



EFFECTO DE LA DENSIDAD DE PLANTAS SOBRE LOS COMPONENTES DEL RENDIMIENTO DE FRÉJOL CULTIVADO EN CONDICIONES DE CAMPO EN UN VALLE INTERANDINO DE ECUADOR

EFFECT OF PLANT DENSITY ON YIELD COMPONENTS OF COMMON BEAN GROWN UNDER INTER-ANDEAN MOUNTAIN CONDITIONS OF ECUADOR

Santiago C. Vásquez*¹, Edwin Israel Villavicencio Sanchez¹, Alex O. Guamán¹, Marlene Molina-Müller¹ y Camilo Alexander Mestanza Uquillas²

¹Carrera de Agronomía, Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja. Campus La Argelia, 110150, Loja, Ecuador.

²Facultad de Ciencias Pecuarias. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, 120501, Quevedo, Ecuador.

*Autor para correspondencia: santiagovasquezm@gmail.com

Manuscrito recibido el 11 de abril de 2021. Aceptado, tras revisión, el 02 de diciembre de 2021. Publicado el 1 de marzo de 2024.

Resumen

El fréjol es un cultivo importante debido a su alto valor nutritivo. En los últimos años la producción en Ecuador de este cultivo ha disminuido drásticamente debido entre otros factores a ineficientes procesos y falta de tecnificación en la producción. Entender cómo se generan y determinan los componentes del rendimiento del grano es primordial para diseñar estrategias que permitan aumentar el rendimiento del cultivo. En este estudio, se modificó la densidad de plantas con el objetivo de evaluar su impacto sobre el número de granos, peso de granos y rendimiento, bajo condiciones de campo en una región andina de Ecuador. Se realizaron dos experimentos sembrados en fechas distintas, donde se evaluaron densidades de plantas contrastantes 4 y 11 plantas m^{-2} . El efecto de los tratamientos se estudió sobre la duración del periodo emergencia - antesis, el número de vainas llenas y vanas, el número de granos, el peso seco de 100 granos y el rendimiento de grano. Los resultados indican que la densidad de plantas tiene un efecto significativo ($p < 0,05$) sobre el rendimiento, alcanzando un promedio de 257,15 $g m^{-2}$ en alta densidad y 151,45 $g m^{-2}$ en baja densidad. Los componentes principales del rendimiento mostraron una respuesta distinta a la modificación de la densidad de plantas; el número de granos presentó una fuerte variabilidad y fue positivamente asociado con el rendimiento final del grano ($p < 0,05$), mientras que el peso del grano no fue afectado.

Palabras clave: Componentes del rendimiento, densidad de siembra, fréjol, número de granos, peso de grano, *Phaseolus vulgaris*, población de plantas.

Abstract

Common bean is an important crop due to its high nutritional value. However, its production in Ecuador has decreased due to biotic and abiotic factors. Understanding the mechanisms that determine the yield components of this crop is essential to establish strategies that allow increasing the yield. In this study, the plant density was modified to evaluate its impact on yield and its two main components, the grain number and grain weight under field conditions in an Andean region of Ecuador. Two experiments planted on different dates were performed, where two planting densities 4 and 11 plants m^{-2} were evaluated. The effect of the treatments was studied on the length of the period, from emergence to anthesis, the number of full and empty pods, grain number, 100 grain weight and grain yield. The results indicate that the plant density has a significant effect ($p < 0.05$) on the yield, reaching an average of 257.15 g m^{-2} in high density, and 151.45 g m^{-2} in low density. The yield main components showed a different response to plant density modification; the grain number exhibited a strong variability and was positively associated with final grain yield ($p < 0.05$) while the grain weight was not affected.

Keywords: Grain number, grain weight, *Phaseolus vulgaris*, plant density, plant population, yield components.

Forma sugerida de citar: Vásquez, S., Villavicencio Sanchez, E., Guamán, A., Molina-Müller, M. y Mestanza Uquillas, C. (2024). Efecto de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento de fréjol cultivado en condiciones de campo en un valle interandino de Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 39(1):160-170. <http://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.10>.

IDs Orcid:

Santiago C. Vásquez: <https://orcid.org/0000-0002-3713-020X>
Edwin Villavicencio Sanchez: <https://orcid.org/0000-0002-6476-489X>
Alex Guamán: <https://orcid.org/0000-0002-8931-3809>
Marlene Molina-Müller: <https://orcid.org/0000-0003-2153-9294>
Camilo Mestanza Uquillas: <https://orcid.org/0000-0001-9299-170X>

1 Introducción

El fréjol (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo de gran importancia debido a su alto valor nutritivo, conteniendo entre 20 - 30% de proteína (Celmeli y col., 2018), y es uno de los cultivos importantes que se producen en varias zonas andinas de Ecuador (Valarezo y col., 2008; Bustamante, 2017). Como otras leguminosas, esta especie es usada en la rotación de cultivos para reducir los agentes causantes de enfermedades, y para mantener la fertilidad del suelo a través de la fijación de nitrógeno atmosférico (Vásquez, Mestanza y Riegel, 2015). En los últimos años en Ecuador la superficie cultivada y la producción de fréjol ha disminuido drásticamente; desde el año 2011 hasta el 2019 se estimó una disminución aproximada de 50% (FAOSTAT, 2019). Entre los factores que han contribuido a la reducción de la superficie cosechada se encuentran eventos de sequía, incidencia de patógenos, manejo deficiente del cultivo, baja tecnificación e incremento en los costos de producción, los cuales han favorecido la importación de grano de fréjol (Sistema de Información Pública Agropecuaria de Ecuador, 2018).

