ANOVA no fue posible encontrar efectos significativos con las variables estudiadas (tabla 50). El contenido promedio de micronutrientes en el suelo (tabla 51), tanto para el factor inoculante como para el uso de polvo de basalto tuvieron un comportamiento similar, destacándose el control frente a los microorganismos para Fe y Cu; y *Bradyrhizobium* en Mn y Zn. En este sentido, Hanisch et al. (2013) evaluando la producción de soja y maíz con la adición de polvo de basalto con y sin agregado de abono orgánico, obtuvieron solamente para Zn diferencias a favor del polvo de basalto junto con abono orgánico y a los 21 meses de incubación. En esta misma línea, el uso conjunto de polvo de roca con lombricomposto mejoró la disponibilidad de micronutrientes en suelo para un cultivo de maíz (Souza et al., 2013) y Melo et al. (2012) lograron un aumento lineal en los tenores de Fe, Cu y Zn con el incremento de las dosis de polvo de roca de igual tamaño al utilizado aquí ($\leq 0,05$ mm de diámetro), en un período de incubación de 5 meses. Otros autores lograron una mayor productividad con el uso conjunto de basalto y abono orgánico en frutilla (Camargo et al., 2012) y en poroto sobre un suelo más rico en materia orgánica con la utilización de polvo de basalto (Campos Ferreira et al., 2009). Estos resultados muestran que la solubilidad de los nutrientes en el polvo de basalto aumentaría con una mayor actividad biológica, lo que se logra en suelos ricos en materia orgánica, o en suelos más degradados o pobres en nutrientes con el aporte conjunto de otras fuentes orgánicas, que no solo enriquecen en nutrientes como nitrógeno y carbono sino también aportan microflora potencial solubilizante. Considerando, a partir de los trabajos mencionados, también los tiempos de incubación y las dosis utilizadas como componentes importantes en el proceso de solubilización de las rocas de basalto.

Tabla 50

Análisis de la varianza del contenido de micronutrientes en suelo para caupí en maceta

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,1086 ^{ns} | 0,2765 ^{ns} | 0,2294 ^{ns} | 0,5986 ^{ns} |
| Inoculación | 0,3546 ^{ns} | 0,3058 ^{ns} | 0,6794 ^{ns} | 0,6960 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,1749 ^{ns} | 0,2570 ^{ns} | 0,8253 ^{ns} | 0,5380 ^{ns} |
| CV | 7,42 | 7,54 | 19,91 | 11,60 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 51

Concentración promedio para la variable micronutrientes en suelo de caupí en macetas

| Tratamientos | Fe | Cu | Mn | Zn |
|---------------------------|-------|------|-------|------|
| -----ppm----- | | | | |
| Inoculantes | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 10,97 | 1,33 | 17,64 | 2,42 |
| <i>Pseudomonas</i> | 11,47 | 1,00 | 17,82 | 2,27 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 12,76 | 1,14 | 19,72 | 2,43 |
| Control | 14,61 | 1,41 | 19,48 | 2,32 |
| Basalto | | | | |
| Sin basalto | 11,19 | 1,13 | 19,61 | 2,33 |
| Con basalto | 13,71 | 1,31 | 17,72 | 2,39 |
| Basalto*inoculante | | | | |
| Co*sb | 12,30 | 1,10 | 21,45 | 2,33 |
| Az*sb | 10,71 | 1,49 | 18,05 | 2,47 |
| Br*sb | 13,47 | 0,95 | 20,97 | 2,26 |
| Ps*sb | 8,30 | 0,98 | 17,97 | 2,25 |
| Co*cb | 16,92 | 1,71 | 17,51 | 2,32 |
| Az*cb | 11,23 | 1,16 | 17,22 | 2,36 |
| Br*cb | 12,06 | 1,34 | 18,46 | 2,60 |
| Ps*cb | 14,63 | 1,02 | 17,67 | 2,28 |

Con respecto a la micorrización total no se obtuvo un efecto principal ni de interacción significativo según el análisis de varianza (tabla 52). Se pueden ver los valores medios en la tabla 53, donde la bacteria *Pseudomonas* destacó sobre los otros microorganismos y en cuanto al factor basalto la micorrización se vio favorecida en presencia del mismo en niveles no significativos. En la figura 28 pueden observarse las diferentes estructuras encontradas en las raíces de caupí, representando para el factor basalto, de la micorrización total, un 20% de hifas, arbusculos en un 7% sin basalto y un 13% con basalto, y las vesículas alrededor del 10 y 20 % sin y con basalto respectivamente.

Tabla 52

Análisis de la varianza para la variable micorrización total para caupí en maceta

| | MT |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,2808 ^{ns} |
| Inoculación | 0,6621 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,0684 ^{ns} |
| CV | 26,43 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 53

Valores medios para la variable micorrización en caupí-ensayo en macetas

| Factores | MT |
|-----------------------|-------|
| | % |
| <i>Azotobacter</i> | 38,33 |
| <i>Pseudomonas</i> | 49,67 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 39,33 |
| Control | 46,67 |
| Sin basalto | 38,50 |
| Con basalto | 48,50 |

MT: micorrización total

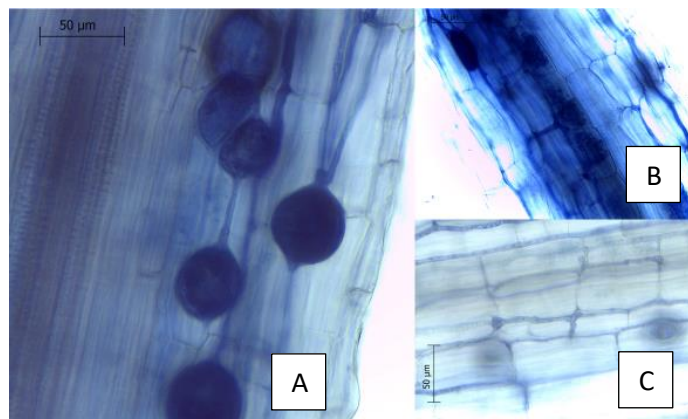


Figura 28. Estructuras observadas en microscopio Leica ICC50 aumento 40X. A: vesículas presentes en las raíces de caupí; B: arbusculos en las raíces de caupí; C: hifas presentes.

La micorrización total en la interacción (Figura 29) estuvo en un rango de 24 a 67% de infección; rangos similares a los obtenidos por Kongpun et al. (2011) con porcentajes del 40 a 57 % en caupí inoculado con hongos vesículo arbusculares en suelos ácidos y no ácidos con 3 niveles de fósforo. Carvalho (2012) trabajó con polvo de roca y abonos orgánicos sobre *Phaseolus vulgaris*, el cual no encontró efecto sobre la colonización micorrízica; repitiendo estos resultados nuevamente en maíz con polvo de roca (Carvalho et al. 2013). El hecho de que no se haya dado una disminución en la colonización micorrízica muestra que el polvo de basalto no resulta perjudicial en el establecimiento de este tipo de simbiosis en estos suelos.

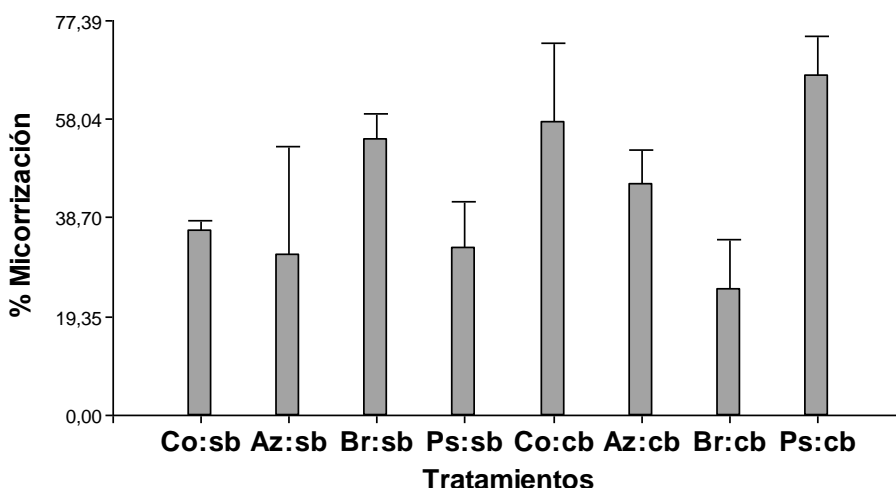


Figura 29. Medias obtenidas para la variable micorrización en poroto caupí en macetas. MT: micorrización total.

La actividad biológica global, al igual que la micorrización espontánea, no logró marcar efectos significativos en el análisis de varianza (tabla 54). Los niveles de dióxido de carbono desprendido por factor son discriminados en la tabla 55. En la figura 30 se puede observar que los valores máximos de respiración son similares a los obtenidos en el cultivo de avena negra en macetas bajo el mismo suelo, pero muestreado en un período diferente otoño-invernal; solo algunos tratamientos, como los que contenían *Azotobacter*, tuvieron un leve incremento en la respiración en este período primavera estival, esta bacteria presenta una alta tasa respiratoria, mecanismo por el cual protege a la nitrogenasa, enzima encargada de la fijación de nitrógeno. Souza et al. (2011) no encontraron modificaciones en la actividad respiratoria del suelo utilizando diferentes polvos de basalto en una dosis de 3 t ha⁻¹. Al contrario de Priyono et al. (2009), que

tuvieron un incremento significativo en esta variable en algunos de los suelos evaluados con aplicación de rocas silicatadas molidas.

Si bien puede decirse que el uso de basalto no alteró negativamente la actividad biológica del suelo, posiblemente sean necesarias otras prácticas que incrementen la actividad biológica del suelo, como lo concluyó Koseira et al. (2009) en su trabajo sobre *Phaseolus vulgaris* y *Vigna angularis*, los cuales no aumentaron su producción bajo las diferentes dosis de basalto aplicadas al suelo. Como se mencionó antes, estos suelos son pobres en materia orgánica, por lo cual es esperable que su actividad biológica también lo sea; pero dada la necesidad de mecanismos biosolubilizantes para el polvo de basalto, sería importante incluir en el sistema prácticas de incorporación de abonos; como así también la evaluación de estos cultivos que tuvieron aplicación de polvo de basalto post incorporación como abonos verdes y en cultivos posteriores.

Tabla 54

Análisis de la varianza para la actividad biológica global en caupí en maceta

| | ABG |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,8179 ^{ns} |
| Inoculación | 0,9988 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,9496 ^{ns} |
| CV | 18,76 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 55

Valores promedios para la variable actividad biológica global en caupí en macetas

| Tratamientos | ABG mgCO ₂ 100gsuelo ⁻¹ |
|-----------------------|--|
| <i>Azotobacter</i> | 5,67 |
| <i>Pseudomonas</i> | 5,41 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 5,33 |
| Control | 5,33 |
| Sin basalto | 5,54 |
| Con basalto | 5,33 |

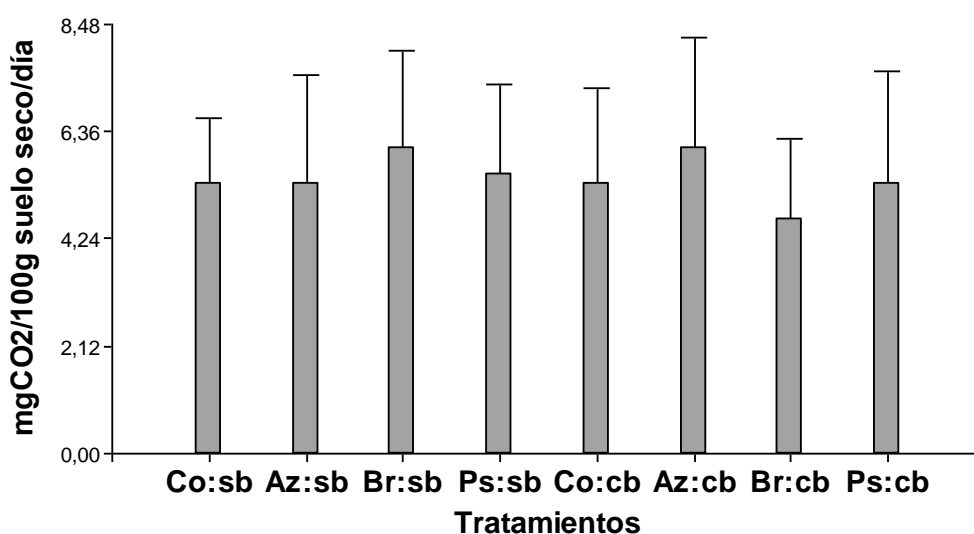


Figura 30. Medias obtenidas para la variable actividad biológica global en suelo del ensayo caupí en macetas.

Ensayo en campo-Caupí

La biomasa seca de caupí obtenida a campo no presentó efecto principal ni de interacción de manera significativa (tabla 56). Los datos obtenidos por parcela en cuanto a la producción en materia seca fue promediada por planta y expresada en g planta⁻¹ (tabla 57 y figura 33), y llevada a producción por hectárea (tabla 58).

Los resultados por factor (inoculación y uso de polvo de basalto), muestran para el factor inoculante al microorganismo *Bradyrhizobium* con el valor más alto, con una diferencia de 10 g respecto al valor más bajo, siguiendo una tendencia Br>Az>Ps>Co. Para el factor basalto, la diferencia entre el uso y no del mismo fue mínima. Stamford et al. (2004) trabajando con caupí inoculados con rizobios, más el agregado de roca fosfato y un microorganismo productor de ácidos como solubilizador, obtuvieron en los tratamientos con la inoculación de rizobios valores superiores en biomasa aérea respecto a los tratamientos sin rizobios; y ambos grupos de tratamientos, tanto con y sin inoculación con el simbiote del caupí, incluyeron al microorganismo productor de ácido con la mayor biomasa respecto al control.

