

La modelación en las leguminosas, con énfasis en el cultivo del frijol

Modeling in Legumes, with Emphasis on Beans Crop



<https://cu-id.com/2177/v32n4e10>

Alejandro Montesino-Palomino*, Deborah González-Viera,
 René Florido-Bacallao

Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN: La leguminosa de grano para consumo humano de mayor producción en el mundo es el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Esta planta es nativa de las Américas, donde juega un importante papel en nuestra dieta cotidiana. El ambiente donde se cultiva el frijol es variado, desde zonas tropicales hasta alta montaña, con distintos hábitos de crecimiento y en sistemas de producción, desde los altamente tecnificados hasta los tradicionales. Por tanto, los esfuerzos en la modelación del cultivo del frijol deben empezar desde, identificar el tipo de frijol y el sistema objetivo. El frijol es muy sensible al estrés abiótico, hecho que ha animado el modelaje de su posible respuesta bajo escenarios de cambio climático. Para ello, se realizó una revisión de literatura para identificar ejercicios de modelación ejecutados en América Latina, que incluyen estudios de crecimiento (tasas de producción de nudos y área foliar), fenología, y de rendimiento. Los modelos empleados en dichos estudios incluyen EcoCrop, CROPGRO-DRYBEAN (implementado en la plataforma DSSAT), y en un caso cada uno, Maxent y CLIMEX. Se describen cuatro estudios en detalle: en los dos países de mayor producción en el mundo (Brasil y México), y en Centroamérica como región altamente vulnerable al cambio climático. Los estudios concuerdan que la productividad del frijol podría sufrir serios efectos negativos en el transcurso del Siglo XXI, a raíz del cambio climático. Finalmente, se informa sobre un ejercicio reciente de recopilar datos históricos de ensayos de frijol en Latinoamérica para alimentar futuros esfuerzos de modelaje.

Palabras clave: estimación, modelos de simulación, rendimiento de cultivos.

ABSTRACT: The most widely produced grain legume for human consumption in the world is the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). This plant is native to the Americas, where it plays an important role in the daily diet. The environment where beans are grown is varied, from tropical zones to high mountains, with different growth habits and production systems, from highly technical to traditional. Therefore, efforts in bean crop modeling should start from identifying the type of bean and the target system. Beans are very sensitive to abiotic stress, a fact that has encouraged the modeling of their possible response under climate change scenarios. For this, a literature review was carried out to identify modeling exercises carried out in Latin America, which include growth studies (node production rates and leaf area), phenology and yield. The models used in these studies include EcoCrop, CROPGRO-DRYBEAN (implemented on the DSSAT platform), and in one case of each, Maxent and CLIMEX. Four studies are described in detail: in the two countries with the highest production in the world (Brazil and Mexico), and in Central America as a region highly vulnerable to climate change. Studies agree that bean productivity could suffer serious negative effects in the course of the 21st century because of climate change. Finally, a recent exercise to collect historical data from bean trials in Latin America is reported to feed future modeling efforts.

Keywords: Estimation, Simulation Models, Crop Yield.

*Author for correspondence: Alejandro Montesino-Palomino, e-mail: amontesino@inca.edu.cu.

Recibido: 20/04/2023

Aceptado: 01/09/2023

INTRODUCCIÓN

El consumo de leguminosas de grano resulta valioso como complemento en dietas a base de cereales o de tubérculos; sobre todo en regiones donde la población tiene un limitado acceso a las proteínas de origen animal.

Las leguminosas, por sí mismas, son una buena fuente de proteínas y de vitaminas y minerales. Sin embargo, contienen factores antinutricionales tales como inhibidores de tripsina, hemaglutininas, saponinas y ácido fítico entre otros, muchos de los cuales, afortunadamente son destruidos, al menos en parte, al aplicar las técnicas culinarias tradicionales. Estos factores modifican el aprovechamiento nutricional de sus nutrientes (Serrano y Goñi, 2004).