Incrementar la rentabilidad de este cultivo requiere mejorar la eficiencia productiva y reducir los costos de producción, para ello, el manejo de la densidad de plantas jugaría un rol importante (Calero-Hurtado y col., 2018). El rendimiento de los cultivos respondería a la modificación de la densidad de plantas, debido a que el número de plantas por unidad de superficie estaría relacionado con la tasa de crecimiento del cultivo bajo una condición particular de radiación solar y temperatura (Boada y Espinosa, 2016).

Tradicionalmente los agricultores utilizan densidades de plantas entre 15 600 a 20 800 plantas ha^{-1} con distancias entre surcos de 0,80 a 1,00 m, con la finalidad de realizar labores manuales de deshierba (Parreira, Alves y Peñaherrera-Colina, 2011), poniendo poca atención a la respuesta del rendimiento y sus componentes. Los genotipos de fréjol pueden variar en la generación de estructuras reproductivas debido a la plasticidad fenotípica en respuesta a la densidad de plantas (Andrade y Abbate, 2005), con consecuencias en la cobertura vegetal, biomasa, competencia con malezas, generación de los componentes del rendimiento y por lo tanto en rendimiento final de grano.

Algunos estudios muestran que el incremento de la densidad puede evitar pérdida de agua. En la medida en que se reduce la distancia entre surcos y se mantiene la distancia entre plantas es posible incrementar la cobertura vegetal del cultivo, y consecuentemente, reducir las pérdidas directas de agua por evaporación al cubrir más rápidamente el suelo (Osuna y col., 2012). Además, para que el cultivo de fréjol tenga ventajas competitivas con las malezas, el aumento de la densidad permite una cobertura total del suelo cuando el cultivo alcanza su pleno desarrollo vegetativo (Parreira, Alves y Peñaherrera-Colina, 2011).

El número de granos (NG) y el peso promedio de los granos (PG) son los principales componentes del rendimiento de los cultivos de grano (Peltonen-Sainio y col., 2007; Sadras, 2007; Slafer, Savin y Sadras, 2014). En muchos cultivos, el NG tiene mayor asociación con el rendimiento, mientras que el peso de grano presenta menor variación; no obstante, también se ha encontrado que el PG puede compensar la disminución del NG cuando disminuye la fuente (Ghobadi y col., 2006; Labra y col., 2017).

Estudios en fréjol han evaluado el efecto de la densidad de plantas sobre el rendimiento, principalmente en condiciones agroclimáticas tropicales y mediterráneas; sin embargo, la respuesta de los componentes del rendimiento puede variar en distintos genotipos y ambientes. Por ejemplo, Soratto y col. (2017) evaluaron densidades de 5, 7 y 9 plantas m^{-2} , y solamente encontraron diferencias en el rendimiento en un genotipo con la mayor densidad de plantas. En otro estudio, Ahmed, Razaq y Alam (2016), evaluaron densidades de 4, 5, 7 y 14 plantas m^{-2} , e informan que el peso del grano se incrementó con la menor densidad (4 plantas m^{-2}), mientras que el rendimiento se maximizó con 5 plantas m^{-2} . Por otro lado, Gabisa, Ejara y Misgana (2017), estudiaron altas densidades de plantas: 12, 15, 19 y 25 plantas m^{-2} , indicando que las densidades de 14 y 19 plantas m^{-2} presentaron los mayores rendimientos; estos antecedentes sugieren que la respuesta a la densidad de plantas está condicionada por el ambiente y el genotipo. Hasta la actualidad, existe escasa información sobre la respuesta individual de los componentes numéricos del rendimiento y su relación con el rendimiento de grano cuando se modifica la oferta de recursos en genotipos locales

de fréjol bajo condiciones de ambientes montañosos de zonas andinas de Ecuador.

Un mejor entendimiento de la determinación del rendimiento y sus componentes resulta un prerrequisito para el desarrollo de estrategias dirigidas a incrementar el rendimiento mediante el mejoramiento vegetal, así como para el manejo agronómico de los cultivos (Foulkes y col., 2011). El objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de la modificación de la densidad de plantas sobre los componentes del rendimiento en fréjol cultivado en una región andina de Ecuador.

2 Materiales y Métodos

2.1 Ubicación del experimento y manejo del cultivo

El estudio se realizó en la Estación Experimental La Argelia de la Universidad Nacional de Loja ($4^{\circ}02'19.2''S$ $79^{\circ}12'00.6''W$) a 2150 m.s.n.m, en un suelo de naturaleza franco limoso. Como material vegetal se utilizó fréjol arbustivo cv. Percal, que es ampliamente cultivado en la provincia de Loja, Ecuador. Previo a la siembra, se realizó una prueba de germinación de la semilla, mostrando un poder germinativo superior al 95%. Las malezas fueron controladas manualmente aproximadamente cada 20 días, iniciando desde el estado de primera hoja trifoliada hasta la etapa de llenado de grano, cubriendo el periodo crítico de interferencia de malezas informado por Ngouajio, Foko y Fouejio (1997). Cuando se observaron los primeros síntomas de daño causados por fitopatógenos se hicieron aplicaciones preventivas usando fungicida e insecticida sintéticos. Además, cuando las precipitaciones fueron escasas se aplicó riego complementario mediante aspersión. Antes de la siembra se incorporó boscashi 7 t h^{-1} , y posteriormente se fertilizó con 120 Kg ha^{-1} N parcializado en los estados fenológicos V4 y R6 (Córdova, Gepts y López, 1986).