El peso promedio de la biomasa seca de caupí, 60 dps, tuvo al tratamiento Br*cb con el valor más alto y al tratamiento Co*cb con el valor mínimo, con una diferencia no significativa entre ambos de 20 gMS planta⁻¹ (figura 31), algo diferente a lo dado en maceta, que si bien los tratamientos con *Bradyrhizobium* estuvieron dentro de los de mayor producción, el control con basalto había sido de los más altos también. Silva et al. (2012) tampoco registraron aumentos significativos en la productividad del poroto común al incrementar las dosis de basalto, en un suelo pardo mullido de la República de Cuba. Al igual que Campos Ferreira et al. (2009), quienes no lograron aumento en la productividad de *Phaseolus* con polvo de basalto, solo un pequeño incremento en la productividad de granos del poroto común en la mezcla de basalto y abono orgánico.

La cantidad de materia seca obtenida a los 60 días post siembra fue entre 75 y 95 g planta⁻¹, aproximadamente el doble a lo obtenido por Gonzalez Aguiar et al. (2018) a los 115 días post siembra, en un monocultivo de caupí sobre un suelo arcilloso de Brasil con un espaciamiento entre plantas menor (0,10 m). Si bien hubo una respuesta limitada en el caupí ante el agregado de polvo de basalto combinado con los microorganismos, al llevar la producción de biomasa por hectárea, puede observarse una diferencia de casi mil kilogramos entre la combinación de basalto con *Bradyrhizobium* al uso solo de basalto (tabla 58). El rango de producción estuvo entre 3500-4500 kg ha⁻¹. Según Peters et al. (2011) el caupí, dependiendo del suelo y clima, puede dar entre 3-8 tnMS ha⁻¹ en un período de 2-4 meses. Shindoi et al. (2012) obtuvieron en promedio una producción de 7600 kg ha⁻¹ en la biomasa seca de caupí en un suelo argiudol de la región chaqueña, aproximadamente el doble a lo obtenido, teniendo en cuenta las diferencias en el tipo de suelo.

Si bien no se presentaron significancias estadísticas, el aumento en producción observado con la inoculación de microorganismos, principalmente *Bradyrhizobium*, permite abrir otros estudios hacia la obtención de mayor producción utilizando a los inoculantes en estos cultivos de pequeña a mediana escala en la región de Corrientes, siendo el caupí un cultivo en crecimiento dado las utilidades que se van desarrollando actualmente, como producción de harinas, bebidas proteicas, además de ser utilizada como abono verde y alimento para animales.

Tabla 56

Análisis de varianza de la producción de biomasa seca de la parte aérea en caupí campo

| Factores de variación | p-valor |
|------------------------------|----------------|
| basalto | 0,8209 |
| inoculación | 0,8679 |
| Basalto*inoculación | 0,8544 |
| CV | 24,68 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 57

Valores medios para la variable producción de biomasa seca en vástago de caupí, expresada en g planta⁻¹

| Factores | BV |
|-----------------------|------------------------|
| | g planta ⁻¹ |
| <i>Azotobacter</i> | 87,63 |
| <i>Pseudomonas</i> | 83,17 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 88,80 |
| Control | 79,73 |
| Sin basalto | 83,85 |
| Con basalto | 85,82 |

BV: biomasa seca de vástago

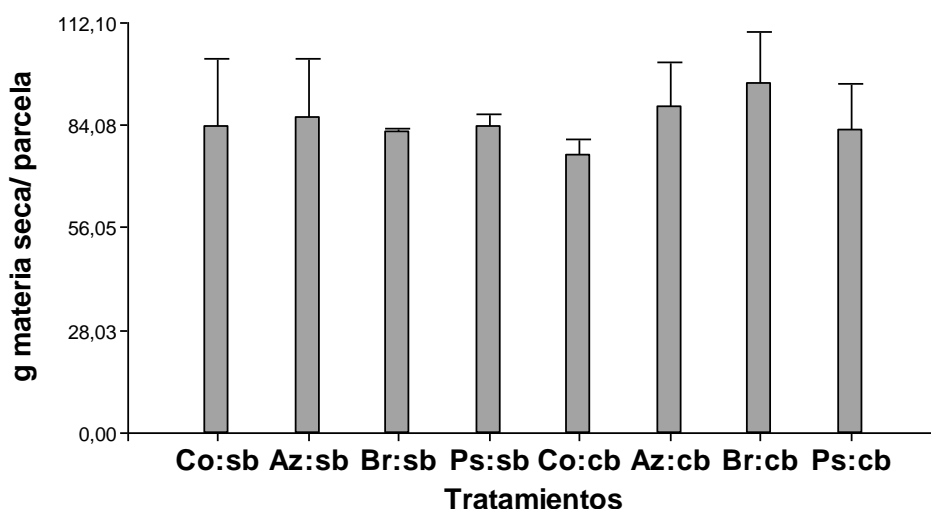


Figura 31. Medias obtenidas para la variable biomasa seca de vástago por planta del ensayo caupí en campo.

Tabla 58

Valores promedios de producción de biomasa seca en vástago de caupí, expresada en kg ha⁻¹

| Tratamientos | Biomasa seca vástago |
|--------------|----------------------|
| | Kg ha ⁻¹ |
| Co*sb | 3901,27 |
| Az*sb | 4013,30 |
| Br*sb | 3839,03 |
| Ps*sb | 3898,17 |
| Co*cb | 3540,37 |
| Az*cb | 4165,73 |
| Br*cb | 4448,83 |
| Ps*cb | 3863,93 |

El análisis de varianza para la variable macronutrientes foliar no mostró efectos para los los factores ni en la interacción de ambos, como puede verse en la tabla 59.

El contenido nutricional promedio en hojas, discriminado por factor (tabla 60), muestra con respecto a la inoculación, que *Bradyrhizobium* aunque es un microorganismo capaz de establecer simbiosis con Fabáceas para la fijación de nitrógeno, fue el que menor aporte aparente de nitrógeno dio en el contenido foliar a los 60 días de siembra, al igual que lo obtenido en macetas (tabla 45). En cuanto al factor basalto fue levemente superior en Ca y Mg con el uso del mismo, pero inferior en N, P y K; con diferencias mínimas entre el uso y no de basalto. En este sentido, Erhart (2009) no encontró modificaciones en los tenores de macronutrientes foliares (N, P, K, Ca y Mg), en este caso en vid, con la aplicación de dosis crecientes de polvo de basalto sin otro agregado de nutrientes o microorganismos solubilizadores. La interacción de inoculante y basalto mostró para nitrógeno un mínimo de 9,33 g kg⁻¹ en el control con basalto y un máximo en *Pseudomonas* sin basalto con 16,60 g kg⁻¹; los tratamientos con *Bradyrhizobium* siguieron al Co*cb ubicándose cerca del valor mínimo obtenido. Como se mencionó en el análisis del factor inoculante, siendo una leguminosa los resultados podrían haber sido más favorables para este microorganismo dada la asociación simbiótica entre ellos.

Las concentraciones obtenidas son similares a las registradas por Cavalcante et al. (2012) sobre un suelo argisol rojo en diferentes leguminosas para N (13-28 g kg⁻¹), P (2-4 g kg⁻¹), K (13-28 g kg⁻¹), Mg (1-4 g kg⁻¹), y fueron superiores para Ca en más del 50% (3-11 g kg⁻¹). También resultaron coincidentes a los hallados por Silva et al. (2012) en *Phaseolus vulgaris* sobre un suelo arcilloso y bajo una dosis de polvo de basalto igual a la utilizada en el presente trabajo (5 t ha⁻¹), con niveles de P de 3 g kg⁻¹, K alrededor de 30 g kg⁻¹ y Mg con 3-4 g kg⁻¹; sin embargo la concentración de N representa alrededor del 50% del obtenido en *Phaseolus* (25-27 g kg⁻¹); y el contenido de Ca dio un 60% por encima del valor dado en el poroto común (alrededor de 17 g kg⁻¹). La ausencia de efectos sobre el contenido foliar con el uso de polvo de basalto también fue obtenida por Campos Ferreira et al. (2009) trabajando con dos polvos de basalto de diferentes orígenes, quienes constataron que la aplicación de estos no influenció el contenido en nutrientes del poroto común (*Phaseolus vulgaris*), obteniendo niveles foliares de N, P, K, Ca y Mg por debajo de lo obtenido en este trabajo. En la tabla 60 puede verse que los valores medios obtenidos para los tratamientos combinados con basalto tienen más diferencias entre ellos, en cambio los niveles sin el uso de basalto son más uniformes entre los microorganismos. Las diferencias encontradas en las concentraciones de N y P respecto a los trabajos mencionados son por la falta de aportes externos a un suelo pobre en estos nutrientes.

Tabla 59

Análisis de la varianza del contenido en macronutrientes foliar en caupí campo

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,2626 ^{ns} | 0,6885 ^{ns} | 0,4703 ^{ns} | 0,4480 ^{ns} | 0,9890 ^{ns} |
| Inoculación | 0,3762 ^{ns} | 0,6175 ^{ns} | 0,2557 ^{ns} | 0,9980 ^{ns} | 0,5140 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,8537 ^{ns} | 0,6175 ^{ns} | 0,8818 ^{ns} | 0,8421 ^{ns} | 0,5840 ^{ns} |
| CV | 9,39 | 15,19 | 16,10 | 6,49 | 7,34 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 60

Valores promedios de la variable macronutrientes foliar estudiadas en caupí a campo

| | N | P | K | Ca | Mg |
|-------------------------------|-------|------|-------|-------|------|
| -----g kg ⁻¹ ----- | | | | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 13,57 | 3,33 | 20,67 | 28,17 | 4,50 |
| <i>Pseudomonas</i> | 15,02 | 3,17 | 23,67 | 28,33 | 3,67 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 11,05 | 3,50 | 24,00 | 28,33 | 4,67 |
| Control | 11,03 | 3,17 | 20,83 | 28,33 | 4,00 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 13,53 | 3,33 | 22,83 | 28,00 | 4,17 |
| Con basalto | 11,81 | 3,25 | 21,75 | 28,58 | 4,25 |
| Basalto*Inoculante | | | | | |
| Co*sb | 12,73 | 3,00 | 21,33 | 28,33 | 3,67 |
| Az*sb | 12,63 | 3,33 | 20,33 | 27,33 | 4,00 |
| Br*sb | 12,13 | 3,67 | 24,67 | 28,00 | 5,00 |
| Ps*sb | 16,60 | 3,33 | 25,00 | 28,33 | 4,00 |
| Co*cb | 9,33 | 3,33 | 20,33 | 28,33 | 4,33 |
| Az*cb | 14,50 | 3,33 | 21,00 | 29,00 | 5,00 |
| Br*cb | 9,97 | 3,33 | 23,33 | 28,67 | 4,33 |
| Ps*cb | 13,43 | 3,00 | 22,33 | 28,33 | 3,33 |

Las concentraciones foliares de micronutrientes tuvieron el mismo comportamiento que los macronutrientes, no mostrando significancia en el análisis de varianza (tabla 61). Los microorganismos se comportaron diferente en cada micronutriente; a diferencia del factor basalto, donde el uso de este obtuvo siempre el menor valor con una diferencia mínima, sin mostrar efecto significativo en ambos casos (tabla 62). Los contenidos promedios en cada tratamiento muestran que algunos microorganismos presentan mayor contenido en ausencia de basalto para algunos micronutrientes y un contenido mínimo en otros. En Fe hay diferencias de 70 ppm entre el valor máximo y mínimo, Mn de 130 ppm y Zn de 15 ppm. Respecto al Cu, el tratamiento Co*sb duplica en concentración al tratamiento Co*cb; sin embargo, ningún microelemento presentó incrementos significativos en su contenido foliar. Comparando estos resultados a los obtenidos por Silva et al. (2012) en *Phaseolus vulgaris* bajo la aplicación 5 t ha⁻¹ de polvo de basalto, el contenido en Fe fue inferior al obtenido en el poroto común, las concentraciones en general de Zn y Cu fueron similares, y Mn fue tres veces superior a lo obtenido en ese cultivo (200 mg kg⁻¹). Al igual que lo sucedido en maceta con caupí y en ambos ensayos de avena; el suelo está realizando un aporte importante de este micronutriente, posiblemente ayudado por el pH del suelo, que deja una mayor disponibilidad del mismo. Otros autores reportan concentraciones similares de Fe y Cu en crotalaria, poroto lab lab y guandú respecto a lo obtenido aquí; en mucuna el contenido de Fe fue altamente superior respecto al obtenido en caupí; y en todas las leguminosas evaluadas el contenido en Mn y Zn fueron alrededor del 30% menos a las concentraciones dadas en este trabajo (Cavalcante et al. 2012).

