



## JRC TECHNICAL REPORTS

# Modelación del frijol en Latinoamérica

Estado del arte y base de datos para parametrización



**Autores:**

Steve Beebe  
Julian Ramirez-Villegas  
Patricia Álvarez  
Jaumer Ricaurte  
Andrea Mora  
Alberto F. Guerrero  
Juan Carlos Rosas  
Joysee M. Rodríguez Baide  
Maurits van den Berg



Centro Internacional de Agricultura Tropical  
*Desde 1967 Ciencia para cultivar el cambio*

Serie de Estudios Temáticos EUROCLIMA  
Acción de Modelación Biofísica de Cultivos

2017



EUR 29028 ES

This publication is a Technical report by the Joint Research Centre (JRC), the European Commission's science and knowledge service. It aims to provide evidence-based scientific support to the European policymaking process. The scientific output expressed does not imply a policy position of the European Commission nor of CIAT. The geographic borders presented in one or more of the figures, are purely a graphical representation and are only intended to be indicative. The boundaries do not necessarily reflect the official EC position nor of CIAT. Neither the European Commission, nor CIAT nor any person acting on behalf of the Commission or CIAT is responsible for the use that might be made of this publication.

**JRC Science Hub**

<https://ec.europa.eu/jrc>

JRC110112

EUR29028 ES

PDF	ISBN 978-92-79-77340-2	ISSN 1831-9424	doi:10.2760/325955
-----	------------------------	----------------	--------------------

---

Print	ISBN 978-92-79-77339-6	ISSN 1018-5593	doi:10.2760/510930
-------	------------------------	----------------	--------------------

Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017

© European Union, 2017

Reuse is authorised provided the source is acknowledged. The reuse policy of European Commission documents is regulated by Decision 2011/833/EU (OJ L 330, 14.12.2011, p. 39).

For any use or reproduction of photos or other material that is not under the EU copyright, permission must be sought directly from the copyright holders.

How to cite this report: Beebe S, Ramirez-Villegas J, Alvarez P, Ricaurte J, Mora A, Guerrero AF, Rosas JC, Rodríguez Baide JM, van den Berg M. *Modelación del frijol en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización*, EUR 29028 ES, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-77340-2, doi:10.2760/325955, JRC110112.

All images © European Union 2017, except 3 pictures in front page, property of Neil Palmer/CIAT; figure 1 (page 16), property of Crop Science Society of America, on page i the logo of Escuela Agrícola Panamericana, Universidad Zamorano property of Escuela Agrícola Panamericana, Universidad Zamorano, and on the front page the CIAT logo, which is the property of CIAT.

# Modelación del frijol en Latinoamérica: Estado del arte y base de datos para parametrización

Steve Beebe, Julian Ramirez-Villegas, Patricia Álvarez, Jaumer Ricaurte, Andrea Mora,  
Alberto F. Guerrero (CIAT)

Juan Carlos Rosas (Escuela Agrícola Panamericana, Universidad Zamorano)

Joysee M. Rodríguez Baide, Maurits van den Berg (Joint Research Center)

**Institución colaboradora**



Escuela Agrícola Panamericana,  
Universidad Zamorano.  
Honduras

## Tabla de contenidos

Prefacio .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Resumen ejecutivo .....	1
Executive summary .....	2
1. Introducción .....	3
2. El estado del arte de la modelación de frijol en Latinoamérica .....	5
3. Métodos de levantamiento de información .....	11
4. Cobertura geográfica de estudios sobre frijol .....	14
5. Sistemas de producción de frijol en Latinoamérica.....	17
6. Análisis de caso de los estudios de modelación y agronómicos .....	21
7. Índices agro-fisiológicos: fenología, crecimiento de área foliar; materia seca; índice de cosecha.....	29
8. Conclusiones generales .....	41
9. Uso y acceso de la información .....	42
10. Referencias bibliográficas.....	43
Lista de figuras .....	51
Lista de tablas .....	52

## Prefacio

EUROCLIMA es un programa de cooperación regional entre la Unión Europea y América Latina enfocado en el cambio climático y financiado por el Directorado General para la Cooperación Internacional y el Desarrollo (DG DEVCO G/2) de la Comisión Europea ([www.euroclima.org](http://www.euroclima.org)). Su objetivo es facilitar la integración de las estrategias de mitigación y adaptación ante el cambio climático en las políticas y planes de desarrollo en América Latina.

El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) ([www.ciat.cgiar.org](http://www.ciat.cgiar.org))—un Centro de Investigación de CGIAR ([www.cgiar.org](http://www.cgiar.org))— desarrolla tecnologías, métodos innovadores y nuevos conocimientos que contribuyen a que los agricultores, en especial los de escasos recursos, logren una agricultura eco-eficiente —es decir, competitiva y rentable, así como sostenible y resiliente. Con su sede principal cerca de Cali, Colombia, el CIAT realiza investigación orientada al desarrollo en las regiones tropicales de América Latina, África y Asia.

Este informe se llevó a cabo dentro del marco de la segunda fase de EUROCLIMA, dentro del componente tres: Agricultura Sostenible, Seguridad Alimentaria y Cambio Climático; y forma parte de las actividades de desarrollo, investigación, creación de capacidad y aplicación de modelación biofísica, coordinadas por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea.

Este informe responde a una de las necesidades identificadas durante los talleres e interacciones con científicos latinoamericanos en cuanto a la falta de información y datos específicos disponibles para calibración de modelos, de los cultivos principales para la región, como es el caso del frijol. El objetivo principal de este trabajo fue: producir una base de datos con información específica para el contexto LAC, que permita la calibración y parametrización regional de modelos de cultivo de frijol. Este informe es parte de una serie de documentos similares sobre: papa, maíz, trigo, arroz, soja, caña de azúcar y café.

## **Agradecimientos**

Se agradece a todos los profesionales en el presente estudio quienes contribuyeron con sus datos y a las instituciones que cobijaron e impulsaron los trabajos de investigación.

Agradecemos al Programa de Investigación del CGIAR en Cambio Climático, Agricultura y Seguridad Alimentaria (CCAFS).

También agradecemos al Programa de Investigaciones en Frijol de la Escuela Agrícola Panamericana/Universidad Zamorano (Honduras) por la gestión de los datos en Centroamérica.