2.2 Diseño Experimental

Se utilizó un diseño factorial con una distribución aleatoria. Se establecieron dos experimentos con fechas de siembra distinta, el Experimento 1 (E1) sembrado el 26 de octubre de 2018 y el Experimento 2 (E2) sembrado el 26 de noviembre de 2018. Los ex-

perimentos se establecieron en dos densidades de siembra, 11 plantas m^{-2} (0,60 m entre surcos y 0,30 m entre plantas) y 4 plantas m^{-2} (0,80 m entre surcos y 0,60 m entre plantas), colocando dos semillas por sitio. Las parcelas tenían una dimensión de 3,20 m de largo 2,80 m de ancho, con tres repeticiones para cada tratamiento.

2.3 Mediciones y análisis estadístico

La fenología del cultivo se registró semanalmente según la escala propuesta por Córdova, Gepts y López (1986), desde la siembra hasta madurez de cosecha. Los datos meteorológicos de temperatura, humedad relativa y precipitación se registraron diariamente mediante la estación meteorológica La Argelia-Loja (INAMHI) ubicada cerca al experimento.

Se tomaron todas las plantas en madurez de cosecha de 1 m lineal de las dos hileras centrales de cada parcela, evitando las plantas de los bordes, y se contabilizó el número de granos, el número de vainas llenas y vanas. El peso seco de los granos se determinó después de haberlos dejarlos en estufa por 3 días a $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Con los datos de número y peso de granos se calculó el rendimiento de grano.

Para evaluar el efecto de los tratamientos, se realizó un análisis de varianza factorial y un test de medias mediante la prueba de Fisher ($\alpha = 0,05$). Previo al ANOVA se evaluaron los supuestos estadísticos de normalidad, independencia de las observaciones y homogeneidad de varianza. El modelo representado por la Ecuación 1 fue usado para evaluar las diferencias entre los tratamientos.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Tal que y_{ijk} representa las observaciones correspondientes al nivel i del factor densidad y j al nivel del factor experimento; μ representa la media global; α_i es el efecto producido por el nivel i -ésimo del factor densidad de plantas; β_j es el efecto producido por el nivel j -ésimo del factor experimento; $(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto producido por la interacción entre la densidad y el experimento, y ε_{ijk} representa el error experimental.

3 Resultados y Discusión

3.1 Fenología y clima

La duración de la etapa siembra – antesis no estuvo afectada por la densidad de siembra ni por la fecha de siembra ($p > 0,05$); en promedio el cultivo en los dos experimentos demoró 61,72 ($\pm 0,74$) días para llegar a floración (Tabla 1). El ciclo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha tuvo una duración aproximada de 119 y 125 días para los tratamientos de alta y baja densidad, respectivamente. La escasa diferencia en la duración de las etapas y el ciclo

del cultivo entre los experimentos y densidades podría estar relacionado con la poca variación de temperatura que experimentaron las plantas de los distintos tratamientos (Figura 1), debido a que este es el principal factor que modifica la ontogenia de los cultivos (Luo, 2011). Un estudio previo en el mismo cultivo indica que el cultivo tardó 141,67 días hasta la madurez de cosecha; sin embargo, la temperatura media del ciclo fue de 12,47 °C (Goyes, 2014), sugiriendo que esta diferencia estaría dada por las temperaturas más frías que retrasaron la acumulación térmica del cultivo.

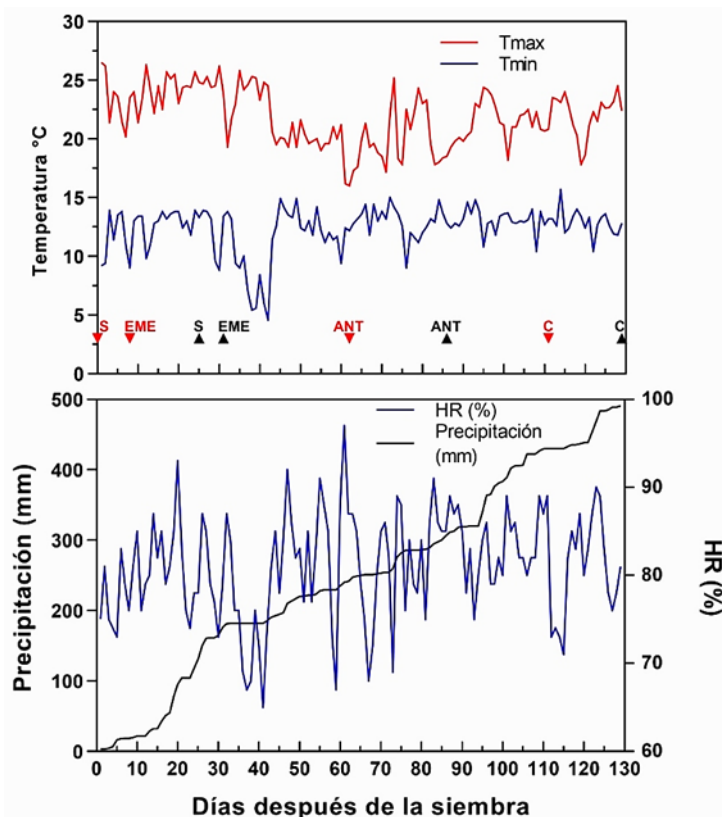


Figura 1. Esquema de la duración de las etapas fenológicas y variables climáticas de precipitación, temperatura y humedad relativa durante el ciclo de cultivo de los dos experimentos. Triángulos rojos indican el experimento 1 y triángulos negros indican el experimento 2. S (siembra), EME (emergencia), ANT (antesis), C (cosecha).