Al igual que lo dado en maceta y en el cultivo de avena la secuencia de micronutrientes fue de Mn>Fe>Zn>Cu, diferente a lo obtenido por Campos Ferreira et al. (2009) y a lo anteriormente mencionado como adecuado en avena, Fe>Mn>Zn>Cu. Una alta concentración en suelo de Mn puede afectar la disponibilidad del Fe y Zn, por lo que es un dato a tener en cuenta en posteriores estudios. Si bien las plantas no han mostrado síntomas de intoxicación por Mn, Kalra (1998) menciona concentraciones excesivas entre 300-500 ppm de Mn en hoja y Barbazán (1998) considera que el Mn en hoja puede variar de 20-500 ppm, valores que variaran según la especie vegetal, estado del cultivo, entre otros. Si observamos la figura 31 y relacionada al contenido foliar en Mn, los tratamientos con menor biomasa fueron aquellos que tuvieron concentraciones

superiores a 700 ppm. Podría ser un efecto de dilución, al tener menor biomasa se concentra este nutriente; aunque también considerar un efecto negativo respecto a la acumulación de biomasa. Si bien los tratamientos que superaron esta concentración de Mn en hojas fueron tanto sin basalto como con basalto, hay que tener en cuenta que una solubilización mayor del basalto en suelos que ya presentan un buen contenido inicial en este nutriente traería inconvenientes en la absorción de otros minerales, en la acumulación de biomasa e inclusive provocar síntomas de toxicidad en planta. Si comparamos a lo obtenido en macetas, las concentraciones de Mn resultantes del ensayo a campo duplicaron a estas, esto podría deberse a las condiciones meteorológicas dadas, si se observa la tabla 40, las precipitaciones fueron altas durante el ciclo del cultivo, esto podría aumentar la solubilidad y absorción de este micronutriente, tanto del suelo como del basalto; o también la mayor exploración de un volumen de suelo mayor, con una mayor cantidad de raíces, aportando en la solubilización, como es mencionado por Hissinger (2001).

Tabla 61

Análisis de la varianza para micronutrientes a nivel foliar en caupí a campo

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,2250 ^{ns} | 0,7238 ^{ns} | 0,9076 ^{ns} | 0,5783 ^{ns} |
| Inoculación | 0,1771 ^{ns} | 0,8005 ^{ns} | 0,7280 ^{ns} | 0,5569 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,2727 ^{ns} | 0,3457 ^{ns} | 0,9216 ^{ns} | 0,6082 ^{ns} |
| CV | 7,22 | 9,19 | 6,63 | 20,52 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 62

Contenido medio en micronutrientes a nivel foliar estudiadas en caupí a campo

| Factores | Fe | Cu | Mn | Zn |
|---------------------------|--------|-------|--------|-------|
| | ppm | | | |
| Inoculantes | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 154,84 | 13,44 | 630,65 | 53,86 |
| <i>Pseudomonas</i> | 103,45 | 12,54 | 737,54 | 45,54 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 125,47 | 12,02 | 686,17 | 52,00 |
| Control | 129,65 | 15,81 | 700,96 | 51,37 |
| Basalto | | | | |
| Sin basalto | 138,54 | 14,04 | 696,15 | 51,90 |
| Con basalto | 118,17 | 12,87 | 681,52 | 49,49 |
| Basalto*inoculante | | | | |
| Co*sb | 141,30 | 20,71 | 691,80 | 51,88 |
| Az*sb | 167,45 | 12,20 | 630,13 | 52,45 |
| Br*sb | 154,48 | 11,17 | 728,63 | 51,61 |
| Ps*sb | 90,93 | 12,08 | 734,02 | 51,65 |
| Co*cb | 117,99 | 10,91 | 710,11 | 50,86 |
| Az*cb | 142,24 | 14,69 | 631,17 | 55,26 |
| Br*cb | 96,46 | 12,87 | 643,72 | 52,40 |
| Ps*cb | 115,97 | 13,01 | 741,06 | 39,43 |

En cuanto al análisis nutricional del suelo, como puede observarse en la tabla 63, el análisis de varianza no acusó efectos principales ni de interacción. Los contenidos medios obtenidos para los macronutrientes son mostrados en la tabla 64; para el factor inoculante, el P es el único nutriente con un rango amplio en sus valores, mostrando a la inoculación con *Pseudomonas* con el mayor contenido y *Azotobacter* con el menor contenido; lo que se observa también en la interacción con el uso o no de polvo de basalto, donde *Pseudomonas* y *Bradyrhizobium* sin basalto frente a las demás combinaciones tuvieron en su mayoría un incremento de más del doble. Desde el punto

de vista del factor basalto hubo una diferencia del 50% aproximadamente a favor de la ausencia de polvo de basalto. El tiempo de incubación podría ser uno de los motivos por lo cual no se logró diferencias con el uso de basalto en la solubilización de los nutrientes, a pesar del uso de microorganismos que puedan mejorar su disponibilidad. En este sentido, Beneduzzi (2011) concluyó que la concentración de nutrientes en la solución del suelo aumenta a lo largo del tiempo después de aplicar polvo de roca; Escosteguy y Klamt (1998) obtuvieron un incremento en las concentraciones de Ca y K al aumentar el tiempo de incubación (150 a 300 días), aunque los aumentos no fueron significativos e importantes para el nivel requerido. Posiblemente la combinación del polvo de basalto con esos microorganismos o el período de ensayo no resultó efectivo para aumentar el contenido de macronutrientes en este suelo, principalmente el K, Ca y Mg que son los aportados por el polvo de basalto. Hanisch et al. (2013) no observaron efecto del polvo de basalto a los 9 meses post aplicación en el contenido de macronutrientes en suelo, según el autor consecuencia del reducido período de solubilización del basalto, encontrando recién a partir de los 14 meses una tendencia a incrementar el contenido en los tratamientos con polvo de basalto solo en P y algunos micronutrientes. Campos Ferreira et al. (2009) tampoco pudieron constatar aumentos en el contenido de macronutrientes en suelo luego de 12 meses post aplicación. Erhart (2009) evaluando el efecto del polvo de basalto en vid, en diferentes dosis (0, 10, 20 y 50 t ha⁻¹) puro o asociados con estiércol bovino (5 t ha⁻¹) observó que el contenido en K, Ca y Mg no se modificaron con las dosis crecientes de polvo de basalto.

Tabla 63

Análisis de la varianza para macronutrientes en suelo en caupí a campo

| | N | P | K | Ca | Mg |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,3322 ^{ns} | 0,0735 ^{ns} | s/d | 0,5651 ^{ns} | 0,1577 ^{ns} |
| Inoculación | 0,4182 ^{ns} | 0,1102 ^{ns} | s/d | 0,8641 ^{ns} | 0,5545 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,4182 ^{ns} | 0,2905 ^{ns} | s/d | 0,9784 ^{ns} | 0,7195 ^{ns} |
| CV | 14 | 9,19 | 0,0 | 10,52 | 6,18 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 64

Contenido medio en macronutrientes en suelo estudiadas en caupí a campo

| | N | P | K | Ca | Mg |
|---------------------------|----------|----------|------------|------------------|-----------|
| | % | ppm | -----cmolc | kg ⁻¹ | ----- |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 0,03 | 4.57 | 0,1 | 2.32 | 0,70 |
| <i>Pseudomonas</i> | 0,03 | 11.68 | 0,1 | 2.38 | 0,63 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 0,03 | 8.70 | 0,1 | 2.28 | 0,57 |
| Control | 0,03 | 5.45 | 0,1 | 2.27 | 0,67 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 0,03 | 9.81 | 0,1 | 2.28 | 0,59 |
| Con basalto | 0,03 | 5.39 | 0,1 | 2.34 | 0,69 |
| Basalto*inoculante | | | | | |
| Co*sb | 0,03 | 4.63 | 0,1 | 2.27 | 0,63 |
| Az*sb | 0,02 | 5.30 | 0,1 | 2.30 | 0,60 |
| Br*sb | 0,03 | 11.77 | 0,1 | 2.23 | 0,50 |
| Ps*sb | 0,03 | 17.53 | 0,1 | 2.33 | 0,63 |
| Co*sb | 0,03 | 4.63 | 0,1 | 2.27 | 0,63 |
| Co*cb | 0,03 | 6.27 | 0,1 | 2.27 | 0,70 |
| Az*cb | 0,03 | 3.83 | 0,1 | 2.33 | 0,80 |
| Br*cb | 0,03 | 5.63 | 0,1 | 2.33 | 0,63 |
| Ps*cb | 0,03 | 5.83 | 0,1 | 2.43 | 0,63 |

El análisis de varianza para el contenido de micronutrientes fue significativo para el elemento Cu con el factor basalto (tabla 65). El contenido medio de este micronutriente (tabla 66), fue estadísticamente superior para el uso de basalto y verificó un incremento significativo para el en el tratamiento Co*cb respecto a todos los tratamientos sin basalto (Co*sb, Az*sb, Ps*sb y Br*sb). Esta mayor disponibilidad no se tradujo en un mayor contenido foliar, donde el tratamiento Co*sb duplicó en concentración al tratamiento Co*cb (tabla 62).

La secuencia de concentración nutricional en suelo Mn>Fe>Zn>Cu es la que se obtuvo en el contenido foliar, al igual a lo dado en el ensayo en maceta. Aunque estas diferencias en las concentraciones en Cu no se han logrado en el ensayo en maceta a nivel de suelo, si se ha obtenido una diferencia a nivel foliar en Cu, lo que no fue dado en campo.

En otros cultivos se ha informado de la actividad de las raíces y la liberación de nutrientes en basalto, Akter y Akagi (2005) encontraron efectos positivos en la liberación de nutrientes del basalto, variando según la especie vegetal, estos autores encontraron mayor liberación de Ca en maíz y soja, Fe en soja, Mg y Mn en maíz, soja y arroz; causadas estas diferencias por múltiples factores, como exudados de raíces, capacidad de complejación, química de la rizosfera, tasa de crecimiento, entre otros. Hinsinger (2001) atribuye también esta liberación a la actividad propia de la rizosfera.

Esta mayor concentración significativa del Cu en suelo, coincide con el menor porcentaje de micorrización, menor actividad biológica global y la más baja acumulación de materia seca frente a los demás tratamientos; se debería de estudiar mejor si ese nivel de Cu en suelo afectó a estas variables de alguna manera, ya que en maceta no se dio el mismo resultado.

Otros estudios indican que se requiere un mayor tiempo tiempo de incubación del polvo de basalto en suelo para lograr obtener un efecto sobre la concentración de los nutrientes. En este sentido, Melo et al. (2012) evaluaron el efecto de dosis crecientes de basalto molido (0, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 96 t ha⁻¹) en un suelo después de 6 meses de incubación sobre la disponibilidad de nutrientes, hallando una tendencia lineal en el incremento del contenido de Cu, Zn y Fe, y un aumento en el contenido de Mn. Al igual que Hanisch et al. (2013), quienes observaron un incremento lineal en Cu, Mn y Fe recién después de los 14 meses de incorporación del polvo de basalto en el suelo.

Tabla 65

Análisis de la varianza para macronutrientes en suelo en caupí a campo

| | Fe | Cu | Mn | Zn |
|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Basalto | 0,5539 ^{ns} | 0,0001* | 0,4598 ^{ns} | 0,4427 ^{ns} |
| Inoculación | 0,9615 ^{ns} | 0,2179 ^{ns} | 0,1426 ^{ns} | 0,1784 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,8700 ^{ns} | 0,0193 | 0,8782 ^{ns} | 0,9972 ^{ns} |
| CV | 21,71 | 15,53 | 16,14 | 20,05 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 66

Comparación de medias para micronutrientes en suelo de caupí a campo*

| Factores | Fe | Cu | Mn | Zn | |
|---------------------------|-------|------|----|-------|------|
| | ppm | | | | |
| Inoculantes | | | | | |
| <i>Azotobacter</i> | 9,75 | 0,88 | A | 13,82 | 1,36 |
| <i>Pseudomonas</i> | 11,88 | 0,91 | A | 15,26 | 1,57 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 13,06 | 0,82 | A | 15,99 | 1,79 |
| Control | 10,23 | 0,99 | A | 17,38 | 1,63 |
| Basalto | | | | | |
| Sin basalto | 10,03 | 0,75 | B | 16,00 | 1,64 |
| Con basalto | 12,42 | 1,05 | A | 15,22 | 1,54 |
| Basalto*inoculante | | | | | |
| Co*sb | 6,39 | 0,75 | B | 17,63 | 1,66 |
| Az*sb | 9,10 | 0,79 | B | 14,01 | 1,42 |
| Br*sb | 15,31 | 0,73 | B | 17,09 | 1,85 |
| Ps*sb | 9,33 | 0,75 | B | 15,27 | 1,63 |
| Co*cb | 14,07 | 1,24 | A | 17,13 | 1,61 |
| Az*cb | 10,39 | 0,97 | AB | 13,62 | 1,30 |
| Br*cb | 10,81 | 0,90 | AB | 14,89 | 1,73 |
| Ps*cb | 14,43 | 1,08 | AB | 15,25 | 1,51 |

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

A pesar de haber obtenido solo una porción de raíces en la cosecha del caupí, se logró la tinción de las raíces más finas y la observación en microscopio, contabilizando la micorrización total (figura 32). El análisis de varianza no mostró significancia para efectos principales ni de interacción (tabla 67). A nivel de inoculación (tabla 68), la micorrización total estuvo en los rangos de 57 a 61%, siendo un gran porcentaje en forma de hifas (30-50%), una baja proporción de arbusculos (<3%), al igual que el porcentaje de vesículas (9-21%). El porcentaje de arbusculos fue bajo en todos los tratamientos, con valores entre 0 y 4%; la menor presencia de arbusculos observados puede deberse al menor tiempo de actividad que esta estructura posee, aproximadamente de dos semanas, para después colapsar y ser absorbido por la célula vegetal (Smith y Read, 2008).