## Resumen ejecutivo

Frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa de grano para consumo humano de mayor producción en el mundo, y es nativo de las Américas, donde juega un papel importante en la dieta. Los ambientes donde se cultiva el frijol varían desde zonas tropicales hasta alta montaña, con diversos hábitos de crecimiento (arbustivo determinado, arbustivo indeterminado, y voluble), y en sistemas de producción desde los tradicionales hasta los altamente tecnificados. Los esfuerzos en modelaje, por tanto, 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. Se llevó a cabo una revisión de literatura para identificar quince ejercicios de modelaje ejecutados en América Latina, abarcando 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. Estos 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.



## Executive summary

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is the grain legume of greatest volume of production for direct human consumption, and is native to the Americas where it plays an important role in the diet of consumers. Bean is cultivated in environments from lowland tropical areas to high mountainous zones; with growth habits ranging from determinate bush, to indeterminate bush, to climbing types; and in production systems varying from traditional low input agriculture to highly technified systems. As such, efforts at modelling should focus on a specific plant type and production system. Bean is very sensitive to abiotic stress, a fact that has motivated modelling of its response in light of the dangers of climate change. A review of literature was carried out revealing fifteen studies in Latin America considering different aspects of plant growth (rates of node and leaf area production), phenology, and yield. Models employed include EcoCrop, CROPGRO (a module within the DSSAT cropping system model), and in one instance each, Maxent and CLIMEX. Three studies in particular are detailed: in the two countries of greatest production in the world (Brazil and Mexico), and one study in Central America as a region under direct threat of climate change. These three studies confirm that bean productivity will likely suffer severe negative effects in the course of the 21<sup>st</sup> century, as a result of climate change. A recent effort has compiled data from historical yield trials in Latin America as a resource for future modelling efforts.

## 1. Introducción

Importancia regional del frijol: El frijol (*Phaseolus vulgaris* L), también conocido localmente como fríjol, fréjol, frisol, poroto y caraota, es la leguminosa de grano de mayor importancia en América Latina y en el mundo. América Latina aporta aproximadamente 50% de la producción mundial, y de esta producción regional, Brasil aporta la mitad. Como otras leguminosas de grano para consumo humano, el frijol aporta proteínas y minerales a la dieta, con un perfil de aminoácidos complementario al de los cereales principales como el maíz, trigo, arroz y cebada. El frijol se clasifica comercialmente en clases muy definidas por color, tamaño y forma, de las cuales por lo menos una docena son importantes en el mercado. El frijol se siembra frecuentemente en rotación con cereales, especialmente maíz, en sistemas bien sea como frijol voluble en tierras altas encima de 1500 m sobre el nivel de mar, o como frijol arbustivo entre surcos del maíz. Como otras leguminosas, el frijol fija nitrógeno y hace un aporte al estado nutricional del sistema productivo. En particular, el frijol voluble puede fijar hasta 90 kg de N por hectárea debido a su mayor biomasa y vigor comparado con el frijol arbustivo.

Biología: El género *Phaseolus* es de origen neotropical, y el ancestro silvestre del frijol común 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 (Freytag y Debouck, 2002). Este ambiente típicamente se encuentra entre 1500 y 2200 m sobre nivel de mar, se caracteriza por temperaturas moderadas, con épocas marcadas de abundante lluvia alternando anualmente con sequía. El suelo en este ambiente, aunque no es de la mejor calidad, tampoco sufre problemas serios debido al buen contenido de materia orgánica. Por lo tanto, el ancestro del frijol cultivado evolucionó sin mayores limitantes climáticos ni de suelo. Más bien, a raíz de la competencia de la vegetación circundante en el ambiente de bosque pre-montano, el limitante mayor podría haber sido la radiación solar disponible, llevando al silvestre a trepar vigorosamente para competir con arbustos y pequeños árboles. Dado este patrón de evolución, la especie no está inherentemente adaptada al estrés abiótico de sequía, altas temperaturas, y/o 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.

Programas de mejoramiento: Los factores que influyen en rendimientos del frijol fueron revisados por Beebe (2012). Aunque las plagas y enfermedades, especialmente las fungosas, son factores limitantes al frijol, los factores más importantes en muchas zonas de producción son precisamente aquellos para los cuales la especie no fue preparada en su estado silvestre: sequía, altas temperaturas, deficiencia de fósforo (P), y en unas zonas, la toxicidad de aluminio y/o manganeso. Por tanto, muchos programas de mejoramiento genético de frijol se dedican a aliviar dichas limitantes. Entre las enfermedades y sus organismos causales se encuentran la antracnosis (*Colletotrichum lindemutheanum*), la mancha angular (*Pseudocercospora griseola*), y la roya (*Uromyces appendiculatus*), mientras las plagas incluyen la chicharrita o lorito verde (*Empoasca kraemerii*) y el picudo de la vaina (*Apion godmani*). En años recientes, 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 Agropecuaria – EMBRAPA-CNPAP; Instituto Agrônômico –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.

## 2. El estado del arte de la modelación de frijol en Latinoamérica

Desde los años 80 se han desarrollado 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: simula el crecimiento del cultivo al nivel de finca desde siembra hasta madurez bajo diferentes escenarios de prácticas agronómicas, suelos y variabilidad climática. El modelo responde a variables ambientales de temperatura, radiación solar, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, 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 tiene la capacidad para 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. Como 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 CO<sub>2</sub>. 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 (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) usaron el modelo CROPGRO para entender las variaciones en rendimiento en ambientes de tierras altas en México. Estos autores satisfactoriamente lograron asociar las reducciones en el rendimiento observadas en los experimentos con los resultados del modelo de simulación.

Chaves de Oliviera (2007) empleó 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 (rainfed) y productividad. Los datos se obtuvieron de dos experimentos en condiciones de riego y uno en condiciones de secano. Después de calibrar el 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).