3.2 Número de vainas

Las plantas sembradas en baja densidad (4 plantas m^{-2}) tuvieron mayor número de vainas planta⁻¹ en comparación con las sembradas en mayor densidad (11 plantas m^{-2}), incrementado en 36,2 y 29,2% el

número de vainas en el experimento 1 y 2, respectivamente ($P < 0,05$). También, se encontraron diferencias significativas entre los experimentos (Tabla 1), observándose que los promedios del experimento 2 fueron menores ($P < 0,05$), posiblemente debido

a que el experimento 2 tuvo incidencia de hongos patógenos que pudo afectar el número final de vainas (no se evaluó la incidencia de enfermedades). Cuando se analizó el número de vainas vanas no se encontraron diferencias estadísticas, sugiriendo que hubo recursos suficientes para el establecimiento y crecimiento de los granos por vaina en las densidades evaluadas.

El incremento en el número de vainas en las plantas crecidas en baja densidad sugiere que es consecuencia de una menor competencia intraespecífica, lo que derivaría en mayor disponibilidad de recursos que pudo generar incrementos en el nú-

mero de ramificaciones y vainas. Algunos cultivos de grano, incluido el fréjol, tienen la capacidad de modificar su estructura como respuesta a la modificación de la fuente; trabajos previos señalan que el número de vainas es uno de los componentes más sensibles a la modificación de la densidad en fréjol (Bennett, Adams y Burga, 1977; Mondo y Nascen-te, 2018). Los resultados de la presente investigación están de acuerdo con antecedentes previos (Abubaker, 2008; Osuna y col., 2012; Gabisa, Ejara y Misgana, 2017), donde el incremento del número de plantas disminuye el número de vainas establecidas por cada planta en el cultivo de fréjol.

Tabla 1. Promedios del rendimiento y sus componentes y duración de la etapa siembra – antesis.

| E | DS | Días hasta antesis | Vainas Planta ⁻¹ | Vainas Vanas Planta ⁻¹ | Vainas m ⁻² | Granos Vaina ⁻¹ | Granos Planta ⁻¹ | Granos m ⁻² | Peso de 100 granos (g) | Rendimiento (g m ⁻²) |
|-------|----|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| 1 | 11 | 61,67 | 13,5 | 4,5 | 49,5 | 4,98 | 56,17 | 624,57 | 40,41 | 254,28 |
| 1 | 4 | 62 | 21,17 | 4,83 | 19,33 | 4,87 | 96,83 | 402,83 | 45,52 | 183,93 |
| 2 | 11 | 60,73 | 10,68 | 4,9 | 53,9 | 5,06 | 52,69 | 585,96 | 43,73 | 260,02 |
| 2 | 4 | 62,47 | 15 | 6,83 | 31,33 | 5,28 | 70,83 | 294,67 | 38,71 | 118,97 |
| E. st | | 0,62 | 1,4 | 0,53 | 2,35 | 0,1 | 6,76 | 52,04 | 1,62 | 25,43 |
| E | | ns | * | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| DS | | ns | * | ns | * | ns | * | * | ns | * |
| ExDS | | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

*Efecto significativo $p < 0,05$; E.st: Error estándar; ns: no significativo; E: experimento; DS: densidad de plantas (plantas m⁻²). Los valores son promedios de tres repeticiones.

3.3 Número de granos

En los tratamientos de densidad y experimentos evaluados no se encontraron diferencias estadísticas en el NG vaina⁻¹, en promedio se obtuvo 5 ($\pm 0,17$) granos en cada vaina. El número de granos que quedan establecidos en cada vaina estaría relacionado con la cantidad de recursos disponibles del suelo y la fotosíntesis (Hadi y col., 2006; Lake y col., 2019). Los resultados obtenidos indican que en los rangos de densidad explorados no hubo limitación para la formación de granos en las vainas (Tabla 1), sugiriendo que cuando se modifica la disponibilidad de la fuente por la densidad de plantas, el establecimiento del número de vainas planta⁻¹ es más sensible al ambiente que el NG vaina⁻¹.

Tanto el NG planta⁻¹ y NG m⁻² estuvieron afectados por la densidad de plantas ($P < 0,05$). Como se mostró anteriormente, las plantas que crecieron en baja densidad tuvieron mayor número de vainas,

sin diferencias en el número de granos establecidos por vaina; en consecuencia, el NG planta⁻¹ se incrementó en 42 y 26% en el E1 y E2, respectivamente, en comparación a las plantas sembradas en alta densidad (Tabla 1), observándose una relación positiva entre el número de vainas planta⁻¹ y NG planta⁻¹ (Figura 2A).