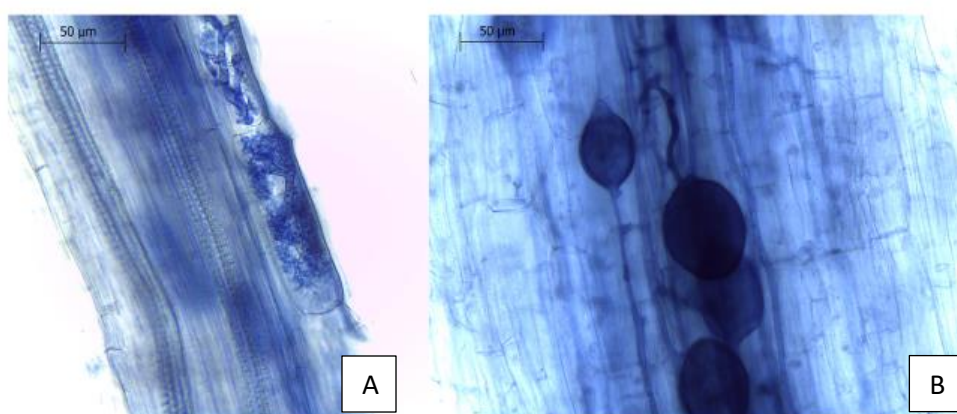


Figura 32. Estructuras observadas en microscopio Leica ICC50 aumento 40X. A: arbusculos presentes en las raíces de caupí; B: vesículas presentes en las raíces de caupí

Tabla 67

Análisis de la varianza para micorrización total en caupí a campo

| | MT |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,5729 ^{ns} |
| Inoculación | 0,9658 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,3934 ^{ns} |
| CV | 14,01 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 68

Valores medios para la variable micorrización en caupí a campo

| Factores | MT |
|-----------------------|-------|
| | % |
| <i>Azotobacter</i> | 61,00 |
| <i>Pseudomonas</i> | 57,33 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 59,00 |
| Control | 58,00 |
| Sin basalto | 57,00 |
| Con basalto | 60,67 |

La combinación de microorganismos con basalto presentó en la micorrización total porcentajes levemente superiores a los tratamientos con microorganismos en ausencia de basalto (figura 33); el tratamiento control (Co*sb) sin embargo, tuvo una diferencia mínima de 5% respecto al tratamiento con basalto sin inoculación de microorganismos (Co*cb). Winnie (2016) trabajando sobre el efecto residual del polvo de roca de basalto encontró valores de micorrización total similares a los hallados en este trabajo en un cultivo de *Phaseolus vulgaris* con aplicación de fertilizantes, fuentes de fosfato y polvo de roca de basalto (dosis equivalente a 300 t ha⁻¹); aunque el autor obtuvo un valor superior en el tratamiento con basalto versus el tratamiento control. Las micorrizas pueden ser un importante aporte para la solubilización de nutrientes, por múltiples mecanismos, como producción de ácidos orgánicos y sideróforos, mayor exploración radical, sin embargo, en cuanto a disponibilidad de nutrientes no se vio un incremento a nivel foliar en relación a una mayor micorrización, pero si una mayor biomasa en aquellos que presentaban los porcentajes mas altos de micorrización, aún con mínimas diferencias entre ellos.

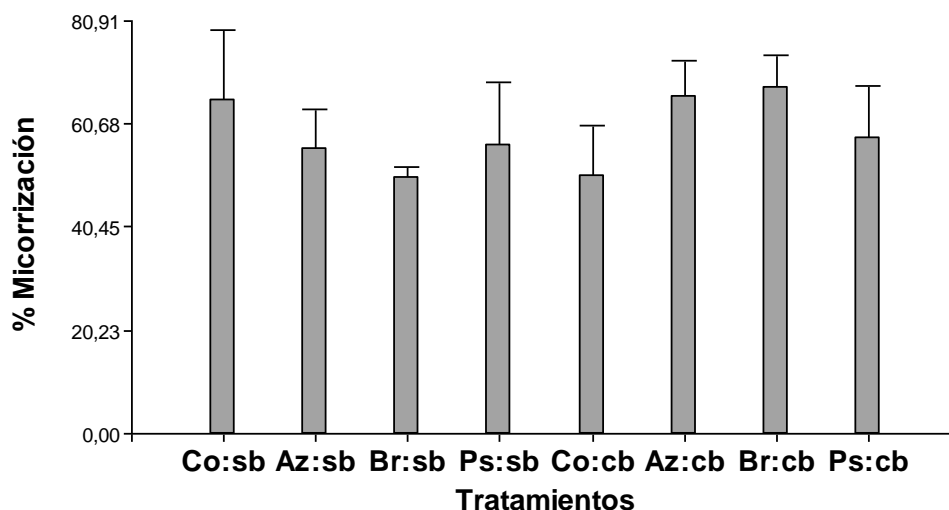


Figura 33. Medias obtenidas para la variable micorrización total en poroto caupí a campo.

El análisis de varianza para la variable actividad biológica global no verificó influencia significativa por efectos principales o de interacción (tabla 69). La actividad biológica global promedio (tabla 70) para el factor inoculante mostró a los microorganismos con valores superiores respecto al control, siguiendo un orden Az>Ps>Br>Co. Las medias obtenidas con el uso de basalto o sin el resultaron similares, levemente superior con el uso del mismo. Souza et al. (2011), trabajando bajo la aplicación de diferentes polvos de basalto con una dosis de 3 t ha⁻¹ no encontraron un incremento en la actividad respiratoria del suelo. Al contrario, Silva et al. (2008) en suelos bajo diferentes dosis de polvo de basalto de la misma granulometría utilizada en el presente trabajo, encontraron valores superiores en la actividad biológica del suelo con el uso de basalto frente al testigo al inicio de incubación; y, al año de evaluación el testigo tomó valores intermedios entre las diferentes dosis de aplicación de basalto; el autor concluyó que el tiempo de incubación de un año no fue suficiente para que sea mineralizado e incrementa la actividad biológica en el suelo, teniendo en cuenta aquí la ausencia de plantas y por lo tanto una rizósfera también ausente.

La inoculación con microorganismos junto con el uso de polvo de basalto muestra una tendencia no significativa en valores superiores respecto a aquellos tratamientos con microorganismos sin uso de polvo de basalto, sin alcanzar diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento control, sin inoculación y sin basalto fue junto al tratamiento Ps*cb el de mayor valor promedio; y el tratamiento sin inoculación con basalto el de menor valor (figura 34).

Dado que los microorganismos tienen un papel fundamental, principalmente en ambientes tropicales, en la solubilización de rocas aplicadas al suelo (Santos, 2002; Nahas, 1999), la medida de la actividad respiratoria del suelo debe ser visto, además de su definición como la oxidación biológica de la materia orgánica a CO₂ por microorganismos aerobios, también como parte de los procesos que liberan nutrientes del polvo de basalto a la solución del suelo. Es importante destacar que la actividad microbiana se sustenta principalmente de fuentes carbonadas y nitrogenadas como fuentes de energía y estructural, si el suelo es pobre en estos nutrientes la actividad microbiana será deficiente; si consideramos que el suelo del ensayo es un suelo de textura arenosa, sin contenido de arcilla, con poca materia orgánica, la sola aplicación de polvo de basalto podría ser ineficiente si no se considera por ejemplo un agregado de abonos orgánicos, traduciéndose en una sinergia que podría mejorar la liberación de nutrientes de los polvos de rocas y por ende la disponibilidad para las plantas, considerando lo obtenido tanto en el ensayo en maceta como a campo en estos cultivos. En este sentido es válido mencionar que los valores de actividad biológica global obtenidos aquí fueron similares a los ya dados en la zona, de acuerdo a lo obtenido por Castán et al. (2016), en su trabajo sobre diferentes compost aplicados al suelo se puede notar como la respiración biológica se duplica a las 4 semanas de haber incorporado diferentes tipos de compost pasando de 50 mg kg⁻¹ a 100 mg kg⁻¹.

Tabla 69

Análisis de la varianza para la actividad biológica global (ABG) en caupí a campo

| | ABG |
|----------------------------|----------------------|
| Basalto | 0,5864 ^{ns} |
| Inoculación | 0,6146 ^{ns} |
| Inoculación*basalto | 0,0663 ^{ns} |
| CV | 13,19 |

ns: no significativo *significativo con $p < 0,05$

Tabla 70

Valores medios para la variable actividad biológica global en caupí a campo

| Factores | Actividad biológica global mgCO ₂ 100gsuelo ⁻¹ |
|-----------------------|---|
| <i>Azotobacter</i> | 6,10 |
| <i>Pseudomonas</i> | 5,77 |
| <i>Bradyrhizobium</i> | 5,07 |
| Control | 4,72 |
| Sin basalto | 5,33 |
| Con basalto | 5,50 |

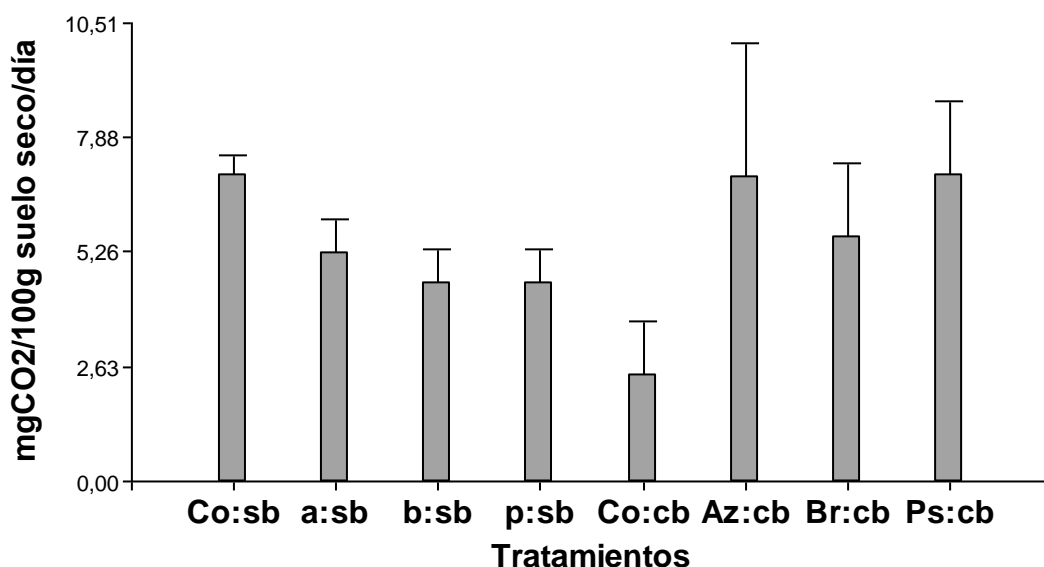


Figura 34. Medias obtenidas para la variable actividad biológica global en suelo del ensayo caupí en campo.

Análisis multivariado

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con el fin de encontrar relaciones entre las variables y asociaciones con los tratamientos en una mirada más conjunta. Se realizó un análisis para los componentes relacionados a producción junto con los microbiológicos, otro para los nutrientes en suelo y otro teniendo en cuenta el contenido foliar.

En el ACP de los parámetros productivos y microbiológicos se obtuvo que las 2 componentes abarcan un 79% de la variabilidad total (Figura 35). Teniendo en cuenta el eje horizontal a la derecha se encuentran todas las variables, peso seco vástago (PSV) y de raíz (PSR), volumen radical (VR), número de hojas (NH), número de nódulos (NOD), actividad biológica global (ABG) y micorrización total (MT). La CP1 está más influenciada por las variables referidas a producción PSV, PSR, VR y número de hoja; para la componente 2 son las variables microbiológicas como respiración y micorrización junto al número de nódulos. Se encuentran correlacionadas las variables PSV, PSR, y VR; y número de hoja con PSV y VR.

Los tratamientos con basalto y el tratamiento sin basalto con *Bradyrhizobium* se ubicaron hacia la derecha. En el cuadrante superior cerca del vector nódulo estuvo asociado cb*b, y cerca de las variables productivas el control con basalto. En el cuadrante derecho inferior *Pseudomonas* y *Azotobacter* con basalto y *Bradyrhizobium* sin basalto. Hacia la izquierda los demás tratamientos sin basalto, indicando menores valores para las variables biométricas y de producción.

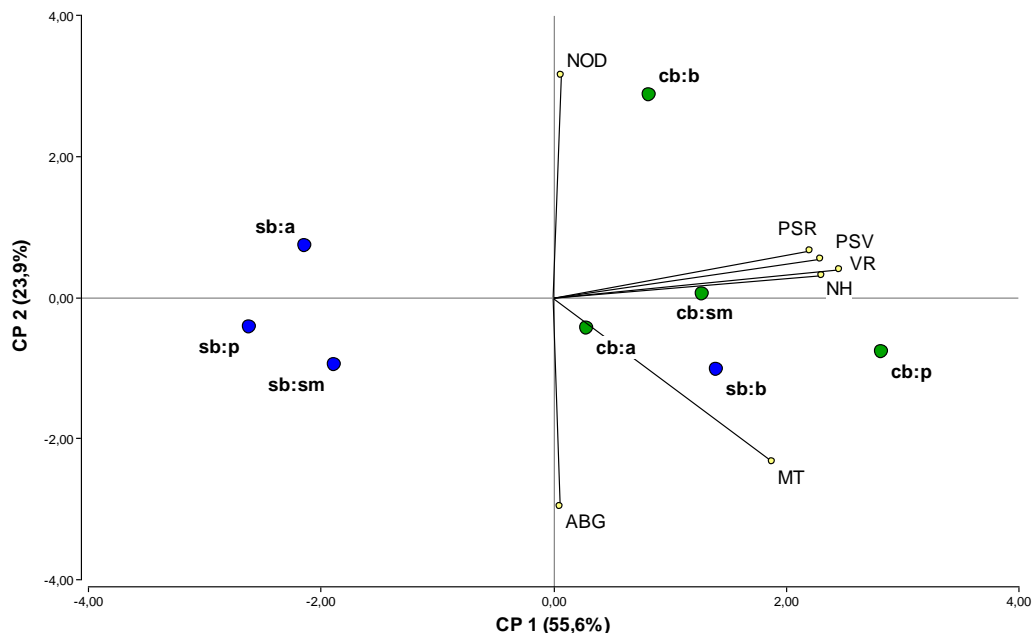


Figura 35. ACP para las variables biométricas de peso seco vástago-PSV y raíz-PSR, Número de hojas-num hoja, Número de nódulos-nod y volumen radical-VR en caupí en maceta junto a la actividad biológica global (respiración del suelo) y la micorrización total-MT.