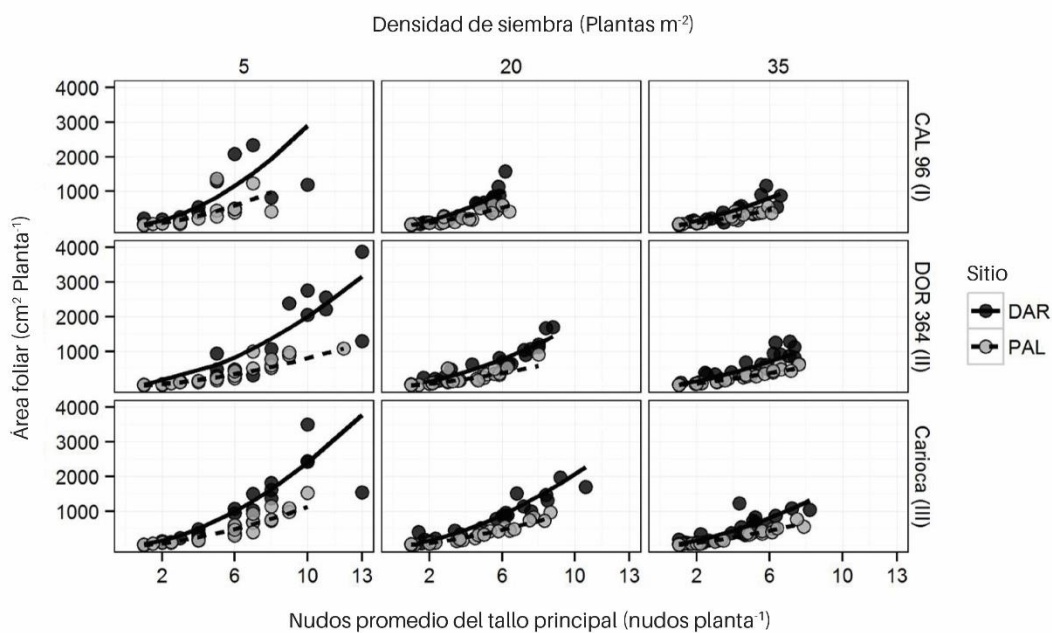
El estudio de Eitzinger et al. (2017) usó el modelo CROPGRO-DRYBEAN para simular el impacto del cambio climático en los sistemas de producción de frijol en Centroamérica, una región reportada por la literatura como de alta vulnerabilidad (Beebe et al. 2011). Estos autores simularon el crecimiento y desarrollo del frijol en tres períodos distintos (siembras en primera, postrera y apante) que siguen el manejo típico de la región. Los hallazgos sugieren que, en ausencia de adaptación, el cambio climático podría reducir los rendimientos 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). En cuanto la ciencia de la genómica avanza, la manipulación de regiones del genoma para caracteres complejos se vuelve más factible como herramienta del mejoramiento genético, sin necesariamente conocer los genes involucrados. Así que 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 combinó la tasa de producir nudos, fecha a floración, y nudos en el tallo principal. A través de análisis genético usando modelos mixtos lineales, pudieron relacionar QTLs con estos 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  $m^{-2}$  (Ricaurte et al., 2016a). 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 (Figura 1).

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) compararon cinco diferentes modelos empíricos (ecuación de Blackman, hipérbolo rectangular, exponencial negativa, hipérbolo 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. Estos 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.



**Figura 1.** Área foliar como función de número de nudos para tres genotipos de frijol común cultivado a 5, 20 y 35 plantas m<sup>-2</sup> y en dos sitios (Palmira=PAL; Darién=DAR). Los círculos representan valores observados, mientras las líneas representan valores predichos (Tomado de Ricaurte et al., 2016a).

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 un ambiente que presenta temperaturas o precipitación por



fuera de los óptimos es marginal, mientras los ambientes con los dos parámetros dentro del rango óptimo son aceptables para la especie. Como otros modelos de nicho, EcoCrop es de especial relevancia como modelo para estimar las áreas en las cuales, de acuerdo a las condiciones climáticas, el cultivo puede crecer satisfactoriamente. En este sentido, los resultados del modelo pueden usarse 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 reducciones grandes 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.

### 3. Métodos de levantamiento de información

La información anterior fue recopilada de una investigación en línea de literatura disponible, mientras un esfuerzo adicional fue hecho para Centroamérica. Como primera medida, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre modelaje en frijol en América Latina, a través de los motores de búsqueda Google y Google Scholar, usando palabras clave tales como “América Latina”, “frijol”, “modelaje”, “simulación”, tanto en Inglés, como en Español y Portugués. Se adicionaron estudios no identificados por estas búsquedas con base en el conocimiento de los autores del presente reporte, incluyendo estudios que, sin ser de modelaje, tuviesen datos eco-fisiológicos que pudiesen ser usados para modelaje. Se leyó en detalle el resumen (*abstract*) de cada uno de los estudios identificados para determinar su relevancia respecto a modelaje de frijol en América Latina. Hecho esto, se procedió a resumir el objetivo y hallazgos de cada estudio para el presente reporte. Para aquellos estudios que fuera posible, se recopilaron datos de ensayos experimentales; estos se presentan aquí.

Adicionalmente a lo anterior, se realizó un esfuerzo de recopilación datos para Centroamérica. Esta es una región bajo amenaza directa de cambio climático (ver la sección referente al estudio de Eitzinger et al. 2017 abajo). Para facilitar futuros análisis de modelaje, se recopilaron datos de ensayos regionales de frijol en Centroamérica, tanto de rendimiento como de respuesta a enfermedades, con el propósito de establecer una base de datos para un ejercicio posterior de modelaje. El proceso de recolección de la información, fue ejecutado en Zamorano-Honduras, lugar donde se centraliza la información. La información que se recopiló pertenece a los VIVEROS DE ADAPTACIÓN CENTROAMERICANOS (VIDAC) y a ENSAYOS CENTROAMERICANOS DE ADAPTACION Y RENDIMIENTO (ECAR), y fue contribuida originalmente por los socios en una red regional de investigación en frijol. El diseño de los ECAR es bloques completamente al azar (BCA) y tiene 3 repeticiones, mientras los de VIDAC no tienen repeticiones. Se obtuvo información desde 1999 al 2015, la cual se encontraba en 2 formas: 1) No digitalizada, en papel. 2) Digitalizada en archivos (Excel). El ejercicio se llevó a cabo en siguiente manera:

1. Revisión de que archivos estaban digitales y cuáles no, comparando con los libros de campo.
2. Digitalización de la información que estaba en papel.

3. Organización de la información de los ensayos en un solo archivo por cada año.

Cada archivo cuenta con 2 hojas, una de Metadata y otra con los datos. Para la obtención de la Metadata se buscó tanto en papel como en archivos digitales y como último recurso se contactó a los encargados de los ensayos. Para la construcción de la hoja de datos se definieron unos caracteres que son comunes en todos los ensayos y que son de interés para alimentar un ejercicio de modelaje. En la definición de los caracteres se tuvo en cuenta la ontología de frijol establecida por el CIAT(<http://www.croponontology.org/>).