Por el contrario, cuando se considera el NG m⁻², se observa que este componente es significativamente superior en el tratamiento de alta densidad debido a que en este tratamiento existía mayor número de plantas por unidad de superficie; por lo tanto, el número de estructuras reproductivas también se incrementa, a pesar de que las plantas crecidas en baja densidad establecieron mayor número de vainas planta⁻¹, lo que no fue suficiente para compensar el NG m⁻² ni el rendimiento de grano, observándose una relación negativa entre el número de vainas planta⁻¹ y el rendimiento (Figura 2B). Trabajos previos también muestran una disminu-

ción del NG planta⁻¹ cuando se incrementa la población de plantas y se modifica el arreglo espacial del cultivo de fréjol (Osuna y col., 2012; Escalante-Estrada, Rodríguez-González y Escalante-Estrada, 2015). Una vía para mejorar el rendimiento del fré-

jol puede ser el mejoramiento del número de vainas por planta, que como se muestra en este estudio responde satisfactoriamente a la modificación de recursos y está asociado con el rendimiento final del grano.

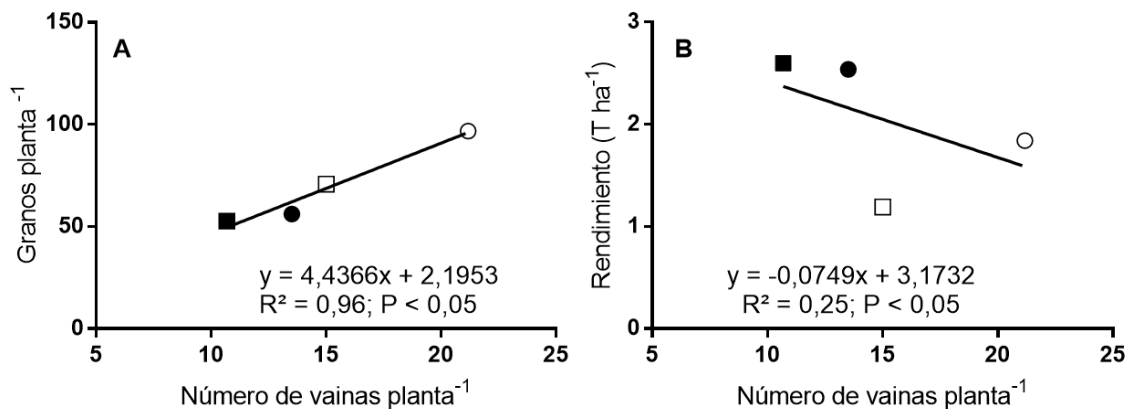


Figura 2. Relación entre el número de vainas por planta y el número de granos por planta (A), y entre el número de vainas por planta y el rendimiento del cultivo (B). Los círculos representan el experimento 1 y los cuadrados el experimento 2; símbolos llenos indican densidad 11 plantas⁻² y símbolos vacíos indican densidad 4 plantas m⁻². Cada punto es promedio de tres repeticiones

3.4 Peso de granos

El peso de granos no estuvo afectado por el tratamiento de densidad en los dos experimentos (Tabla 1). En promedio el peso seco de 100 granos en cosecha fue de 42,09 g ($\pm 3,1$) en todos los tratamientos, confirmando que este componente es más estable que el NG, apoyando la idea de que el PG tiene una característica conservadora y poco sensible a la modificación de la relación fuente – destino como se ha visto en otros cultivos de grano como soya y maíz (Sadras, 2007).

Estudios realizados con genotipos de hábito determinado e indeterminado en ambientes distintos también muestran que el PG tiene poca variación cuando se modifica la densidad de plantas (Osuna y col., 2012; Escalante-Estrada, Rodríguez-González y Escalante-Estrada, 2015; Soratto y col., 2017). Estos resultados indican un alto desafío para aumentar el peso del grano posiblemente por la fuerte interacción del genotipo y ambiente ejercido sobre este componente en el fréjol como informa Pereira y col. (2017).

3.5 Rendimiento

El rendimiento del grano se vio afectado significativamente por la densidad de plantas en los dos experimentos ($P < 0,05$). Se observó una respuesta positiva del rendimiento al aumentar el número de plantas m⁻², debido a que en una primera etapa el número de plantas por unidad de superficie condicionaría la formación de estructuras reproductivas en ausencia de restricción de recursos de nutrientes y radiación solar (Slafer y Rawson, 1994; Kruk y Satorre, 2003; Véliz y col., 2021a).

Los resultados sugieren que a pesar que los recursos del suelo pudieron disminuir en la alta densidad debido a la competencia intraespecífica, esto no fue limitante para la ganancia del rendimiento en el tratamiento de alta densidad, probablemente por una mayor generación de biomasa por unidad de superficie, que se tradujo en mayor intercepción de radiación fotosintéticamente activa (De Bruin y Pedersen, 2009; Véliz y col., 2021b), favoreciendo el establecimiento de mayores órganos cosechados como en estudios anteriores (Egli, 1988; Soratto y col., 2017; Calero-Hurtado y col., 2018).

El rendimiento en la presente investigación superó significativamente estudios previos (Calero-Hurtado y col., 2018) donde se usaron densidades superiores como 16 plantas m^{-2} con rendimiento de grano de 1 t ha^{-1} , incluso a investigaciones donde se evaluaron densidades entre 22 hasta 28 plantas m^{-2} (Puente, 2009), posiblemente por una baja eficiencia en esos sistemas de producción, lo que podría implicar mayores costos de producción debido al mayor número de plantas por unidad de superficie.