En el ACP de las variables de contenido foliar del ensayo en maceta se observa que las 2 componentes abarcan un 66% de la variabilidad total, la CP1 reúne el 44% y la CP2 el 22% de la variabilidad total de las observaciones (Figura 36). En la CP1 contribuyen en más medida, según los coeficientes obtenidos del análisis multivariado, las variables Fe, Cu, PSV y K; en la CP2 Mn, Zn, Mg y P. A la derecha se encuentran todos los micronutrientes y las variable de producción PSV, repartidos en el cuadrante superior Cu, Zn y PSV asociados los tratamientos con *Bradyrhizobium* con y sin basalto, y sin inóculo con basalto; y en el inferior los vectores Mn, Fe. A la izquierda se hallan los macronutrientes repartidos en el cuadrante superior N, Ca, Mg y en el cuadrante inferior P y K.

En el ensayo a campo las dos componentes abarcan un 52% de la variabilidad total, la CP1 reúne el 29% y la CP2 el 22% de la variabilidad de todas las observaciones (Figura 37). En la CP1 contribuyen en más medida, según los coeficientes obtenidos del análisis multivariado, las variables Zn, Mg, P y Mn; en la CP2 Cu, K, P y Mn. A la derecha en el cuadrante superior se encuentran el P y Mg con sb*b presentando valores mas grandes en esos nutrientes y menores en Cu; en el cuadrante inferior derecho se halla el Zn, Fe, Ca y PSV y los tratamientos con basalto combinado a *Bradyrhizobium* y *Azotobacter* y sin basalto con *Azotobacter*, con mayores valores en estas variables y menores concentraciones en N, Mn y K.

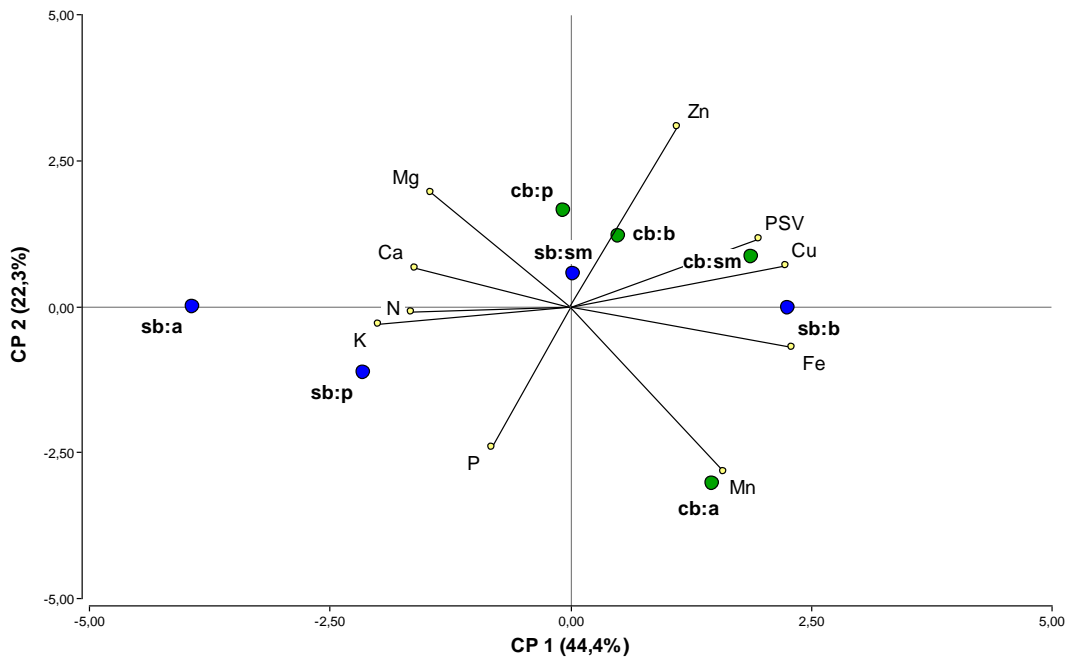


Figura 36. Biplot resultante del ACP de caupi en maceta para nutrientes foliar junto al peso seco vástago (PSV) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin micrororganismo (sm).

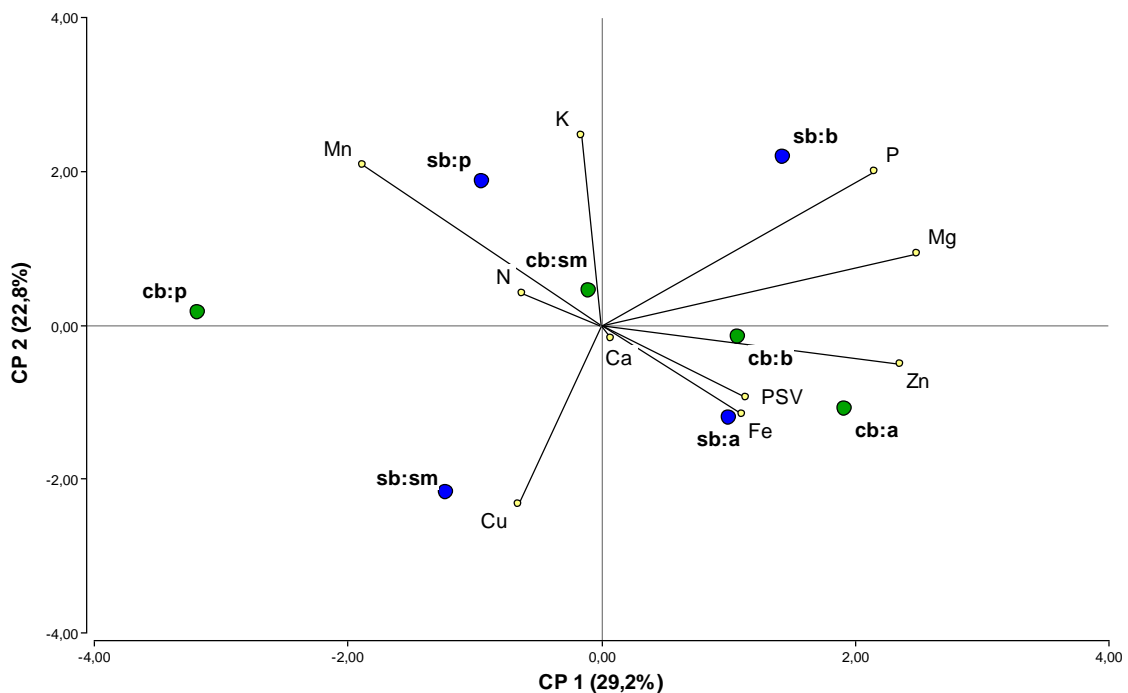


Figura 37. Biplot resultante del ACP de caupi a campo para nutrientes foliar junto al peso seco vástago (PSV) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin micrororganismo (sm).

En las variables nutricionales del suelo las 2 componentes abarcan un 60% de la variabilidad para caupi en maceta (figura 38). La CP1 reúne un 34% y la CP2 un 28% de la variabilidad total de las observaciones. Según los coeficientes que se asocian a cada variable en términos absolutos, las variables que mayor contribución realizan a la

CP1 son N, P, Ca, Zn y Cu; y a la CP2 las variables Mg, PSV, PSR y P. A la derecha en el cuadrante superior se encuentran las variables PSV, PSR, contenido de Fe, N, y Ca, y asociados los tratamientos con basalto sin inóculo y *Azotobacter*; en el cuadrante inferior están las variables concentración de Zn, P y Cu, donde el tratamiento con basalto asociado a *Bradyrhizobium* indica un mayor contenido de estos nutrientes, y menor contenido en Mg principalmente. En el cuadrante inferior izquierdo están los demás tratamientos sin basalto con bajos valores en PSV, PSR, Fe, N y Ca. PSV y PSR están correlacionados positivamente, y el P con Zn y Cu.

En caupi a campo las dos componentes abarcan alrededor del 53% de la variabilidad total (Figura 39). La CP1 reúne un 32% y la CP2 un 21% de la variabilidad total de las observaciones. Según los coeficientes que se asocian a cada variable en términos absolutos, las variables que mayor contribución realizan a la CP1 son Zn, Mg, Mn y P; y a la CP2 las variables PSV, Cu, Fe y N. En el cuadrante inferior derecho están las variables concentración de Zn y P, donde se encuentran los tratamientos sin basalto asociado a *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas* y sin inóculo con un mayor contenido de estos nutrientes, y menor contenido en Mg, Ca y Cu. En el cuadrante superior izquierdo se encuentran los nutrientes Mg, Ca y Cu con los tratamientos con basalto combinado a *Pseudomonas* y *Azotobacter* indicando menor contenido en Zn y P.

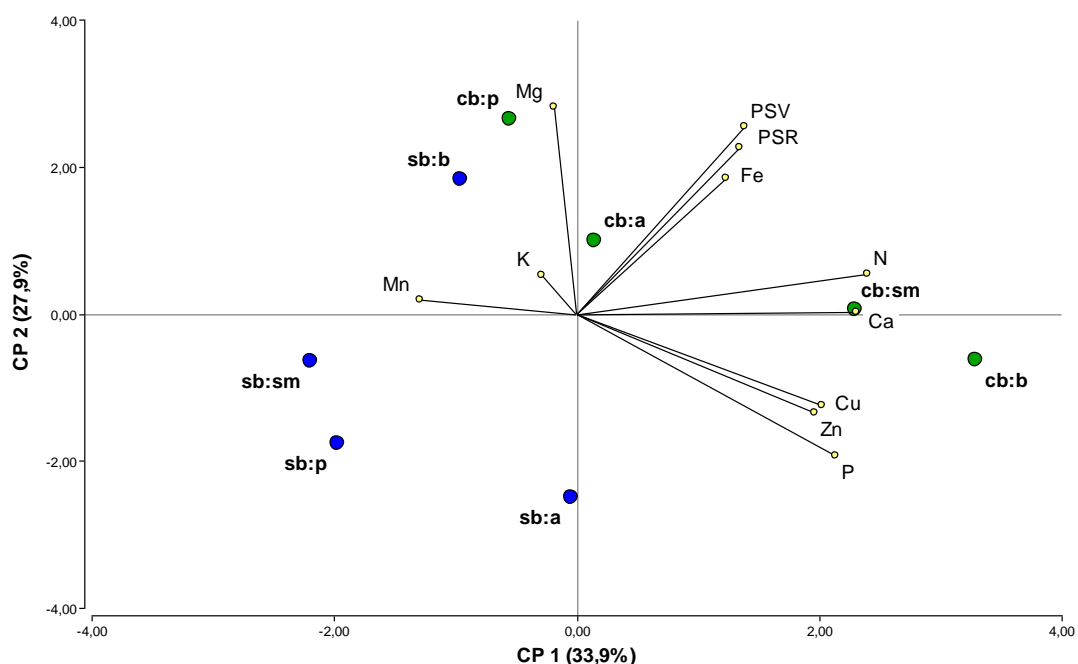


Figura 38. Biplot resultante del ACP de caupi en maceta para nutrientes en suelo junto al peso seco vástago (PSV) y peso seco radical (PSR) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin micorroganismo (sm).

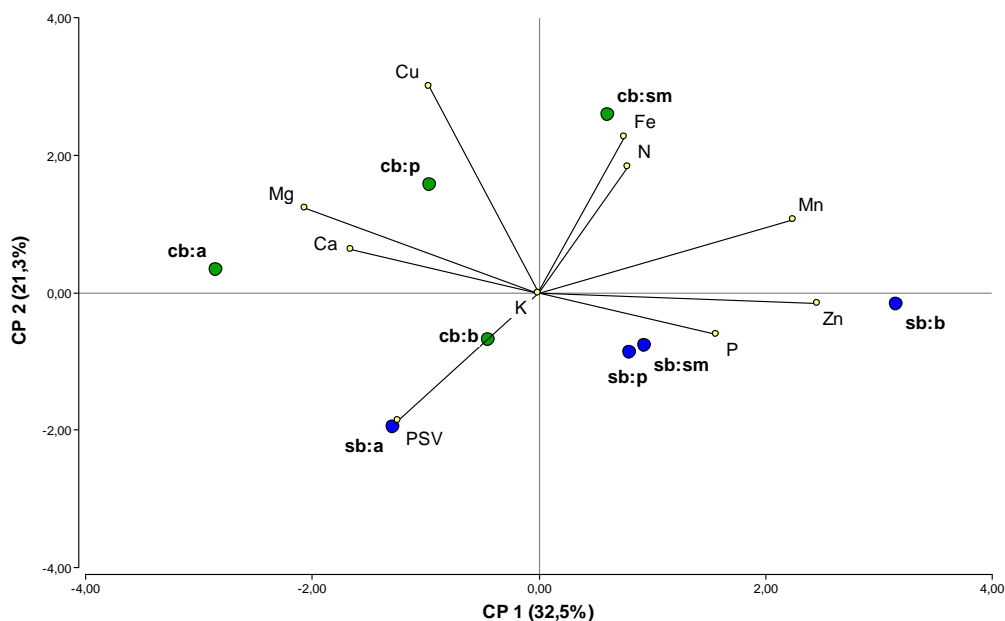


Figura 39. Biplot resultante del ACP de caupi en campo para nutrientes en suelo junto al peso seco vástago (PSV) con los tratamientos con basalto (cb) y sin basalto (sb) combinados a *Azotobacter* (Az), *Pseudomonas* (Ps), *Bradyrhizobium* (Br) y sin micorroganismo (sm).