Las leguminosas incluyen al género *Phaseolus*, el cual es de origen neotropical y el ancestro silvestre del frijol común. Esta planta crece como un bejuco anual, desde el noroeste de México hasta el norte de Argentina, en un ambiente clasificado como bosque sub-húmedo pre-montano. Este ambiente típicamente se encuentra entre 1500 y 2200 m sobre el nivel del mar, característico por sus temperaturas moderadas, con épocas marcadas de abundante lluvia alternando anualmente con sequía. (Freytag y Debouck, 2002)

El suelo en dicho ambiente, aunque no es de la mejor calidad, tampoco presenta grandes problemas ya que presenta un buen contenido de materia orgánica. Por lo tanto, el ancestro del frijol cultivado evolucionó sin mayores limitantes climáticos ni de suelo, lo más probable es que, a raíz de la competencia de la vegetación existente en ambiente de bosque pre-montano, el limitante mayor podría haber sido la radiación solar disponible, obligando así al silvestre a trepar vigorosamente para competir con arbustos y pequeños árboles. Dado este patrón de evolución, la especie no está adaptada al estrés abiótico de sequía, altas temperaturas, suelos ácidos o de baja fertilidad. Por este motivo, cuando el hombre llevó el frijol a otros ambientes para cultivarlo como fuente de alimento, la especie fue sometida a factores de estrés diferentes a los presentes en el ambiente de la forma silvestre.

(arbustivo indeterminado, arbustivo determinado, y voluble)

El frijol es una planta de origen tropical y se desarrolla mejor a temperaturas entre 18 y 24 °C y se destaca que los mayores rendimientos se obtienen a las temperaturas promedios indicadas. Además, se informa que en zonas calurosas se puede producir frijol satisfactoriamente, siempre que las temperaturas nocturnas no sean muy elevadas, ya que las noches calurosas comúnmente inducen la caída de las flores en detrimento de la producción (Faure Alvarez et al., 2014). Las temperaturas bajas (inferiores a 15 °C) pueden provocar disminuciones en el rendimiento, ya que afectan el desarrollo vegetativo por ser muy lento

el crecimiento y provocan atrasos en la floración, con lo cual se prolonga considerablemente el ciclo de crecimiento (Rosas, 2003).

Beebe (2012) define que los factores que influyen en rendimientos del frijol son las plagas y enfermedades, especialmente las fungosas. Aun así, otros factores de importancia en muchas zonas de producción, son aquellos para los cuales la especie no fue preparada en su estado silvestre: sequía, altas temperaturas, deficiencia de fósforo y en unas zonas, la toxicidad de aluminio y/o manganeso. Por tal motivo, estos aspectos se consideran en los programas de investigación acerca de la modelación del cultivo del frijol, que contribuyan a la estimación de los rendimientos, en diferentes países de Latinoamérica.

El objetivo de este trabajo es brindar el estado del arte de los principales modelos de simulación en las leguminosas, específicamente en el cultivo del frijol, con los resultados de su aplicación en el entorno latinoamericano.

DEFINICIÓN DE MODELO

Se puede decir que un modelo es la representación ideal de un sistema y la forma en que este opera, en los cuales se destacan características relevantes del objeto en estudio, cuyo objetivo es analizar o predecir el comportamiento futuro (Jay, 2012)

Es por excelencia la herramienta principal que utiliza la estadística para simbolizar problemas o situaciones de la vida. Un caso particular lo constituyen los modelos matemáticos

EL ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN DE FRIJOL EN LATINOAMÉRICA