En la presente investigación se exploraron relaciones entre el rendimiento y sus componentes, cuyos resultados indican que el número de granos y vainas por unidad de superficie están estrechamente asociados con el rendimiento, como se ha visto en otros cultivos de grano (Peltonen-Sainio y col., 2007; Sadras, 2007; Slafer, Savin y Sadras, 2014). Por otro lado, el PG no tiene relación con el rendimiento (Figura 3 A, B, C). Como se mostró previamente, el NG y PG poseen distinta sensibilidad a la modificación de la densidad en fréjol, indicando que el PG en fréjol es un rasgo estable en comparación con el NG.

Nuestros resultados concuerdan con estudios realizados en cereales de clima templado (Reynolds y col., 2021), donde el rendimiento se relaciona mejor con el número de granos mientras que el PG es insensible o responde marginalmente cuando se modifican el aporte de recursos durante el llenado

de granos (Serrago y col., 2013; Aisawi y col., 2015; Bonelli y col., 2020).

Los resultados del presente estudio indican que el fréjol, así como en otros cultivos de grano como los cereales, también está limitado por el destino o sumidero, debido a que la modificación de los recursos de la fuente, como consecuencia del cambio en el número de plantas por unidad de superficie, modificaron el rendimiento principalmente por cambios en el NG y no en el PG. Estos resultados apoyan la idea de que la poca variación observada en el PG puede reflejar una respuesta evolutiva adaptativa, y que la reducción de la variabilidad intraespecífica del tamaño y peso de la semilla permitiría un tamaño de semilla óptimo, equilibrando la supervivencia de los individuos y el número de progenie producida como indican Sadras y Denison (2009) y Sadras y Slafer (2012).

Incrementar el rendimiento del fréjol implicaría aumentar sus dos componentes para evitar posibles compensaciones entre el NG y PG; sin embargo, tradicionalmente el mejoramiento de los cultivos de grano se ha enfocado en aumentar el NG (Mason y col., 2008; Sadras y Lawson, 2011), mientras que el PG ha tenido menos atención (Castillo, Vásquez y Calderini, 2017). La escasa variabilidad del PG encontrada en este estudio resalta la necesidad de mejorar este componente, lo que podría ayudar a incrementar el rendimiento en el cultivo de fréjol.

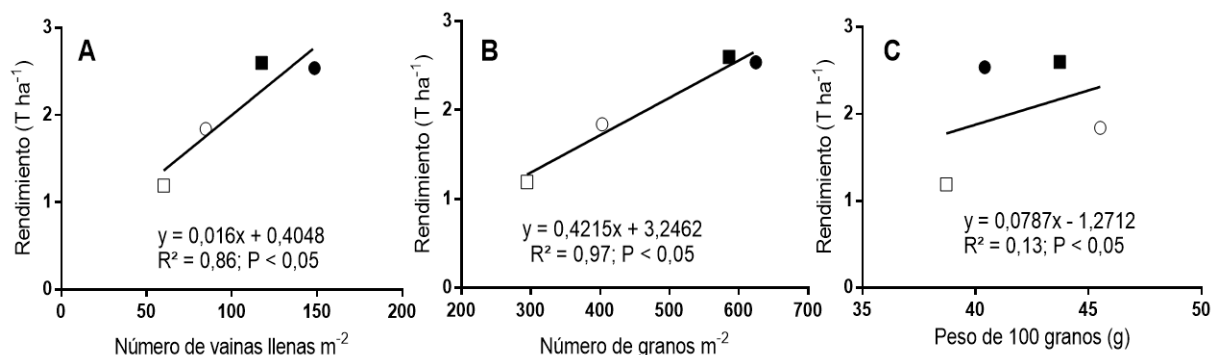


Figura 3. Relación entre el rendimiento y el número de vainas m^{-2} (A), el número de granos m^{-2} (B), y el peso de 100 de granos (C). Los círculos representan el experimento 1 y los cuadrados el experimento 2; símbolos llenos indican densidad 11 plantas m^{-2} y símbolos vacíos indican densidad 4 plantas m^{-2} . Cada punto es promedio de tres repeticiones

4 Conclusiones

En los dos experimentos el aumento de la densidad de plantas de frejol desde 4 hasta 11 plantas m^{-2} condujo a incrementos en el rendimiento de grano en promedio $\approx 70\%$ en los dos experimentos. Se evidenció una respuesta distinta de los componentes del rendimiento a la modificación de la densidad de plantas. El NG es altamente sensible y se incrementó en $\approx 73\%$, producto del aumento en el número de vainas por unidad de superficie en alta densidad, además, el NG está estrechamente asociado con el rendimiento final del grano ($R^2 = 0,97$), mientras que el peso del grano no estuvo afectado por la modificación de la densidad de plantas, alcanzando en promedio 42 ± 3 g en todos los tratamientos.

Hasta la actualidad, son escasas las evidencias que hayan cuantificado la respuesta de los componentes numéricos del rendimiento de fréjol y su asociación con el rendimiento final bajo una aproximación ecofisiológica en ambientes andinos, donde las condiciones de suelo y clima difieren significativamente con estudios previos. Por lo tanto, estos resultados constituyen una base para diseñar estrategias orientadas a incrementar el rendimiento de este importante cultivo en estas condiciones agroclimáticas, sobre todo para mejorar el peso y tamaño de grano que tiene poca respuesta a la oferta de recursos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Franco Guillen, Yomara Fernández, Ángel Sánchez y Andrés Salinas por la asistencia técnica en los experimentos de campo. Lucia Quichimbo del Laboratorio de Fisiología Vegetal, así como a Diana Iñiguez y Fernanda Livisaca del Laboratorio de Suelos y Agua de la Universidad Nacional de Loja por las facilidades prestadas para el procesamiento y análisis del material vegetal.