El promedio de viveros VIDAC es de 15 por año, y de 20 por año para los ECAR. Estos ensayos y viveros se sembraron en los siguientes países (aunque algunos países no reportaron datos en algunos años): Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Puerto Rico. Las variables disponibles incluyen las citadas a continuación. Las abreviaturas entre paréntesis son nombres de caracteres utilizados en la ontología de frijol establecida por CIAT. Es importante resaltar que aunque este esfuerzo de recuperación de datos ha sido sustancial y proveerá una base fundamental para estudios de modelaje en Centroamérica, los datos reportados son los tomados rutinariamente en los ensayos agronómicos, y estos no incluyen variables netamente fisiológicas como el área foliar, el peso de órganos individuales de la planta, o los componentes del rendimiento.

- Descripción del ensayo: Localidad, país, año, ciclo, diseño del ensayo, número de materiales estudiados en cada ensayo, replicaciones, fecha de siembra, fecha de cosecha, tamaño de la parcela.
- Datos de desarrollo y crecimiento: Días a floración (DF), Días a madurez fisiológica (DPM), Días a cosecha (DAC), rendimiento por parcela (GMPLOT), rendimiento por hectárea (YDHA), plantas cosechadas por parcela (PLPLOT), porcentaje de humedad (POM), pedigrí.
- Datos de reacción a enfermedades: Virus del mosaico dorado amarillo (BGYMVF), mustia hilachosa (WBF), bacteriosis (CBBFL), mancha angular (ALSF), antracnosis (ANTF). Los datos sobre síntomas foliares causados por estas enfermedades se tomaron usando escalas estandarizadas para las enfermedades.

Algunos datos fueron obtenidos de ensayos para caracteres específicos como el ERMUS (ensayos regionales de mustia), el ERMAN (ensayos regionales de mancha angular), y viveros para estreses abióticos (de sequía y de altas temperaturas).

#### 4. Cobertura geográfica de estudios sobre frijol

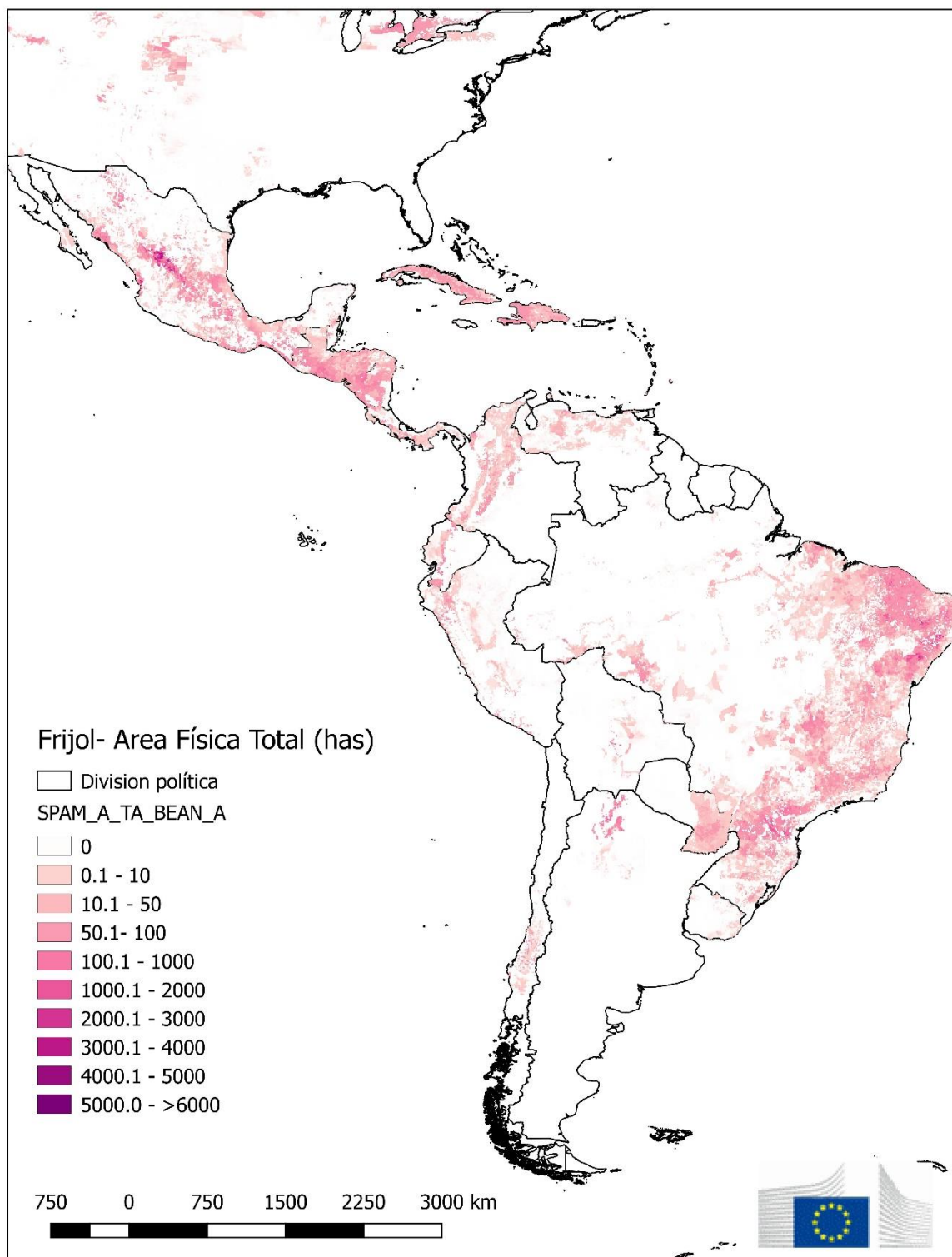
Los datos de área, producción y rendimiento resumidos por FAO para el año 2014 aparecen en el Cuadro 1. Claramente, Brasil es el mayor productor del frijol en el hemisferio con más de 3 millones de hectáreas sembradas y 3 millones de toneladas cosechadas. Sigue México con aproximadamente la mitad de área en frijol, pero con rendimientos más bajos, para una producción de 1,27 millones de toneladas. En términos de área, siguen Argentina, Guatemala y Nicaragua. Pero en términos de agroecologías, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica forman una región con cierta coherencia interna, junto con el sur de México y partes del Caribe. Esta región representa casi un millón de hectáreas. El altiplano seco de México representa otro millón de hectáreas, mientras Brasil presenta un millón o más de hectáreas en el noreste seco bajo agricultura tradicional con mínimos insumos, y otra área amplia con diferentes niveles de manejo tecnológico. El agrupamiento de áreas de producción por ambientes agroecológicos sería importante para enfocar un ejercicio de modelaje.