A partir de los años 80 se han venido desarrollando modelos de simulación de cultivos para el uso de académicos y científicos, extensionistas, educadores, y personas que formulan políticas agrícolas. Dentro de los sistemas más conocidos y utilizados en Latinoamérica está el conjunto de programas computacionales de modelación conocido como DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*), que ha sido adaptado y modificado numerosas veces para propósitos y cultivos específicos (Jones et al., 2003). El primer modelo desarrollado específicamente para frijol fue BEANGRO, un modelo escrito en FORTRAN y desarrollado con la participación activa de un fisiólogo del CIAT en Cali, Colombia, asegurando que incluía perspectivas de producción en zonas tropicales (Hoogenboom et al., 1993). BEANGRO fue diseñado con la misma filosofía de otros modelos en DSSAT: este simula el crecimiento del cultivo al nivel de finca desde la siembra hasta la madurez bajo distintos escenarios de prácticas agronómicas, suelos y variabilidad climática. El modelo responde a variables ambientales de radiación solar, temperatura,

precipitación, velocidad del viento, humedad relativa, y la capacidad del suelo a retener humedad, y permite definir caracteres del cultivo para estimar su contribución a la productividad-función que puede servir a mejoradores para diseñar cultivos para ambientes específicos de producción.

Posteriormente, el programa computacional CROPGRO fue introducido por los mismos autores de BEANGRO, como un módulo más genérico para leguminosas dentro del sistema modular DSSAT, basado en rutinas no sólo para frijol, sino para soya (*Glycine max*) y maní (*Arachis hypogaea*) (Boote *et al.*, 1998). Actualmente, el módulo CROPGRO puede simular el crecimiento de 7 leguminosas, incluyendo guandúl (*Cajanus cajan*), garbanzo (*Cicer arietinum*), caupí (*Vigna unguiculata*), haba (*Vicia faba*), además de soya, maní y frijol.

Al igual que en BEANGRO, el código de CROPGRO está en FORTRAN, con parámetros de la especie, el ecotipo y el cultivar de interés que se compilan en archivos separados (archivo SPE o de especies, archivo ECO o de ecotipo, y archivo CUL o de cultivar). En comparación con versiones anteriores, CROPGRO calcula fotosíntesis cada hora, con estimaciones más precisas de intercepción de luz, y con opciones para variar la evapotranspiración en función del déficit de presión de vapor (VPD) y de la concentración de CO₂. También agrega más opciones para nitrógeno (N) incluyendo balance de N, efectos de deficiencia de N sobre fotosíntesis y crecimiento, y fijación simbiótica de N y su interacción con disponibilidad de carbono (C). CROPGRO utiliza el módulo SPAM (*Soil-Plant-Atmosphere*) de DSSAT, que se fundamenta en varias opciones para el cálculo de la evapotranspiración (Penmann, Penmann-Monteith, Priestley-Taylor) y en el modelo de balance hídrico de “*tipping bucket*” de Ritchie (1998). En este sentido, es un avance con modificaciones enfocadas sobre la fisiología de las leguminosas. Además, CROPGRO incorpora la posibilidad de estimar los efectos ambientales en diferentes momentos del ciclo del cultivo.

CROPGRO ha tenido amplio uso en muchos países de Latinoamérica. Los usos incluyen calibración y evaluación en ambientes definidos por Acosta-Gallegos *et al.* (1996); Chaves de Oliveira (2007) caracterización ambiental como herramienta de mejoramiento genético Heinemann *et al.* (2016), evaluación del impacto del cambio climático Eitzinger *et al.* (2017); Álvarez *et al.* (2016), y el vínculo entre información genética y eco-fisiológica (Hoogenboom *et al.*, 1997); (Hwang *et al.*, 2017). Acosta-Gallegos *et al.* (1996) utilizaron el modelo CROPGRO para entender las distintas variaciones en cuanto a rendimiento, en ambientes de tierras altas en México. Estos autores pudieron asociar las reducciones en el rendimiento observadas en los experimentos con los resultados del modelo de simulación de forma satisfactoria.