Contribución de los autores

SCV; Conceptualización, Análisis formal, Supervisión, Escritura-borrador original, Escritura-revisión y edición. EIVS; Investigación, Curación de datos, Escritura – borrador original. AGG; Investigación. MMM; Investigación, Escritura-revisión y edición. CAMU; Escritura-revisión y edición.

Referencias

- Abubaker, S. (2008). «Effect of plant density on flowering date, yield and quality attribute of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) under center pivot irrigation system». En: *American Journal of Agricultural and Biological Science* 3.4, 666-668. Online: <https://bit.ly/3Tl5xQq>.
- Ahmed, N., M. Razaq y H. Alam (2016). «Response of French Bean Cultivars to Plant Spacing Under Agroclimatic Condition of Baffa». En: *Journal of Northeast Agricultural University (English Edition)* 23.1, 16-19. Online: <https://bit.ly/3DOSEIx>.
- Aisawi, K. y col. (2015). «The physiological basis of the genetic progress in yield potential of CIMMYT spring wheat cultivars from 1966 to 2009». En: *Crop Science* 55.4, 1749-1764. Online: <https://bit.ly/3fN1JcW>.
- Andrade, F. y P. Abbate (2005). «Response of maize and soybean to variability in stand uniformity». En: *Agronomy Journal* 97.4, 1263-1269. Online: <https://bit.ly/3zWdMf2>.
- Bennett, J., M. Adams y C. Burga (1977). «Pod Yield Component Variation and Intercorrelation in *Phaseolus vulgaris* L. as Affected by Planting Density 1». En: *Crop science* 17.1, 73-75. Online: <https://bit.ly/3UnlczR>.
- Boada, R. y J. Espinosa (2016). «Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador». En: *Siembra* 3.1, 67-82. Online: <https://n9.cl/odt9v>.
- Bonelli, L. y col. (2020). «Does the photo-thermal environment limit post-flowering maize growth?» En: *Field Crops Research* 252, 107805. Online: <https://bit.ly/3zYfsVf>.
- Bustamante, D. (2017). «Escenario de cambio climático a nivel de subcuencas hidrográficas para el año 2050 de la provincia de Chimborazo-Ecuador». En: *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida* 26.2, 15-27. Online: <https://bit.ly/3FZEC9G>.
- Calero-Hurtado, A. y col. (2018). «Efecto de cuatro densidades de siembra en el rendimiento agrícola del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.)». En: *Revista de la Facultad de Ciencias* 7.1, 88-100. Online: <https://bit.ly/3NOMh1g>.
- Castillo, F., S. Vásquez y D. Calderini (2017). «Does the pre-flowering period determine the potential grain weight of sunflower?» En: *Field Crops*

- Research 212, 23-33. Online: <https://bit.ly/3UE1PIR>.
- Celmeli, T. y col. (2018). «The nutritional content of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces in comparison to modern varieties». En: *Agronomy* 8.9, 166. Online: <https://bit.ly/3EfPtLq>.
- Córdova, F. Fernández de, P. Gepts y M. López (1986). *Etapas de desarrollo de la planta de fréjol común (Phaseolus vulgaris L.)* Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- De Bruin, J. y P. Pedersen (2009). «New and old soybean cultivar responses to plant density and intercepted light». En: *Crop science* 49.6, 2225-2232. Online: <https://n9.cl/chfvs>.
- Egli, D. (1988). «Plant density and soybean yield». En: *Crop Science* 28.6, 977-981. Online: <https://bit.ly/3TneBUK>.
- Escalante-Estrada, J., M. Rodríguez-González e Y. Escalante-Estrada (2015). «Nitrógeno, distancia entre surcos, rendimiento y productividad del agua en dos cultivares de frijol». En: *Bioagro* 27.2, 75-82. Online: <https://n9.cl/p9iqk>.
- FAOSTAT (2019). *Producción agrícola*. FAOSTAT WebSite. Online: <https://bit.ly/3g1oFmG>.
- Foulkes, M. y col. (2011). «Raising yield potential of wheat. III. Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance». En: *Journal of experimental botany* 62.2, 469-486. Online: <https://bit.ly/3WPPNaX>.
- Gabisa, M., E. Ejara y Z. Misgana (2017). «Effect of phosphorus application and plant density on yield and yield components of haricot bean (*Phaseolus vulgaris* L.) at Yabello southern Ethiopia». En: *International Journal of Scientific Engineering and Applied Science* 3.3, 207-2019. Online: <https://bit.ly/324uPKA>.
- Ghobadi, M. y col. (2006). «Short and long periods of water stress during different growth stages of canola (*Brassica napus* L.): effect on yield, yield components, seed oil and protein contents». En: *Journal of Agronomy* 5.2, 336-341. Online: <https://scialert.net/abstract/?doi=ja.2006.336.341>.
- Goyes, D. (2014). «Evaluación de la aclimatación de 10 cultivares de fréjol arbustivo (*Phaseolus vulgaris* L.), a campo abierto en Pisin, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo». Tesis de maestría. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Hadi, H. y col. (2006). «Response of common bean (*Phaseolus vulgaris*) to different levels of shade». En: *Journal of Agronomy* 5.4, 595-599. Online: <https://bit.ly/3d8MbvY>.
- Kruk, B. y E. Satorre (2003). «Producción de cultivos de granos. Bases funcionales para su manejo». En: Universidad de Buenos Aires. Cap. Densidad y arreglo espacial del cultivo, págs. 279-318.
- Labra, M. y col. (2017). «Plasticity of seed weight compensates reductions in seed number of oilseed rape in response to shading at flowering». En: *European Journal of Agronomy* 84, 113-124. Online: <https://bit.ly/3DP50Ax>.
- Lake, L. y col. (2019). «Yield determination and the critical period of faba bean (*Vicia faba* L.)». En: *Field Crops Research* 241, 107575. Online: <https://bit.ly/3DZjOg4>.
- Luo, Q. (2011). «Temperature thresholds and crop production: a review». En: *Climatic change*. Online: <https://bit.ly/3hBpXHS> 109.3, págs. 583-598.
- Mason, S. y col. (2008). «Yield increase has been more rapid for maize than for grain sorghum». En: *Crop Science* 48.4, 1560-1568. Online: <https://bit.ly/3WSmaggT>.
- Mondo, V. y A. Nascente (2018). «Produtividade do feijão-comum afetado por população de plantas». En: *Agrarian* 11.39, 89-94. Online: <https://bit.ly/3DULMcN>.
- Ngouajio, M., J. Foko y D. Fouejio (1997). «The critical period of weed control in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Cameroon». En: *Crop Protection* 16.2, 127-133. Online: <https://bit.ly/3DW7UmX>.
- Osuna, E. y col. (2012). «Rendimiento de frijol Pinto Saltillo en altas densidades de población bajo temporal». En: *Revista mexicana de ciencias agrícolas* 3.7, 1389-1400. Online: <https://bit.ly/3A4mQOY>.
- Parreira, M., P. Alves y L. Peñaherrera-Colina (2011). «Influencia de las malezas sobre el cultivo de frijol en función de espaciamiento y de la densidad de plantas». En: *Planta Daninha* 29, 761-769. Online: <https://bit.ly/3TrdcwC>.
- Peltonen-Sainio, P. y col. (2007). «Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: evidence based on 30 years of multi-location trials». En: *Field Crops Research* 100.2-3, 179-188. Online: <https://bit.ly/3hy2IUo>.
- Pereira, H. y col. (2017). «Genetic, environmental and genotype x environment interaction effects on the common bean grain yield and commercial quality». En: *Semina: Ciências Agrárias* 38.3, 1241-1250. Online: <https://bit.ly/3A5vz3v>.