La distribución geográfica del cultivo de frijol en la región de América Latina y Caribe según el tamaño del área total cosechada anualmente se presenta en la Figura 2. En el mapa es evidente que en Centroamérica y Caribe, aunque las áreas de producción son menores a las de México y Brasil, el cultivo está presente en buena parte del territorio ya que es predominante entre los productores de pequeña escala como cultivo de subsistencia, el cual es una importante fuente de proteína para la población rural.

Los estudios encontrados, de una u otra manera, incluyen la totalidad de los países de América Latina en los que se produce frijol. Por ejemplo, los estudios de Beebe et al. (2011), y Ramirez-Cabral et al. (2016) son globales, y por tanto cubren toda América Latina. Por otra parte, el estudio de Eitzinger et al. (2017) cubre todo el corredor de Centroamérica. Heinemann et al. (2016), Chaves de Oliveira (2007), Cota Oliveira (2011), y Delgado-Assad et al. (2016) son exclusivos de una o más regiones de Brasil, en tanto que Medina-García et al. (2016) se enfoca únicamente en México. Acosta-Gallegos et al. (1996) y Hwang et al. (2017), se enfocan en sitios específicos de algunos países de la región.

**Cuadro 1: Área, rendimiento y producción total en países de América Latina y del Caribe. FAOSTAT, accedido 26 diciembre 2016.**

<b>País</b>	<b>Área cosechada (ha)</b>	<b>Rendimiento (kg / ha)</b>	<b>Producción (toneladas)</b>
Argentina	350.150	1.228	429.832
Belice	8.837	799	7.063
Bolivia	69.741	989	68.984
Brasil	3'185.745	1.034	3'294.586
Chile	14.670	1.234	18.095
Colombia	121.698	1.225	149.112
Costa Rica	20.970	777	16.295
Cuba	129.911	1.043	135.545
Ecuador	26.600	472	12.550
El Salvador	121.477	994	120795
Guatemala	250.414	939	235.029
Haití	156.276	644	100.613
Honduras	132.659	798	105.812
Jamaica	136	1.015	138
México	1'680.897	758	1'273.957
Nicaragua	237.230	774	183.600
Panamá	8.350	513	4.282
Paraguay	70.000	830	58.100
Perú	76.770	1.166	89.517
República Dominicana	40.231	928	37.346
Uruguay	5.100	628	3.200
Venezuela	17.225	784	13.501



**Figura 2. Distribución del cultivo de frijol según el área total por celda de cuadrícula de 10×10 km de resolución. Fuente: JRC con datos de SPAM por You et. al. (2016).**

## 5. Sistemas de producción de frijol en Latinoamérica

Un informe del Banco Mundial (World Bank, 2008) clasificó al grado de desarrollo de los países del mundo en tres fases según la proporción de la economía derivada de la agricultura. En economías de subsistencia (la primera fase) la agricultura es la actividad más importante y se enfoca en alimentos básicos. En la segunda fase, las economías en transición derivan 20 % o menos de su economía de la agricultura, aunque su producción agrícola sea mayormente de alimentos básicos. Países con economías en la tercera fase de desarrollo son principalmente urbanizados y su agricultura representa apenas 6 % del producto interno bruto. En América Latina hay gran diversidad de desarrollo entre países y se encuentran las tres modalidades (Beebe, 2012).

Los sistemas de producción de frijol siguen el mismo patrón del estado económico general de cada país, con diferentes niveles de manejo que son relevantes para el modelaje. En la **agricultura de subsistencia** de la primera fase hay mínimo uso de insumos y el cultivo está seriamente limitado por los problemas edáficos, especialmente bajo niveles de fósforo y nitrógeno, y ocasionalmente por ataques de enfermedades. En relación al manejo de la sequía, las opciones para riego son muy limitadas, aunque se promueven proyectos de cosecha de agua en Nicaragua y Honduras. En regiones con patrón de lluvia bimodal, es frecuente que el frijol se siembre en asociación o en rotación con maíz. Pero aún en las economías más rudimentarias, los productores venden cualquier excedente sobre sus necesidades domésticas, así que el autoconsumo que define la subsistencia no excluye la actividad de mercadeo. Haití, Honduras y Nicaragua tienen muchos productores de subsistencia y una gran proporción de la población ocupada en producción agrícola. En los **países en transición** de la segunda fase como Costa Rica y países la zona andina el uso de insumos ya es rutinario entre muchos productores, al punto de sufrir las consecuencias ambientales (e.g. polución de acuíferos) del abuso de pesticidas. Por ejemplo, en Colombia es común encontrar a los productores realizando aplicaciones de agroquímicos semanalmente contra las plagas y enfermedades fungosas en la producción de frijol voluble.

La producción de frijol con **alta tecnología** existe en países en la tercera fase de desarrollo. Estos incluyen Brasil, Chile, México y Argentina. En Brasil aproximadamente el 5 % del área de frijol se produce en sistemas de riego por pivote



central, representando un 15 % de la producción, mientras en México la siembra en la costa pacífica varía entre 100,000 y 150,000 ha. En estos sistemas, tanto la siembra como la cosecha están totalmente mecanizadas y el frijol se maneja como elemento de mercado. Una característica de la producción tecnificada en estos países es que se realiza fuera de época con relación a los ciclos de producción más importantes en cada país. En la costa de México y en Brasil el frijol de alta tecnología es un cultivo bajo riego en la época más fresca del año (octubre a febrero en México; mayo a agosto en Brasil), y en Argentina la producción para el mercado de Brasil y de países del norte ocurre unos meses después, entre Enero y Mayo. Así que los productores pueden ajustar su área de siembra del frijol en relación a otros cultivos, según pronósticos de cosecha y precios en otros países. Por ejemplo, en México el frijol en la costa pacífica compite por área de siembra con cultivos de hortalizas, y en Argentina la soya es una opción. El Cuadro 2 presenta un resumen general de las características de sistemas de producción por país.