Chaves de Oliveira (2007) se apoyó en el modelo CROPGRO utilizando ajustes en los parámetros genéticos derivados de datos experimentales de las variedades Pérola, Ouro Preto, y Ouro Vermelho para estimar fecha de siembra en condiciones del régimen local de lluvias y productividad. Los datos se obtuvieron de dos experimentos en condiciones de riego y uno en condiciones de secano. Después de la calibración del modelo, este se aplicó a la estimación de fenología y rendimientos por 31 años, entre 1975 y 2006. Los resultados sugieren que el modelo es altamente sensible a diferencias en coeficientes genéticos entre las tres variedades. El modelo estimó satisfactoriamente la fenología del cultivo en condiciones de suelo y clima. También estimó satisfactoriamente la productividad de Pérola y Ouro Preto con error cuadrático medio menor al 5%, y 12.6% para Ouro Vermelho.

Un estudio más reciente en el estado de Goiás en Brasil usó el modelo CROPGRO-DRYBEAN para clasificar ambientes de acuerdo a la intensidad y sincronía de la sequía, con el objetivo de proveer información de sitios y estreses típicos en la zona para definir objetivos de mejoramiento genético (Heinemann *et al.*, 2016). El estudio desarrolló parametrizaciones para dos cultivares de frijol (Pérola y BRS Radiante) bajo diversos ambientes de sequía. El análisis de (Heinemann *et al.*, 2016) reportó que el modelo representa bien el comportamiento del cultivo bajo sequía moderada (menor a 20 días), pero que presenta limitaciones al simular el comportamiento bajo sequía severa (de más de 1 mes). El estudio concluyó que las condiciones del estado de Goiás ameritan la consideración de la sequía dentro de los criterios de selección del programa de mejoramiento de frijol.

Otro estudio utilizó DSSAT-CROPGRO en un análisis ex ante para aislar el efecto de sequía en las pérdidas de rendimiento en 18 países de Latina América, 23 en África, y dos en el medio-oriente. Ese estudio estimó que los beneficios de la tolerancia a la sequía variaban mucho de país en país, pero en 72 % de los países habría un efecto positivo y significativo. En promedio la tolerancia a la sequía podría aportar un aumento en rendimiento de 24.7 % (Álvarez *et al.*, 2016).

El estudio de Eitzinger *et al.* (2017) usó el modelo CROPGRO-DRYBEAN para simular el impacto del cambio climático en los sistemas de producción de frijol en Centroamérica, una región reportada por la literatura como de alta vulnerabilidad (Beebe *et al.*, 2011). Dichos autores simularon el crecimiento y desarrollo del frijol en tres períodos distintos (siembras en primera, postrera y apante) que siguen el manejo típico de la región. Las observaciones sugieren que, en ausencia de adaptabilidad, el cambio climático podría bajar el rendimiento del frijol entre 10 y 50 % dependiendo del sitio y el período de siembra.