- Puente, H. (2009). «Efecto de la densidad de siembra en el sistema de hileras pares en el rendimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Red Kidney en condiciones de Tingo María». Tesis de maestría. Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Reynolds, M. y col. (2021). «Addressing research bottlenecks to crop productivity». En: *Trends in Plant Science* 26.6, 607-630. Online: <https://bit.ly/3TrX65K>.
- Sadras, V. y R. Denison (2009). «Do plant parts compete for resources? An evolutionary viewpoint». En: *New Phytologist* 183.3, 565-574. Online: <https://bit.ly/3hA6IOz>.
- Sadras, V. y C. Lawson (2011). «Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007». En: *Crop and Pasture Science* 62.7, 533-549. Online: <https://bit.ly/3G6dBkT>.
- Sadras, V. y G. Slafer (2012). «Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities». En: *Field crops research* 127, 215-224. Online: <https://bit.ly/3TqJDew>.
- Sadras, Victor O (2007). «Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops». En: *Field Crops Research* 100.2-3, 125-138. Online: <https://bit.ly/3hwWEpM>.
- Serrago, R. y col. (2013). «Understanding grain yield responses to source-sink ratios during grain filling in wheat and barley under contrasting environments». En: *Field Crops Research* 150, 42-51. Online: <https://bit.ly/3G5ZPyN>.
- Sistema de Información Pública Agropecuaria de Ecuador (2018). *Boletín Situacional Fréjol Tierno y Seco*.
- Slafer, G. y H. Rawson (1994). «Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers». En: *Functional Plant Biology* 21.4, 393-426. Online: <https://bit.ly/3TljNss>.
- Slafer, G., R. Savin y V. Sadras (2014). «Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment». En: *Field Crops Research* 157, 71-83. Online: <https://bit.ly/3EIW476>.
- Soratto, R. y col. (2017). «Plant density and nitrogen fertilization on common bean nutrition and yield». En: *Revista caatinga* 30, págs. 670-678.
- Valarezo, O. y col. (2008). «Diagnóstico de la "mosca blanca" en Ecuador». En: *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida* 7.1, 13-20. Online: <https://bit.ly/3Ek4XhB>.
- Vásquez, S., C. Mestanza y R. Riegel (2015). «Caracterización de secuencias de los genes Ahas y psbA relacionados con resistencias a herbicidas en *Lupinus albus* L.». En: *Agro Sur* 43.1, 31-40. Online: <https://bit.ly/3tqeTzC>.
- Véliz, D. y col. (2021a). «Aplicación de sistemas de nitrógeno en el rendimiento de quinua adaptada a sistemas tecnológicos». En: *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação* E44, 119-131. Online: <https://bit.ly/3WRcE67>.
- Véliz, D. y col. (2021b). «Phosphorus availability and solar radiation efficiency in carrot (*Daucus carota* L.) cultivation in volcanic soils.». En: *Revista Científica Interdisciplinaria Investigación y Saberes* 11.2, 44-65. Online: <https://bit.ly/3pZ1Djt>.