La clasificación en tres mundos de la agricultura descrita arriba suele simplificar la realidad de la producción del frijol. Aún dentro de los países más desarrollados, en el sur de México y en el noreste de Brasil hay poblaciones significativas que practican la agricultura de subsistencia, contribuyendo a la complejidad del cuadro de producción de frijol en América Latina. Y mientras la mayor parte de frijol sembrado hoy día es de hábito arbustivo, el frijol voluble persiste en nichos en las tierras altas de México y Guatemala, y en Colombia, Ecuador y Perú, en parte debido a los granos de mayor tamaño y valor comercial. La diversidad en el cultivo de frijol es un reto particular para modelaje, aunque para casi todos los productores, grandes y pequeños, el mercado determina en gran parte lo que prefieren sembrar. Sin embargo, diferentes sistemas tienen diferentes limitantes y factores que son determinantes en el rendimiento. Otro reto es el papel preponderante de los factores edáficos en los rendimientos del frijol. Los mapas de suelo frecuentemente no tienen relación con la fertilidad, y una cuantificación geográfica del estrés por deficiencia de nutrientes es siempre muy aproximada. En esta realidad es necesario enfocarse en un ambiente o sistema de producción en particular como objetivo del modelaje.

**Cuadro 2: Sistemas de producción, tipos de grano, hábitos de planta y fechas de siembra que predominan en países y regiones de Latina América.**

País	Región dentro del país	Sistemas	Principales tipos de grano	Hábito de crecimiento*	Fechas de siembra
México	Altiplano	Semi-tecnificado	Pinto; flor de mayo; flor de junio	III	Junio
	Sur	Subsistencia	Negro	II-III	Mayo; octubre
	Costa	Tecnificado	Amarillo mediano	I	Octubre
Guatemala	Altiplano	Subsistencia	Negro pequeño	II-III	Abril-junio
	Tropical	Subsistencia	Negro pequeño	II	Mayo; septiembre; noviembre
Honduras	Tropical	Subsistencia	Rojo pequeño	II-III	Mayo; septiembre
El Salvador	Tropical	Subsistencia	Rojo pequeño	II-III	Mayo; septiembre
Nicaragua	Tropical	Subsistencia	Rojo pequeño	II-III	Mayo; septiembre; noviembre
Costa Rica	Tropical	Semi-tecnificado	Negro pequeño; rojo pequeño	II	Mayo; septiembre
Colombia	Clima frío	Semi-tecnificado	Rojo grande; rojo moteado; crema rayado	IV	Abril; septiembre-octubre
	Clima medio	Semi-tecnificado	Rojo; rojo moteado	I	Abril; septiembre-octubre
Ecuador	Clima frío	Semi-tecnificado	Varios	IV	Abril; septiembre-octubre
	Clima medio	Semi-tecnificado	Rojo; rojo moteado	I	Abril; septiembre-octubre
Perú	Clima frío	Subsistencia	Varios	IV	Abril; septiembre-octubre

País	Región dentro del país	Sistemas	Principales tipos de grano	Hábito de crecimiento*	Fechas de siembra
Perú	Costa	Semi-tecnificado	Blanco; Amarillo mediano	I-III	Abril; septiembre-octubre
Chile	Centro	Tecnificado	Gris; crema rayado	III	Septiembre-octubre
Brasil	Noreste	Subsistencia	Crema; crema rayado	II-III	Marzo-abril
	Centro	Semi-tecnificado	Crema rayado	II-III	Septiembre-octubre; febrero-marzo
	Centro	Tecnificado	Crema rayado	II-III	Mayo-julio
	Sur	Semi-tecnificado	Negro	II	Septiembre-octubre; febrero-marzo

\*Hábitos: I determinado; II indeterminado erecto; III indeterminado postrado; IV voluble.

## 6. Análisis de caso de los estudios de modelación y agronómicos

Citamos cuatro estudios de modelaje en América Latina que tienen un valor particular por sus características.

*Evaluación de áreas de alto impacto del cambio climático: simulaciones espaciales de rendimiento con el modelo DSSAT (Assessing high-impact spots of climate change: spatial yield simulations with Decision Support System for Agrotechnology Transfer [DSSAT] model; Eitzinger et al. 2017)*

La agricultura tradicional en Centroamérica entre Guatemala y Costa Rica está concentrada en el lado occidental del istmo. Desde el oriente de Guatemala hasta el centro-sur de Nicaragua, se extiende el llamado “corredor seco” donde se concentra la mayor parte de la pobreza aguda en la región y donde el cambio climático puede tener su mayor impacto (IPCC, 2014; Wheeler et al. 2013).

Modelos de cambio climático concuerdan que Centroamérica y hasta una buena parte de México ha de volverse más seco, especialmente en años del fenómeno de El Niño al cual la región está directamente expuesta (Collins et al. 2013; Iizumi et al. 2014; Field et al. 2012). Además, esta es una parte del mundo frijolero que, en ausencia de medidas de mitigación, estará sujeta a estrés por altas temperaturas al corto plazo (Cuadro 3). Por tanto, la región de Centroamérica y el sur de México es un “hot spot” donde los efectos de cambio climático se han proyectado fuertes y al corto plazo.

**Cuadro 3: Área en producción de frijol en países seleccionados en América Latina que estará sujeto al estrés de altas temperaturas de 25°C o más en 2030. (Datos no publicados del CIAT)**

País	Área (ha) con $\geq 25^{\circ}\text{C}$	Área total de frijol (ha)	Porcentaje del total por país
Nicaragua	148.836	219.582	68%
Haití	20.245	50.029	40%
Brasil	1'200.000	3'948.963	30%
Honduras	26.983	102.914	26%
Guatemala	15.809	127.698	12%
México	197.263	1'636.509	12%

Un estudio llevado a cabo en el CIAT investigó la vulnerabilidad de la producción de frijol en el corredor seco, para identificar nichos donde habrán opciones de adaptarse, y otros de mayor peligro al cultivo donde habrá que buscar alternativas productivas (Eitzinger et al., 2017). Además, este estudio se distingue de otros por considerar los