Aunque los modelos ofrecen orientación general al mejoramiento genético sobre el valor de caracteres, es todavía más útil si se puede aplicar un modelo para predecir el valor de genes específicos. Esto es porque al vincular directamente con el comportamiento eco-fisiológico de una variedad, se puede determinar el comportamiento variedades “virtuales” (con la presencia o ausencia de ciertos genes) en diversos ambientes o bajo condiciones de manejo particulares. Esto permite estimar de forma anticipada el potencial efecto de los esfuerzos de mejoramiento genético. Un esfuerzo creativo para modelar caracteres de frijol en base de genes conocidos empleó un modelo de siete genes para floración, hábito de crecimiento, y tamaño de grano (Ppd, Hr, Fin, Fd, Ssz-1, Ssz-2, and Ssz-3). El modelo logró explicar 75 % de la varianza en días a floración, 68 % en días a madurez, pero solo 11 % en rendimiento (Hoogenboom *et al.*, 1997). La ciencia de la genómica avanza, la manipulación de regiones del genoma para caracteres complejos es mucho más factible como herramienta del mejoramiento genético, sin que se necesario conocer los genes involucrados. El concepto fue extendido a genes definidos por “*quantitative trait loci*” (QTL) para caracteres de crecimiento del frijol en el campo. Analizando 187 líneas recombinantes derivadas de la cruce de dos cultivares de frijol, Jamapa x Calima, Hwang *et al.* (2017) desarrollaron un modelo que logro combinar la fecha a floración, tasa de producir nudos, y nudos en el tallo principal. A través de análisis genético usando modelos mixtos lineales, pudieron relacionar (QTL) con caracteres que reflejan el establecimiento del cultivo en el campo. La predicción del tiempo a floración presentó alta exactitud ($R^2=0.75$), igual que el número total de nudos en la fase de crecimiento lineal ($R^2=0.93$). El desempeño fue menor en el número final de nudos ($R^2=0.27$). Usando los mismos datos de las 187 líneas recombinantes Clavijo Michelangeli *et al.* (2014) emplearon CROPGRO para caracterizar el patrón de crecimiento de los dos padres (Jamapa y Calima) y tres de las progenies a través de muestreos en serie y combinado con predicciones basadas en los genotipos. Los valores de los parámetros reflejaron las diferencias genéticas de las líneas, y produjeron estimativos satisfactorios de crecimiento. Curiosamente, unos genotipos llegaron a la misma biomasa final, pero con distintos patrones de crecimiento. Estos estudios ofrecen evidencia sobre el potencial de CROPGRO para simular diferencias genotípicas, y por tanto contribuyen herramientas importantes para establecer direcciones concretas en los programas de mejoramiento de frijol. En la misma línea de entender la dinámica de la producción de área foliar del frijol para la fotosíntesis, se llevó a cabo un estudio en dos sitios en Colombia con seis genotipos usando tres hábitos de crecimiento: determinado arbustivo (Tipo I), indeterminado arbustivo (Tipo II) e indeterminado postrado (Tipo III) con dos genotipos

de cada hábito; y plantados en seis densidades, de 5, 10, 15, 20, 25 y 35 plantas por m². Se tomaron muestreos destructivos iniciando a los 14 días, inicialmente cada semana, y después cada dos semanas hasta terminar el ciclo. Se encontraron efectos significativos tanto para genotipo y para densidades en la producción de área foliar, pero no se detectó interacción de genotipo x densidad. Los modelos lograron predecir la formación de área foliar adecuadamente.

Un grupo de estudios adicionales reporta el uso de varios otros modelos aplicados al frijol. Dichos estudios usan modelos empíricos tanto para predecir la productividad como para predecir la distribución geográfica del frijol. Cota Oliveira *et al.* (2011) realizaron una comparación con cinco diferentes modelos empíricos (ecuación de Blackman, hipérbola rectangular, exponencial negativa, hipérbola no rectangular y uso eficiente de radiación), para explicar variación en rendimientos de frijol y maíz en diferentes regiones del estado de Minas Gerais, calculando el balance de carbono y así estimar rendimientos. Dichos autores encontraron más de 100% diferencia entre modelos (i.e. la desviación estándar es al menos el doble de la media) y concluyeron que se requiere cierto criterio para elegir el modelo apropiado.