Solo en el ensayo en maceta los vectores de variables productivas junto a las microbiológicas lograron reunir con las dos componentes casi el 80% de la variabilidad total, y de los nutrientes, solo el foliar estuvo cercano al 70%. Tanto en maceta como en campo las contribuciones de las dos componentes para las variables de concentración en nutrientes en suelo fueron bajas en su mayoría; siendo a campo alrededor del 50%, tanto a nivel foliar como suelo. En el ACP de nutrición foliar, se puede observar en campo como en maceta, una asociación del tratamiento con basalto combinado a *Bradyrhizobium* para el elemento Zn, sin embargo no hubieron mayores aportes al contenido foliar con los tratamientos realizados, distribuyéndose cada uno de ellos sin tendencias marcadas en el gráfico, posiblemente el origen del basalto haya aportado a esa distribución, según Madsen et al. (2018) las canteras origen de estos basaltos presentaron alta heterogeneidad con variaciones composicionales en los contenidos de CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO y MnO principalmente.

Los tratameintos con basalto, principalmente los asociados a *Bradyrhizobium* y *Azotobacter* estuvieron en la mayoría de las gráficas cercanas al vector PSV, y en la tabla 58 se muestra la mayor producción obtenida a campo en esas combinaciones. Silva et al. (2022) realizaron dos experimentos en condiciones de campo, sembrando en sucesión avena negra y poroto común bajo dosis de mezcla de rocas entre 0 y 10 tn ha⁻¹, logrando un incremento en la producción de poroto con 7 tn ha⁻¹; y con el análisis multivariante obtuvieron un patrón general de mejora en la fertilidad del suelo, aunque significativamente solo para P, Cu y Zn; sugirieron que el remineralizador utilizado a largo plazo, o bajo el efecto residual de sucesivas aplicaciones puede generar incrementos más significativos en la disponibilidad de nutrientes.

CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones generales

En este trabajo se logró obtener datos sobre el uso de polvo de basalto en la producción, siendo una práctica que no está muy difundida en Argentina, con respuestas diferentes para ambos cultivos en cuanto a producción y similar en cuanto a nutrientes.

Los microorganismos inoculados no tuvieron un comportamiento diferencial significativo combinados al basalto, posiblemente dado por las características del suelo en cuanto al contenido de materia orgánica bajo y por lo tanto bajos niveles de carbono, nitrógeno y fósforo, esenciales para una actividad adecuada en ellos.

Las variables biométricas productivas del cultivo de avena en maceta y campo tuvieron comportamiento diferente, la acumulación de materia seca de avena negra en maceta no se vio favorecida por el uso de basalto como si ocurrió a nivel de campo. En maceta un alto contenido en hierro y cobre en suelo combinado a una baja concentración de nitrógeno y fósforo, mostraron baja acumulación de biomasa, considerando también la asociación a un alto contenido en Mn foliar. A campo, el contenido foliar de hierro y cobre significativamente mayor con el uso de basalto y Fe en suelo, mostraron un potencial aporte de estos elementos con este agromineral; y considerando un mayor contenido de fósforo y nitrógeno inicial comparado al ensayo en maceta permitió un mejor balance en esos nutrientes, y la acumulación de biomasa no se vio perjudicada como se dio en el cultivo de avena en maceta.

En el cultivo de caupí en macetas las variables biométricas se vieron favorecidas por el uso de basalto y también por la combinación de microorganismos y basalto. A nivel de nutrientes foliar se destacó el cobre dentro de los tratamientos con basalto, como sucedió en avena; dado que el polvo de basalto presenta una elevada concentración en este nutriente. A campo la producción más alta se logró con la combinación de *Bradyrhizobium* con basalto, microorganismo con el cual el caupí establece una simbiosis mutualista; en cuanto al contenido en nutrientes se destacó nuevamente el cobre en suelo con el uso de basalto, no hubo un microorganismo que se destaque como biosolubilizador, osiblemente se dio un efecto de la rizósfera del caupí.

En cuanto a las variables microbiológicas estimadas, el uso de basalto no afectó significativamente su desarrollo, es sugerible poder combinar con prácticas que mejoren la composición en macronutrientes principalmente nitrógeno, fósforo y aporte de carbono, en estos suelos de textura arenosa del noroeste de Corrientes.

Dados los resultados, es posible considerar que los agroinsumos utilizados en este trabajo, en las situaciones y suelos descriptos, no mostraron efectos negativos en la mayoría de las variables medidas en ambos cultivos, exceptuando avena en maceta. Si bien es necesario considerar un mejor balance en macronutrientes, ya representan un antecedente para posteriores estudios en la región.

Se recomienda realizar un número mayor de ensayos para validar su utilización como remineralizante, teniendo en cuenta diferentes dosis, tiempos de incorporación al suelo, otras clases de suelos, cultivos de ciclos más largo y donde el aporte en micronutrientes sea un determinante en ellos; y el uso conjunto de otras herramientas como abonos orgánicos para mejorar la actividad biológica del suelo.

Y dado los diferentes mecanismos por los cuales los microorganismos realizan una acción promotora, se podría evaluar la producción de ácidos y otros efectos que contribuyan a una mayor solubilización de nutrientes por parte de los inoculantes microbianos, seleccionando aquellos con las mejores características.

BIBLIOGRAFÍA

- Albán, M. (2012). Manual de cultivo de frijol caupí. Primera edición, Piura, Perú, 27p.
- Alkurtany, A. E. S.; W. M. Mahdi & S. A. M. Ali. (2018). The efficiency of prepared biofertilizer from local isolate of *Bradyrhizobium sp* on growth and yield of mungbean plant. Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 49(5): 722- 730,
- Almeida, E.; F. Pereira da Silva & R. Ralisch. (2006). Polvo de roca para revitalizar los suelos en el sur de Brasil. Revista Leisa 22 (4): 12-13.
- Alvarenga, R.C.; W.A. Cabezas; J.C. Cruz & D.P. Santana. (2001). Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. Informe Agropecuario 22(208): 25- 36.
- Alves, Z. (2021). Efecto residual de las dosis de polvo de basalto en maíz de segunda. Tesis de Maestría. Universidad Federal de Mato Grosso del sur. 33pp.
- Alves, L. (2006). Solubilización de nutrientes contenidos en rocas por hongos ectomicorrícicos. Tesis de Maestría. Universidad General de Santa Catarina. Florianópolis. 99p.
- Andrade, R. S.; L.F. Stone & P. M. Silveira. (2009a). Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 13(4): 411-418. [https://dx.doi.org/10,1590/S1415-43662009000400007](https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400007)
- Andrade, M.M. M.; N.P. Stamford; C.A. Sousa; A.C. Silveira; A.D.S. Freitas & C.E.R. Santos. (2009b). Fertilização mineral e biofertilizante de rochas com *Bradyrhizobium* e fungos micorrízicos arbusculares em caupí. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 4(3): 289-292.
- Apáez Barrios P.; J.A. Escalante Estrada; M. González; V. Gutierrez & P. Vallejo. (2009). Frijol chino (*Vigna unguiculata* walp.) su cultivo, importancia económica y medicinal. Alternativa 19: 21-26.
- Assainar S.K.; L.K. Abbott; B.S. Mickan; P. Storer; A. Whiteley; Siddique, K. & Z. Solaiman. (2020). Polymer-coated rock mineral fertilizer has potential to substitute soluble fertilizer for increasing growth, nutrient uptake, and yield of wheat. Biology Fertility of Soils 56: 381–394 <https://doi.org/10,1007/s00374-019-01428-w>
- Assainar, S. K.; L. K.Abbott; B.S. Mickan; A.S. Whiteley; K. Siddique & Z. M. Solaiman. (2018). Response of Wheat to a Multiple Species Microbial Inoculant Compared to Fertilizer Application. Frontiers in plant science, 9: 1601. <https://doi.org/10,3389/fpls.2018.01601>
- Avanza M.V. & M.C. Añón. (2008). Aislamiento y caracterización fisicoquímicas y funcional de proteínas de caupí (*Vigna unguiculata*). Comunicaciones científicas y tecnológicas. UNNE.
- Azinwi T. T.; G.M. Ndzana; G.T. Nji; D; L. Wirba Ngonjang; S.T. Agbor-Ambang; A. Ambe Singwa; E. Temgoua; D. Bitom. (2022). Testing soil fertility and beetroot (*Beta vulgaris* L.) production with mixtures of basalt dust, poultry manure and NPK 20-10-10 in Dschang (Cameroon Western Highlands). Journal of Agricultural and Rural Research, 6(2): 53-66.
- Badawi, F.; A. Biomy & A. Desoky. (2011). Peanut plant growth and yield influenced by co-inoculation with *Bradyrhizobium* and some rhizo-microorganisms under Sandy loam soil conditions. Annals of agricultural sciences, 56(1): 17-25.

- Barbazán, M. (1998). Análisis de plantas y síntomas visuales de deficiencia de nutrientes. Informe de asistente de fertilidad de suelos. Facultad de Agronomía, Universidad de la República-Montevideo Uruguay. 27pp.
- Basak, B. & D. Biswas. (2009). Influencia de microorganismo solubilizador de potasio (*Bacillus mucilaginosus*) y residuos de mica en la dinámica de absorción de potasio por pasto de Sudán (*Sorghum vulgare* Pers.) cultivado bajo dos Alfisoles. Plant Soil 317: 235–255. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9805-z>.
- Bamberg, A.L.; C.A. Silveira; R. Martinazzo; M. Bergmann; J. Toniolo; M. grecco y M. Potes. (2013). Desempenho agronomico de fontes mineraiis e orgânicas de nutrientes para as culturas de milho e trigo. Anais do II Congresso brasileiro de rochagem, Minas Gerais, 24-31.
- Beerling, D.J.; J.R. Leake & S.P. Long, S.P. et al. (2018). Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. Nature Plants 4: 138–147 <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0108-y>
- Behl, R.; N. Narula, M. Vasuveda; A. Sato; T. Shinan & M. Osaki, (2006). Mini Review-Harnessing wheat genotype x Azotobacter strain interactions for sustainable wheat production in semi arid tropics. Tropics 15 (1).
- Beneduzzi, E.B. (2011). Rochagem agregacao das rochas como laternativa sustentavel para a fertilizacao. Tesis de grado. Univ Federal de Rio Grande do Sul. Porto alegre.
- Beerling, D. J., Kantzas, E. P., Lomas, M. R., Wade, P., Eufrazio, R. M., Renforth, P., Banwart, S. A. (2020). Potential for large-scale CO2 removal via enhanced rock weathering with croplands. Nature, 583(7815), 242–248. doi:10.1038/s41586-020-2448-9
- Bolland, M. D. A. & M.J. Baker. (2000). Powdered granite is not an effective fertilizer for clover and wheat in sandy soils from Western Australia. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 56(1): 59-68.
- Borges Filho, I. T. (2019). Po de rocha enriquecido e organismos eficientes na produção da materia seca da *Avena strigosa*. Tesis de Maestría. Universidad Estadual de Maringá, Brasil. <http://repositorio.uem.br:8080/jspui/handle/1/5643>
- Borrajo, C. I.; P. Barbera; D. Bendersky; R. Pizzio; M. Ramírez; C. Maidana; P. Zapata; R. Ramírez & J.R. Fernández. (2011). Verdeos de invierno en Corrientes. INTA Mercedes serie técnica N°49.
- Brennecke K.; L.M.A. Bertipaglia; A. Antoniazzi & E.F. Souza. (2016). Inoculação da bactéria *Pseudomonas fluorescens* no índice de crescimento da *Brachiaria decumbens* spp. Rev. Acad. Ciênc. Anim. 14:217-224.
- Bruns, H.A. & L.I. Croy. (1985). Root volume and root dry weight measuring system for wheat cultivars. Cereal Research Communications, 13, (2/3): 177-183.
- Calandrelli, A. & D.M. Hernández. (2018). Evaluación de solubilización de fósforo no disponible en el suelo por acción del lupino blanco (*Lupinus albus*) en condiciones de suficiencia del nutriente. (Tesis de grado). Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Camargo, K.; J. Vilela de Resende; L. Pinheiro Camargo; A. Figueredo & D. Zanin. (2012). Produtividade do morangueiro em função da adubação orgânica e com pó de basalto no plantio. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, 33 (1): 2985-2994.