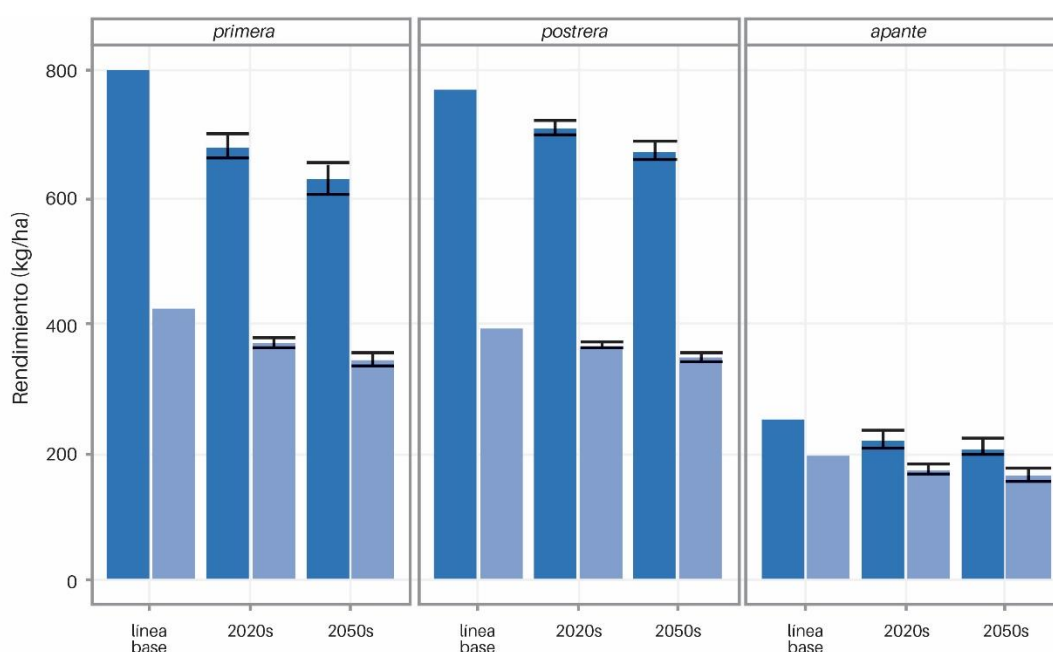
factores de fertilidad del suelo. Una gran parte de los suelos en esta zona son degradados con baja fertilidad. El frijol es particularmente sensible a problemas edáficos, y las deficiencias nutricionales resultan en un pobre desarrollo de sistema radicular y por tanto mayor susceptibilidad a la sequía (Beebe et al., 2011).

El estudio realizó simulaciones para dos variedades representativas de la variabilidad genética en la región: ICTA Ostua (semilla negra), y BAT1289 (una línea de mejoramiento con semilla roja), considerando dos tipos de suelo representativos (franco limoso y franco arenoso) y dos regímenes de fertilización (128 y 64 kg ha<sup>-1</sup> aplicados como urea). El primer régimen de fertilización es indicador de rendimientos potenciales, en tanto que el segundo es el manejo promedio de los agricultores en la región. Los resultados del estudio indicaron que la parte alta de Guatemala posiblemente verá aumentos en productividad potencial debido a temperaturas mayores, mientras el corredor seco tendrá grandes problemas (Eitzinger et al., 2017). En Nicaragua la mayor pérdida porcentual en rendimiento ocurre en los departamentos de Granada (-38 %) y Carazo (-25 %). Los departamentos en el centro del país mantendrán sus niveles de productividad, o inclusive podrían incrementar. El Salvador y la parte central de Honduras sufren menos (-10% a -14%) mientras Choluteca en la costa pacífica perderá grandemente (-32%). Como es de esperar, la tendencia a la reducción de la productividad continuará con el avance del siglo (Figura 3).

Al considerar el efecto de fertilización (Figura 3), se observa que la aplicación de fertilizante puede proteger el cultivo en cierto grado contra los efectos de la sequía. Si bien la sequía todavía resulta en pérdidas y se nota una disminución en los rendimientos promedio a medida que avanza el Siglo XXI independientemente del nivel de fertilización, la productividad es casi el doble comparado con el tratamiento sin fertilización, y todavía es aceptable y dentro de los niveles normales para la región. Este resultado es contra-intuitivo según perspectivas de antaño cuando se consideraba que la respuesta al fertilizante sería inadecuada en época de sequía. Al contrario, de acuerdo con los resultados de modelaje, un buen manejo de suelo y de la fertilidad debe ser un componente de una estrategia para hacer frente al cambio climático. La fertilización podría estar contribuyendo a un desarrollo mayor del sistema radicular que da mejor acceso a humedad del suelo, pero esto queda por confirmar. Además, algunas líneas mejoradas de frijol demuestran tolerancia al estrés

múltiple de sequía y bajos niveles de fósforo, y se debe caracterizar sus mecanismos de tolerancia como un insumo al modelaje.

Este análisis estima los potenciales efectos negativos de cambio de clima en la región de Centroamérica, confirmando que esta región está sujeta a amenazas serias. Se ameritan estudios adicionales de modelaje con datos tomados dentro de la región, enfocados en los ensayos de rendimiento que se han acumulado a través de los años, y que se han recopilado para este fin.



**Figura 3. Rendimientos promedio de frijol en 15 sitios en tres épocas de siembra para línea base (1950-2000) y en dos periodos futuros: 2020s (2010-2039) y 2050s (2040-2069). Las barras oscuras son rendimientos con fertilizante; barras claras son rendimientos sin fertilizante. Desviaciones estándar son para 19 GCMs (Adaptado de Eitzinger et al., 2017).**

***Impacto de la sequía en las áreas de producción de frijol común bajo seco en Brasil (Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil; Heinemann et al. 2016)***

Una de las aplicaciones más importantes de los modelos de simulación en la última década ha sido la de caracterización de ambientes para definición de prioridades en el mejoramiento genético (Chenu et al. 2011; Chenu 2015). En América Latina, Heinemann et al. (2016) utilizaron el modelo CROPGRO-DRYBEAN para orientar el programa de mejoramiento de frijol común de Embrapa en Brasil con respecto al estrés de sequía. Los autores usaron datos de 41 ensayos eco-fisiológicos para calibrar y evaluar el modelo para dos variedades representativas en el estado de Goiás en el centro de Brasil (Pérola y BRS Radiante). Dos de los ensayos fueron

específicamente bajo condiciones de sequía moderada (~2 semanas) y severa (> 5 semanas). El modelo mostró un desempeño en general adecuado, con error cuadrático medio inferior al 10 % para ambos cultivares, para la mayoría de atributos de la planta (biomasa total, índice de área foliar, y rendimiento). No obstante, el modelo sobre-estimó el efecto de la sequía severa, mostrando un impacto demasiado temprano y una penalización del rendimiento demasiado alta. Esto fue principalmente debido a que el modelo sub-estimó el contenido de agua en los primeros 30 cm de suelo.