El modelo EcoCrop ha sido empleado para varios análisis de frijol relacionado con idoneidad de hábitat y cambio climático (Beebe *et al.*, 2011). EcoCrop es un modelo de nicho que funciona de manera empírica con una distribución conocida de un cultivo, los rangos óptimos de temperatura y precipitación, y los extremos en los cuales la especie no se desarrolla satisfactoriamente (Ramirez-Villegas *et al.*, 2013). El modelo asume que, en un ambiente que presenta precipitaciones o temperaturas por fuera de los óptimos es marginal, mientras que, los ambientes con los dos parámetros que estén dentro del rango óptimo son aceptables para la especie. Como otros modelos, EcoCrop es de especial relevancia como modelo para estimar las áreas en las cuales, según las condiciones climáticas, el cultivo puede crecer satisfactoriamente. En este sentido, los resultados del modelo pueden emplearse para definir áreas vulnerables para intervenciones de adaptación, para estimar potenciales cambios en nichos geográficos y sus potenciales implicaciones en seguridad alimentaria y económica. Beebe *et al.* (2011) usaron EcoCrop para determinar las áreas aptas actuales y futuras para frijol a nivel global. El análisis indicó que, en ausencia de adaptación o mitigación, muchas áreas ya no serán propicias para la producción de frijol en las próximas décadas. El mismo estudio, sin embargo, encontró que el mejoramiento genético para tolerancia a la sequía podría ampliar el área de frijol en 35 %, y que una mejora en tolerar 2.5 C° más de temperatura podría ampliar el área para frijol en 60 %. (Medina-García *et*

al., 2016) y (Delgado Assad et al., 2016) adoptaron una metodología similar para México y Brasil, respectivamente, encontrando grandes reducciones en áreas cultivables para frijol en estos países. Aunque no enfocado en América Latina, un estudio llevado a cabo en el CIAT sobre frijol voluble comparó el modelo EcoCrop con otro modelo de nicho llamado MaxEnt (Taba et al., 2016). El propósito de ese estudio fue el de identificar otros ambientes propicios para la siembra de frijol voluble usando ambos modelos. El frijol voluble es nativo a los altos de Mesoamérica y los Andes, y está logrando amplia aceptabilidad en África. Aunque se ha cultivado frijol voluble en las montañas de África oriental por muchas generaciones, el CIAT introdujo volubles con adaptación a elevaciones de 1,400 a 1,800 m sobre el nivel del mar en los años 80. Estos frijoles han encontrado mucha aceptación en Ruanda, Burundi, el occidente de Uganda, y en Kenia central. Comparado con EcoCrop, MaxEnt predijo un área más restringida pero más de acuerdo con conocimiento local sobre áreas para la producción de frijol voluble. Ramirez-Cabral et al. (2016) realizaron un estudio similar al de Taba et al. (2016) y Beebe et al. (2011), pero con el modelo CLIMEX. Los hallazgos de ese estudio sugieren cambios importantes en la distribución del frijol a nivel global, especialmente en África y América Latina.

En los últimos años, se ha dedicado mayor atención al mejoramiento para tolerancia a la sequía en programas en México (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - INIFAP), Honduras (Escuela Agrícola Panamericana), Brasil (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA-CNPAP; Instituto Agronómico -IAC) y en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Por lo menos catorce variedades tolerantes a la sequía se han liberado en América Latina.

CONCLUSIONES

El frijol (*Phaseolus vulgaris*) es la leguminosa más importante en la dieta del latinoamericano, y es cultivado en sistemas muy diversos, desde la agricultura tradicional con mínimos insumos, hasta sistemas altamente tecnificados.

Está sujeto a múltiples factores bióticos y abióticos que limitan su rendimiento, y todos los estudios hasta la fecha sugieren que los cambios climáticos tendrán efectos fuertes y negativos sobre el cultivo.

El uso de la modelación puede predecir el comportamiento de los cultivos en condiciones específicas, y si será rentable o no, en cuanto a rendimiento se refiere.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA-GALLEGOS, J.A.; VARGAS-VAZQUEZ, P.; WHITE, J.W.: "Effect of sowing date on the

growth and seed yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in highland environments.", *Field Crops Research*, 49: 1-10, 1996.

ÁLVAREZ, P.; FISCHER, M.; GONZÁLEZ, C.; MASON-D'CROZ, D.; MORENO, P.; ROBERTSON, R.; RODRIGUEZ, J.; PRAGER, S.D.: "Technology of drought tolerant beans. A case study in the series: Ex-ante impact assessment of agricultural technologies in the global food system. González, C., Mason-D'Croz, D., Moreno, P., Robertson, R., Rodríguez, J., Prager, S.D.", 2016.