- Campos, F. L.; A.C. Almeida Lopes; V.Q. Ribeiro & R. Querino. (2000). Ciclo fenológico em caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp): uma proposta de escala de desenvolvimento. Rev. Cient. Rural, 5 (12): 110-116.
- Campos Ferreira, E.R.N.; J.A. Almeida & A.L. Mafra. (2009). Powder basalt, development and nutrition of common bean (*Phaseolus vulgaris*) and chemical properties of a sandy loam Humic Cambisol. Revista de Ciências Agroveterinárias. 8(2): 111-121.
- Castán, E.; P. Satti; M. González-Polo; M. C. Iglesias & M. J. Mazzarino. (2016). Managing the value of composts as organic amendments and fertilizers in sandy soils, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 224, 2016, Pages 29-38, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.03.016>.
- Carvalho, A.M.X. de; D. Deliberali; M.D. Costa & I. Cardoso. (2013). Plantas, micorrizas e microbiota do solo na disponibilização de nutrientes de pós de rocha. II Congresso brasileiro de rochagem– Poços de Caldas, Minas Gerais.
- Carvalho, V.G.; A. Vilela; E.J. Padua; A.E. Furtini Neto; S.G. Moreira & J.P. Sales Bueno. (2013b). Efecto Residual de agrominerales en la productividad de soja. Congreso brasileiro de ciencia del suelo.
- Carvalho, A.M. X. de. (2012). Rochagem y sus interacciones con el ambiente suelo: contribuciones para su aplicación en agroecosistemas con manejo agroecológico. Tesis doctoral). Universidad Federal Viscosa. Mina Gerais. Brasil.
- Carvalho, A.; D. Deliberali; R. Avila, R.; F. Ferrari & I. Cardoso. (2011). Características químicas do solo e crescimento de plantas de feijão sob efeito da aplicação de pó de gnaiss com adubação orgânica. Cadernos de Agroecologia – ISSN 2236-7934 – 6 (2).
- Carvalho, A. M. X.; I.M. Cardoso; S.H.M. Theodoro & M.E.P. Souza. (2018). Rochagem: o que se sabe sobre essa técnica? In: Cardoso, I. M.; Fávero, C. (Orgs.). Solos e agroecologia. 1.ed. Brasília:Embrapa, 4:101-128.
- Cavalcante, V.S.; V.R. Santos; A.L. Santos Neto; M.A.L. Santos; C.G. Santos & L.C. Costa. (2012). Biomassa e extração de nutrientes por plantas de cobertura. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 16(5): 521-528. <https://dx.doi.org/10,1590/S1415-43662012000500008>
- Ciccioli, S. E.; B. Liliana; L.B. Garrido & I. Schalamuk. (2013). Adición de finos de basalto en composiciones para cerámica roja. XIII congreso internacional en ciencia y tecnología de metalurgia y materiales. Puerto Iguazú, Argentina.
- Correa, M.A.; M.R. Cossoli; A.M. Romero; C. Barrionuevo & M.C. Iglesias. (2017). Utilización de bioinsumos, su relación con la micorrización espontánea en el cultivo de avena negra (*Avena strigosa*). Revista Agrotecnia. Edición especial (25).
- Crusciol, C. A. & P. R. Soratto. (2013). Eficiência de rocha fonolito moída como fonte de potássio para as culturas do arroz, feijão, milho e soja. Actas de II Congresso brasileiro de rochagem.
- Curl, E.A. & B. Truelove. (2012). The rizosphere. Springer Science y Business Media. 288pp.
- Dakora, F.D. & D.A. Phillips (2002). Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. Plant Soil 245 (1): 35–47 <https://doi.org/10,1023/A:1020809400075>.
- Dial, H.L. (2014). Plant guide for black oat (*Avena strigosa* Schreb.) USDA-Natural Resources Conservation Service, Tucson Plant Materials Center, Tucson, AZ, 85705.

Dotaniya, M.L. & V.D. Meena. (2015). Rhizosphere effect on nutrient availability in soil and its uptake by plants: a review. Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. B Biol. Sci. 85 (1): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0297-0>,

Winnie, E.O.O. (2016). Influencia del uso de polvo de roca fosfatada y basáltica en la ocurrencia de micorrizas arbusculares en un suelo de Cerrado. (Tesis de grado). Universidad de Brasilia.

Enciso Garay, R.C.; O.D. Alvarez; G.A. Bogado & V.R. Santacruz Oviedo. (2016). Rock dust dose and its effects on commercial performance of tomato. Revista Verde de Agroecología e Desenvolvimento Sustentável. 11(1): 37-42.

Erhart, J. (2009). Efeito do pó de basalto nas propriedades químicas do solo e nutrição da videira (Cabernet sauvignon) (tesis de maestría). Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 71p.

Escosteguy, P. A.V. & E. Klamt. (1998). Basalto molido como fuente de nutrientes. Rev. Bras. Ciênc. Solo, 22(1): 11-20, ISSN 1806-9657.

FAO. (2015). Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos sanos. Recuperado en <http://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/>

Faria, C. M. B.; J. M. M. Soares & P. C. S. Leão. (2004). Abonos verdes con leguminosas en vid sobre el submedio de San Francisco. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 28: 641-648.

Farias, L. do N. (2012). Poroto guandú fertilizado con fosfato natural y su uso como abono verde para el cultivo de maíz en un latosol de Cerrado. (Tesis de posgrado). Instituto de Ciencias agrarias y tecnológicas, Universidad federal de Mato Grosso.

Feng Ma, J.; J. Furukawa. (2003). Avances recientes en la investigación de la desintoxicación de Al externo en plantas superiores: un minireview. Journal of Inorganic Biochemistry, 97(1): 46-51. ISSN 0162-0134.

Ferreira, E. R. N. C.; J.A. Almeida & A.L. Mafra. (2009). Pó de basalto, desenvolvimento e nutrição do feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) e propriedades químicas de um Cambissolo Húmico. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, 8, (2): 111-121.

Fontaneli, R. S.; H. P. Santos dos; R.S. Fontaneli; J.T. Oliveira; R.L. Lehmen; G. Dreon. (2012). Winter forage grasses. In: Fontaneli, R. S.; Santos, H. P dos; Fontaneli, R. S (Eds), Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira, EMBRAPA, Brasilia.

Franchini, J. C.; M. A. Pavan & M. Miyazawa. (2004). Redistribución de fósforo a través de las raíces de cultivos de cobertura. Brazilian Archives of Biology and Technology, 47(3): 381-386. <https://dx.doi.org/10.1590/S1516-89132004000300007>

Froni, L. (2011). Microbiología básica, ambiental y agrícola. 1a ed. Buenos Aires. 768 pp.

Froni, L. (2006). Microbiología básica, ambiental y agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad de la República, Uruguay. 463 pp.

Fyfe, W.; O. Leonardos & S. Theodoro. (2006). Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. Anais da Academia Brasileira de Ciências. 78(4): 715-720,

Gillman, G.P. (1980). The effect of crushed basalt scoria on the cation exchange properties of a highly weathered soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 465-468.

- Gonzalez Aguiar, D.; U.Y. Álvarez Hernández & R. Lima Orozco. (2018). Acumulación de biomasa fresca y materia seca por planta en el cultivo intercalado caupí – sorgo. Centro agronómico 45 (2), Santa Clara.
- Grecco, M.F.; A.L. Bamberg; C.A. Silveira; R. Martinazzo; M. Bergmann; L.F. Spinelli Pinto. (2015). Efeito Residual de Agrominerais Sobre a Concentração e Acumulados de Nutrientes K, Ca e Mg na Parte Aérea de Plantas de Aveia Preta (*Avena strigosa*). XXXV Congreso brasileiro de ciencia del suelo. Natal, Brasil.
- Hanisch, A.L.; J.A. da Fonseca; A. A. Balbinot, & E. Spagnollo. (2013). Efeito de pó de basalto no solo e em culturas anuais durante quatro safras, em sistema de plantio direto. Revista Brasileira De Agropecuária Sustentável, 3(2): 100-107. <https://doi.org/10,21206/rbas>.
- Harley, A. & R. Gilkes. (2000). Factores que influyen en la liberación de los elementos nutrientes de las plantas a partir de polvos de roca de silicato: una visión geoquímica. 56 (1): 11-36.
- Hensel, J. (1894). Bread from stones: a New and Rational Systems of Land Fertilization and Physical Regeneration. Tri-State Press, Long Creek, South Carolina, United States of America. 111P.
- Hinsinger, P.; O. Fernandes Barros; M. Benedetti; Y. Noack & G. Callot. (2001). Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence.
- Husson, O.; H. Charpentier; R. Michellon; C. Razanamparany; N. Moussa; F. Enjalric; K. Naudin & L. Seguy. (2012). Avoine *Avena sativa* et *Avena strigosa* Manuel pratique du semis direct à Madagascar. 3 (3). <http://www.supagro.fr/ress-pepites/ingenierieprobleme/res/avoine.pdf>
- Infoleg. (2009). Plan minero Nacional. Ubicado en: http://www.infoleg.gov.ar/basehome/actos_gobierno/actosdegobierno11-5-2009-1.htm.
- InfoStat. (2017). Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Inversiones Misiones. (2017). Minas y geologías. Recuperado de http://www.inversiones.misiones.gob.ar/images/recursos/informe_minas_geologia.pdf.
- Johnson, D.; J.R., Leake; N. Ostle; P. Ineson & D.J. Read. (2002). In situ ¹³C₂ pulse-labelling of upland grassland demonstrates a rapid pathway of carbon flux from arbuscular mycorrhizal mycelia to the soil. New Phytologist, 153: 327-334. doi:10,1046/j.0028-646X.2001,00316.x
- Kalra, Y. (1998). Handbook of reference methods for plant análisis. Taylor & Francis group. 320pp.
- Kaźmierczak, U.; J. Blachowski, & J. Górnica-Zimroz. (2019). Multi-Criteria Analysis of Potential Applications of Waste from Rock Minerals Mining. Appl. Sci. 9, 441.
- Kelland, M.E.; W. Peter; A.I. Lewis; I.I. Taylor; M. Binoy Sarkar; R.M.G. Andrews; T.E. Lomas; A. Cotton; J.K. Simon; James R.H.; Pearce C.R.; Hartley, S. E.; Hodson M.E.; Fuga J.R.; Banwart S. & Beerling D.J. (2020). Increased yield and CO₂ sequestration potential with the C₄ cereal *Sorghum bicolor* cultivated in basaltic rock dust-amended agricultural soil. Glob Change Biol. 26:3658–3676.
- Keller, W.D. (1948). Native rocks and minerals as fertilizers. Sci. Mon. 66: 122-130,
- Kongpun, A.; B. Dell & B. Rerkasem. (2011). Alleviating acid soil stress in cowpea with a local population of arbuscular mycorrhizal fungi. African Journal of Biotechnology, 10(65): 14410-14418.

- Kosera, C.; D. Spadotto; L. Schlucubier; P. Bortolini; A. Marques & C. Oliveira. (2009). Producción de poroto Adzuki bajo diferentes dosis de polvo de basalto. *Revista brasilera de agroecología*, 4 (2).
- Krynski, M.A.; A. M. Romero & M.C. Iglesias. (2017). Utilización de agroinsumos en el cultivo de albahaca (*Ocimum basilicum* L.). *Revista Agrotecnia. Edición especial* (25).
- Labib, B; Ghabour, Tharwat; Wahba, Menna & Rahim, I. (2011). Application of K-bearing rock for fertilization of Cowpea, (*Vigna unguiculata*). *International Research Journal of Geology and Mining*. 1:027-033.
- Laurent, R. & M. Eric. (1994). Factores de acidificación de la rizosfera de las plantas micorrícicas: medición de pCO₂ en la rizosfera. *Acta Botanica Gall*, 141:533–539.
- Lenin, G. & M. Jayanhi. (2012). Indole Acetic Acid, Gibberellic Acid and Siderophore Production by PGPR Isolates from Rhizospheric Soils of *Catharanthus roseus*. *International Journal of Pharmaceutical & Biological Archives*, 3(4):933-938.
- Lopes Motizuki, O.; E. Carrillho & M. Lopes Assad. (2014). Effect of rock powder and vinasse on two types of soils. *R. Bras. Ci. Solo*, 38:1547-1557.
- Lynch, J. & F. De Leij. (2012). *Rhizosphere*. John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/9780470015902.a0000403.pub2.
- Mackowiak, C. L.; R. O. Myer; A. R. Blount; J. L. Foster & R. D. Barnett. (2011). Yield and mineral concentrations of southeastern united states oat cultivars used for forage. *Journal of Plant Nutrition*, 34(12): 1828-1842. DOI: 10.1080/01904167.2011.600410
- Madsen, L.; S.A. Marfil & P. Maiza. (2018). Geoquímica y petrografía de los basaltos de la Formación Serra Geral de las provincias de Corrientes y Entre Ríos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 75(4).
- Meheruna, A. & T. Akagi. (2006). Role of fine roots in the plant-induced weathering of andesite for several plant species. *United Graduate School of Agricultural Science, Tokyo, Geochemical Journal*, 40, 57-67
- Meheruna, A. & T. Akagi. (2005) Effect of Fine Root Contact on Plant-Induced Weathering of Basalt, *Soil Science & Plant Nutrition*, 51:6, 861-871, DOI: 10.1111/j.1747-0765.2005.tb00121.x
- Melo, G.W.; J.A. Morais Neto; D.R. Borba; H. Iwamoto; K.P. Ozelame; J.L. Vieira; J. Zalamena & A. Nascimento Junior. (2018). Black oats (*Avena strigosa* Schreb) solubilize rock phosphate and provide phosphorus to the successive crop, grapevine (*Vitis labrusca* L. "Red Niagara"). *Acta Hortic.* 1217. ISHS. DOI 10,17660/ActaHortic.2018.1217.11
- Melo, V.F.; S. Uchôa; F. Oliveira Dias & G. Barbosa. (2012). Doses de basalto moído nas propriedades química de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. *Acta Amazônica*, 42(4): 471 – 476.
- Mimmo, T.; Y. Pii; F. Valentinuzzi; S. Astolfi; N. Lehto; B. Robinson; G. Brunetto; R. Terzano & S. Cesco. (2018). Disponibilidad de nutrientes en la rizosfera: una revisión. *Acta Horticultura* 1217: 13-28.
- MAGyP. Ministerio de agricultura, ganadería y pesca Argentina. (2017). Bioinsumos agropecuarios y biomateriales. Recuperado en https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/observatorio_bioeconomia/indicadores/04/index.php