BEEBE, S.; J.RAMIREZ, A.; JARVIS, I.; M.RAO, G.; MOSQUERA, J.; BUENO, M.; BLAIR, M.W.: "Genetic improvement of common beans and the challenges of climate change", En: Singh Yadav, S.; Redden, R.; Hatfield, J.L.; Lotze-Campen, H. y Hal, A. (eds.), *Crop adaptation to climate change.*, pp. 356-369, 2011.

BEEBE, S.E.: "Common bean breeding in the tropics. *Plant Breeding Reviews*", 36: 357-426, 2012.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B.: "The CROPGRO model for grain legumes. En: Understanding Options for Agricultural Production", ser. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development, 7: 99-128, 1998.

CHAVES DE OLIVEIRA, E.: *Desempenho do modelo CROPGRO-Dry Bean em estimar data de semeadura e a produtividade do feijoeiro.*, Universidades Federal de Vicosa., 2007.

CLAVIJO MICHELANGELI, J.A.; KENNET KENNET, J.; JONES, J.W.; CORELL, M.; GEZAN, S.; BHAKTA, M.; ZHANG, L.; OSORNO, J.; RAO, I.M.; BEEBE, S.E.; ROMAN-PAOLI, E.O.; GONZALEZ, A.; BEAVER, J.; RICAURTE, J.; COLBERT, R.; CARVALHO, M.; VALLEJOS, C.E.: "Modeling genetic traits of five common bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes in multi-location trials", : 1, 2014.

COTA OLIVEIRA, L.J.; COSTA, L.C.; CHOHAKU SEDIYAMA, G.; MARQUES FERREIRA, W.P.; DE OLIVEIRA, M.J.: "Modelos de estimativa de produtividades potencial para as culturas do feijão e do milho. Engenharia na agricultura, Viçosa, Minas Gerais", 19: 304-319, 2011.

DELGADO ASSAD, E.; ARYEVERTON FORTES DE OLIVEIRA, A.; MASSARU NAKAI, A.; PAVÃO, E.; PELLEGRINO, G.; MONTEIRO, J.E.: "Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas. En: Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação", : 127-188, 2016.

EITZINGER, A.; LÄDERACH, P.; RODRIGUEZ, B.; FISHER, M.; BEEBE, S.; SONDER, K.;

- SCHMIDT, A.: "Assessing high-impact spots of climate change: spatial yield simulations with Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) model. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change", 22: 743-760, 2017, DOI: [10.1007/s11027-015-9696-2](https://doi.org/10.1007/s11027-015-9696-2).
- FAURE ALVAREZ, B.; BENÍTEZ GONZÁLEZ, R.; RODRÍGUEZ ACOSTA, E.; GRANDE MORALES, O.; TORRES MARTÍNEZ, M.; PÉREZ RODRÍGUEZ, P.: "Guía técnica para la producción de frijol común y maíz. La Habana, Cuba: Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical", 39, 2014.
- FREYTAG, G.F.; DEBOUCK, D.G.: "Freytag, G. F. and D. G. Debouck. 2002. Taxonomy, distribution and ecology of the genus Phaseolus (Leguminosae-Papilionoideae) in North America, Mexico and Central America. SIDA Botanical Miscell Miscellany", 23: 1-300, 2002.
- HEINEMANN, A.B.; RAMÍREZ VILLEGAS, J.; PESSOA OLIVEIRA DE SOUZA, T.L.; DIDONET, A.D.; STEFANO, J.G. di; BOOTE, K.J.; JARVIS, A.: "Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil", *Agricultural and Forest Meteorology*, 225: 57-74, Accepted: 2016-06-01T19:52:39Z, septiembre de 2016, ISSN: 0168-1923, DOI: [10.1016/j.agrformet.2016.05.010](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.010).
- HOOGENBOOM, G.; WHITE, J.W.; ACOSTA-GALLEGOS, J.; GAUDIÉL, R.G.; MYERS, J.R.; SILBERNAGEL, M.J.: "Evaluation of a crop simulation model that incorporates gene action. *Agronomy Journal*", 89: 613-620, 1997.
- HOOGENBOOM, G.; WHITE, J.W.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J.: "BEANGRO: A Process-Oriented Dry Bean Model with a Versatile User Interface. *Agronomy Journal*", 86: 182-190, 1993.
- HWANG, C.; CORRELL, M.J.; GEZAN, S.A.; ZHANG, L.; BHAKTA, M.S.; VALLEJOS, C.E.; BOOTE, K.J.; CLAVIJO-MICHELANGELI, J.A.; JONES, J.W.: "Hwang C., Correll M.J., Gezan S.A., Zhang L., Bhakta M.S., Vallejos C.E., Boote K.J., Clavijo-Michelangeli J.A., Jones J.W. 2017. Next generation crop models: A modular approach to model early vegetative and reproductive development of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L). *Agricultural Systems* 155: 225-239", 2017.
- JAY, O.: *Metodología para la comparación de tratamientos en modelos de regresión no lineal aplicados a procesos biológicos*, Instituto de Ciencia Animal, Tesis de Doctorado, 100 p., 2012.
- JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKENS, P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T.: "The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*", 18: 235-265, 2003.
- MEDINA-GARCÍA, G.; RUIZ-CORRAL, J.A.; RODRÍGUEZ-MORENO, V.M.; SORIA-RUIZ, J.; DÍAZ-PADILLA, G.; ZARAZÚA VILLASEÑOR, P.: "Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México.", 13: 2465-2474, 2016.
- RAMIREZ-CABRAL, N.Y.Z.; KUMAR, L.; TAYLOR, S.: "Crop niche modeling projects major shifts in common bean-growing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*", : 218-219, 102-113, 2016.
- RAMIREZ-VILLEGAS, J.; JARVIS, A.; LÄDERACH, P.: "Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*", 170: 67-78, 2013.
- RITCHIE, J.T.: "Soil water balance and plant stress.", En: Tsuji, G.Y.; Hoogenboom, G. y Thornton, P.K. (eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer, Dordrecht The Netherlands, pp. 41-54, 1998.
- ROSAS, J.C.: "El cultivo del frijol común en América Tropical. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana", 62, 2003.
- SERRANO, J.; GOÑI, I.: "Papel del frijol negro *Phaseolus vulgaris* en el estado nutricional de la población guatemalteca", 54: 36-44, 2004.
- TABA, G.; HYMAN, G.; MUSONI, A.; BEEBE, S.E.; RUBIANO, J.; CASTRO, F.; MUKANKUSI, C.; BURUCHARA, R.A.; RUBYOGO, J.C.: *A Strategy for Geographic Targeting of Climbing Bean Varieties and Practices in Africa. Presentación en The PanAfrican Grain Legume and World Cowpea Conference. Febrero 28-Marzo 2, 2016. Livingston, Zambia..*

René Florido-Bacallao, Investigador, Dirección Desarrollo, Proyectos y Colaboración. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. Carretera a Tapaste km 3.5 Gaveta Postal 1, CP 32 700. San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Tel. / Fax: (53) 86 3867. e-mail: florido@inca.edu.cu.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR: **Conceptualización:** A. Montesino, D. González. **Curación de datos:** Montesino, D. González. **Análisis formal:** Montesino, D. González. **Captación de fondos:** R. Florido. **Investigación:** A. Montesino, D. González, R. Florido. **Metodología:** A. Montesino. **Supervisión:** D. González, R. Florido. **Validación:** A. Montesino, D. González. **Roles/Writing, original draft:** A. Montesino, D. González. **Redacción–revisión y edición:** A. Montesino, D. González, R. Florido.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.