- Montaño Carrasco, M.; A. Hernandez; A. Martínez-Rosales; D. Ojeda-Barrios; A. Núñez-Barrios & V. Guerrero-Prieto. (2017). Production and nutritional content in forage oats fertilized with chemical and organic sources. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 40: 317-324.
- Mweetwa, A.M.; E.A. Eckhardt; D.E. Stott; G. Chilombo; A.P. Armstrong; D. Schulze & C.H. Nakatsu. (2014). Isolation and characterization of Chilembwe and Sinda rock phosphate solubilizing soil microorganisms. *African Journal of Microbiology research*. Vol.8(34): 3191-3203.
- Nahas, E. (1999). Solubilização microbiana de fosfatos e de outros elementos. In: SIQUEIRA, J.O.; et al. (Eds.). *Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 467-486.
- Nakagawa, J. & C.A. Rosolem. (2005). Teores de nutrientes na folha bandeira e nos grãos de aveia-preta Campinas, 64, (3): 441-445.
- Nunes, J.; R. Kautzmann & C. Oliveira. (2014). Evaluation of the natural fertilizing potential of basalt dust wastes from the mining district of Nova Prata (Brazil). *Journal of Cleaner Production* 84.
- Nwoke, O. C.; J. Diels; R. Abaidoo; G. Nziguheba & R. Merckx. (2008). Ácidos orgánicos característicos en la rizosfera y raíces de la soja (*Glycine max*) y el caupí (*Vigna unguiculata*) en relación con la absorción de fósforo en suelos pobres de sabanas. *African Journal of Biotechnology*. 7(20): 3620-3627.
- Oberti, A. & N. Feld. (2015). Evaluación de bioinsumos en la producción orgánica de lechuga. *Horticultura Argentina* 34 (85) ISSN on line 1851-9342.
- Padua, E. (2012). Rochagem como adubacao complementar para culturas oleaginosas. (Tesis de Maestría). Univeristad Federal de Lavras, Brasil.
- Pantigoso, H.; J. Yuan; Y. He; Q. Guo; C. Vollmer & J. Vivanco. (2020). Role of root exudates on assimilation of phosphorus in young and old *Arabidopsis thaliana* plants. *PLoS ONE* 15(6): e0234216. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234216>
- Paredes, F.A.; H.R. Bogado; S.L. Esparza; M.A. Talabera & A.U. McCargo. (2012). Descripción de poblaciones de caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.) de usos múltiples en la agricultura familiar de Corrientes. En: XXIII Reunión de Comunicaciones Científicas, Técnicas y de Extensión de la FCA-UNNE. Corrientes.
- Pereyra, M. & L. Gándara. (2013). Alternativas para superar el invierno en sistemas ganaderos de noroeste de Corrientes: *Avena strigosa*. Sitio argentino de producción animal www.produccion-animal.com.ar (visitado en mayo 2015).
- Peters, M.; L.H. Franco; A. Schmidt & B. Hincapie. (2011). Especies forrajeras multipropósito: opciones para productores del trópico Americano. *Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)*; 2, 212P.
- Phillips, J. M. & D. S. Hayman. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 158-161.
- Pii, Y.; A. Penn; R. Terzano; C. Crecchio; T. Mimmo & S. Cesco. (2015). Plant-microorganism-soil interactions influence the Fe availability in the rhizosphere of cucumber plants. *Plant Physiology and Biochemistry* 87: 45-52.

Plewka, R. G.; J.R. Zamulak; J. Venancio; A. Marques & C. Olivera. (2009). Validación del uso de polvo de basalto en la producción de poroto. *Revista brasileira de agroecología*. 4 (2).

Prause, J. (2006). *Análisis de Suelos. Técnicas de Muestreos de Suelos, Aguas y Plantas. Bases Prácticas para la Fertilización*. 1a ed. Resistencia: Librería de la Paz. 96 p.

Priyono, J.; R. Sutriyono & Z. Arifin. (2009). Evaluation for the Potential Use of Silicate Rocks from Four Volcanoes in Indonesia as Fertilizer and Soil Ameliorant *J. Tanah Trop.*, 14(1):1-8.

Priyono, J. & R. J. Gilkes. (2004). Dissolution of milled-silicate rock fertilizers in the soil. *Aust. J. Soil. Res.* 42: 441–448.

Ramos Gindri, C.; A.C. Dalmora; Z. Chielle; F.T. Campos de Sá; G.E. Hidalgo; I.A. Schneider & R.M. Kautzmann. (2016). Estudio preliminar de aplicación de basalto con zeolita como remineralizador de suelo en plantación de eucaliptus. *Anual de III Congreso brasileiro de rochagem*. Embrapa. 455pp.

Ramos Gindri C.; A. Gislaine de Mello & R. Kautzman Müller. (2014). A preliminary study of acid volcanic rocks for stonemeal application. *Environmental Nanotechnology Monitoring and management*. 1-2: 30-35.

Rao, T. P.; K. Yano; M. Lijima; A. Yamauchi & J. Tatsumi. (2002). Regulation of rhizosphere acidification by photosynthetic activity in cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp.) seedlings. *Annals of botany*, 89(2), 213–220, <https://doi.org/10.1093/aob/mcf030>

Römheld, V. (1991). El papel de los fitosideróforos en la adquisición de hierro y otros micronutrientes en especies de gramíneas: un enfoque ecológico. *Suelo vegetal* 130: 127–134. <https://doi.org/10.1007/BF00011867>

Roschnik, R.K.; P.M. Grant & W.K. Nduku. (1967). The effect of incorporating crushed basalt rock into an infertile acid sand. *Rhod. Zamb. Mal. J. Agric. Res.*, 5: 133-138.

Royo, L. & A.M. Brach. (2017). Producción y calidad nutricional de avenas en la cadena forrajera. *INTA Reconquista. Voces y ecos* 37: 26-31.

Saito, M. (2000). Symbiotic exchange of nutrients in arbuscular mycorrhizas: transport and transfer of phosphorus. 85-106 pp. En: Kapulnik, Y. & Douds, D.D. (eds.) *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Netherlands.

Santi, A.; T.J.C. Amado & J.A.A. Acosta. (2003). Adubação nitrogenada na aveia preta. i - influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo* Viçosa, Brasil. 27(6): 1075-1083.

Santos, J. F.; E. D. Santo; J. F. Xavier; J. Leite; J.R. Parcifico & A.C. Araujo. (2015). Producción de poroto bajo dosis de polvo de roca (MP4) en un sistema agroecológico. *Memorias del V congreso latinoamericano de agroecología*, archivo digital: online isbn 978-950-34-1265-7.

Santos, K.S. (2002). Atuação de fosfato natural com adição de enxofre com *Acidithiobacillus* na solubilização de fósforo e no desenvolvimento de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*) em solo de tabuleiro. (Tesis de maestría) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

Schalamuk, S. (2005). Dinámica y biodiversidad de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA): efecto de sistemas de labranza y fertilización en cultivos extensivos. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de La Plata. Argentina.

- Sékula, C.R. (2011). Características químicas do solo e produção de grandes culturas com rochagem e biofertilizantes. (Tesis de maestría). Universidad estadual do Centro-Oeste, Brasil.
- Senasa. (2019). Situación de la producción orgánica en la Argentina durante el año 2018. Recuperado en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/situacion_produccion_organica_argentina_2018.pdf
- Shamshuddin, J. & M. Anda. (2012). Enhancing the Productivity of Ultisols and Oxisols in Malaysia using Basalt and/or Compost. *Pedologist* 382-391.
- Sharma, S.; R. Sayyed; M. Trivedi, M. & T. Gobi. (2013). Review Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2: 587.
- Shindoi, M.M.J.F.; J. Prause, J. & P.L. Jover. (2012). Descomposición de *Vigna unguiculata* (caupí) en un argiudol típico de Colonia Benitez, Chaco. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 38 (1) 90p.
- Sieverding, E. (1991). Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza management in Tropical Agrosystems. 371 pp. *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, GTZ*, 224.
- Silva, F. J. P. da; A.M.X de Carvalho & P. H. de Castro Borges. (2022). The gabbro dacite blend as soil remineralizer. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*. ISSN (on line) 1981-0997 17(1): 1419.
- Silva, A. da; J.A. Almeida; C. Schmitt & C.V. Amarante. (2012). Fertilidade do solo e desenvolvimento de feijão comum em resposta adubação com pó de basalto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife*, 7(4): 548-554.
- Silva, D. R. G.; G. Marchi; C.R. Spehar; L.R.G. Guilherme, L.R. Guimarães; T.A. Rein; D.A. Soares & F.W. Ávila. (2012b). Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(3): 951-962. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300025>
- Silva, O.; F. Días; E. Gomes; C. Olivera & I. Marriel. (2011). Biossolubilização de fonolito influenciada pelos microrganismos do solo solubilizadores de potássio. Congresso nacional de meio ambiente de poços de caldas. En: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65840/1/Biossolubilizacao-fonolito-1.pdf>.
- Silva, E.A.; A.C.F. Deus; A.M.R. Cassiolato; K.L. Maltoni & F.M. Fernandes. (2008). Efeitos da rochagem na atividade microbiana de um solo con pastagem degradada. *FertBio*.
- Smith, S. E. & D. Read. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Third Edition, Academic Press Inc., London, UK, 800pp.
- Souza, D.I.; D.L. Fagotti; D.F. Saturno; P. Cerezini; V.N. Cervantes & M.A. Nogueira. (2011). Green manure associated with powder basalt and phosphate in agroecosystems in southern Paraná and northern Santa Catarina. Resúmen de VII Congresso Brasileiro de Agroecologia – Fortaleza.
- Souza, M. E. P. de; A. M. X. de Carvhallo; D. de Cassia Deliberali; I. Jucksch; G.G. Brown; E.S. Mendonça & I.M. CARDOSO. (2013). Vermicomposting with rock powder increases plant growth. *Applied Soil Ecology, Netherlands*. 69: 56– 60.

Stamford, N.P.; C.E.R. Silva Santos; W.P. Stamford Jr & S.L. Días. (2004). Biofertilizantes de roca fosfatada con *Acidithiobacillus* como alternativa de fertilización en suelo con bajo fósforo disponible. Revista analítica, (9).

Tan, K.Z.; O. Radziah; M.S. Halimi; A.R. Khairuddin; S.H. Habib & Z.H. Shamsuddin. (2014). Isolation and characterization of rhizobia and plant growth-promoting rhizobacteria and their effects on growth of rice seedling. American Journal of agricultural and biological sciences, vol 9 (3): 342-360,

Tan, S.; C. Yang; X. Mei; S. Shen; W. Raza; Q. Shen & Y. Xun. (2013). El efecto de los ácidos orgánicos de los exudados de la raíz del tomate sobre la colonización de la rizosfera de *Bacillus amyloliquefaciens* T-5. Applied Soil Ecology, 64: 15-22. ISSN 0929-1393.

Tarumoto, M.B.; O.B. Rossato, & C.A. Costa Crusciol. (2016) Eficiencia de remineralizador en dos tipos de suelos y manejos en parámetros biométricos y tecnológicos de caña de azúcar. Anual de III Congreso brasileiro de rochagem. Embrapa. 455pp.

Tavares, L.F.; A.M.X. Carvalho; L.G.B. Camargo; S.G.F. Pereira & I.M. Cardoso. (2018). Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering Actions. International journal of recycling of organic waste in agriculture, 7: 89-98.

Theodoro, S. & O. Leonardos. (2006). The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências 78(4): 721-730,

Tiecher, T. L.; T. Tiecher; C. A. Ceretta; P. A.A. Ferreira; F.T. Nicoloso; H.H. Soriani; A. Tassinari; J. T. Paranhos; L. De Conti & G. Brunetto. (2016). Physiological and nutritional status of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grown in soil with interaction of high doses of copper and zinc. Plant Physiology and Biochemistry, 106:253-63. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.05.015. Epub 2016 May 12. PMID: 27209215.

Tropical forages. (2008). *Vigna unguiculata* L. Disponible en https://www.tropicalforages.info/text/entities/vigna_unguiculata.htm (visitado en mayo 2015).

Uroz, S.; C. Calvaruso; M. Turpault, & P. Frey Klett. (2009). Mineral weathering by bacteria: ecology, actors and mechanisms. Elsevier Ltd.

Van Strateen, P. (2002). Rocks for crops: Agrominerals of sub-Saharan Africa. ICRAF, Nairobi, Kenya, 338pp.

Vaz de Melo, A.; J.C.; H. Braun; M. Mota dos Santos; R. Rodriguez Coimbra; R. Ribeiro da Silva & W. Fialho dos Reis. (2011). Nutrient uptake and biomass production of black oats in soils under eighteen years of organic and mineral fertilizer. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, 32(2): 411-420,

Wolschick, N.H.; F. T. Barbosa; I. Bertol; K. dos Santos; R. de S. Werner & B. Bagio. (2016). Canopy cover, biomass production and nutrient accumulation by cover crops. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, 15(2):134-143.

Zuffo, Al.; K. Morais; J. González Aguilera; R. Ratke & Steiner, Fábio. (2022). Agronomic performance of maize crop in response to the application of metabasalt powder rates. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 3:482-487.