Los autores realizaron simulaciones en toda el área geográfica del estado de Goiás para el período 1980-2013 para dos épocas de siembra (seca: entre Enero y Febrero; y húmeda: entre Noviembre y Diciembre), y usaron los resultados de dichas simulaciones para generar dos tipos de clasificación. La primera fue una clasificación con base en los rendimientos simulados espacio-temporalmente (i.e. clasificación de ambientes); la segunda fue una clasificación de acuerdo a la severidad y sincronía de la sequía dentro de cada ambiente (i.e. clasificación de patrones de estrés de sequía). Los resultados del estudio indican que en cada época de siembra existen dos ambientes: altamente favorable, y favorable. En cada ambiente, se encontraron dos patrones de sequía distintos: sequía terminal, y sequía reproductiva. En general, estos patrones de sequía ocurren entre el 23 y 25 % de los sitios, épocas de siembra, y suelos del estado de Goiás. A pesar de la relativamente baja frecuencia de ocurrencia, la sequía puede llegar a reducir el rendimiento del frijol en hasta 50 %. Estos impactos sugieren que si bien la baja frecuencia no amerita un programa de mejoramiento específico a la sequía, si sería conveniente que el programa de mejoramiento de frijol de EMBRAPA considerara la respuesta a la sequía como uno de los criterios de selección.

***Impactos y vulnerabilidades de la agricultura Brasileña al cambio climático (Impactos e vulnerabilidades da agricultura brasileira às mudanças climáticas; Delgado Assad et al. 2016)***

El ejercicio que sin duda es el más ambicioso e integral en modelaje en América Latina fue llevado a cabo por el gobierno de Brasil, y estudió los efectos de cambio de clima no sólo sobre varios cultivos (Delgado Assad et al, 2016), sino sobre la vegetación natural, los recursos hídricos, las fuentes de energía, la salud humana, y los desastres naturales. Este ejercicio partió de las últimas proyecciones de clima del IPCC (Collins et al. 2013), y tomó en cuenta las probabilidades de eventos extremos de clima,

incluyendo temperaturas diarias superiores a 34°C y lluvias intensas con consecuencias para erosión y degradación en la estructura del suelo, y pérdida de fertilizantes. Se realizaron simulaciones bajo dos escenarios de cambio de clima planteados por IPCC AR5, es decir los Caminos de Concentraciones Representativas (RCP, por su sigla en inglés) 4.5 y 8.5, de los cuales el más extremo (RCP 8.5) representa la trayectoria actual de emisiones globales (Stott et al. 2013).

El modelaje empleó el “Simulador de Escenarios Agrícolas” (SCenAgri) desarrollado por EMBRAPA en los últimos diez años con base en el balance hídrico esperado, y está regionalizado por todo el territorio nacional. Tiene a su disposición una base de datos de 3.575 estaciones pluviométricas con datos diarios con un mínimo de 30 años, y con acceso a 20 modelos de circulación global (GCMs, por su sigla en inglés). Tiene capacidad de simular riesgos climáticos para 19 cultivos anuales y 9 cultivos perennes. Para el informe actual de 2016, todo cálculo fue basado en actualización de las proyecciones más recientes; revisión de las temperaturas extremas esperadas y mapeo de las mismas bajo los dos escenarios de RCP (4.5 8.5); mapeo de temperaturas y lluvia por épocas; definición de los parámetros relevantes para cada cultivo; simulación para el periodo de 1961-2005, y para futuros periodos de 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100. De este proceso se identificaron regiones del país que estarán bajo riesgo significativo para cada cultivo. En el caso de frijol, hay dos épocas de siembra, y los riesgos fueron evaluados para las dos épocas por separado: Siembra 1 y Siembra 2 (Cuadro 4).

**Cuadro 4: Posible impacto sobre área sembrada de frijol, comparada con 1990 bajo dos escenarios de cambio de clima (Adaptado de Delgado Assad et al, 2016).**

Época (hectáreas en 1990)	Escenario	2025		2055		2085	
		Ha.	Δ (%)	Ha.	Δ (%)	Ha.	Δ (%)
Siembra 1 (1.957.632)	RCP 4.5	1'225.556	-37,4	1'125.782	-42,5	1'186.136	-39,4
	RCP 8.5	1'124.132	-42,6	1'064.133	-45,6	838.874	-57,1
Siembra 2 (1.020.055)	RCP 4.5	506.045	-50,4	615.304	-39,7	529.704	-48,1
	RCP 8.5	423.463	-58,5	396.056	-61,2	286.938	-71,9

Se atribuyen estos efectos tanto a las altas temperaturas como a la escasez de lluvia. Es de notar que los déficits en producción de frijol creados por estas reducciones



crearán trastornos en todo el mercado Latinoamericano, debido a que Brasil es el mayor productor y consumidor de frijol en el mundo, y tales déficits solo pueden resultar en importaciones de otras regiones que a su vez crearán escasez en otros países.

***Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México (Medina-García et al., 2016)***

Medina-García et al. (2016) utilizaron anomalías de temperatura y precipitación para el período 2021-2080, estimadas con un ensamble de 11 modelos de circulación general (GCMs), para generar mapas de temperatura y precipitación futuras a partir de la climatología de referencia (1961-2010). Las proyecciones de clima usadas corresponden a dos RCP (camino de concentraciones representativas): 4.5 y 8.5. Estos dos escenarios representan tasas de emisiones medias y altas. Hecho esto, usaron los requerimientos agro-ecológicos del frijol para determinar las áreas con potencial productivo en el período primavera-verano (período lluvioso). En general, estos autores reportan reducciones en las áreas con alto y medio potencial productivo para ambos RCPs (Cuadro 5). Para el RCP 8.5, por ejemplo, el área con alto potencial productivo pasa de 1,2 millones has a 0.73 millones has, mientras que las áreas con medio potencial productivo pasan de 5,7 millones has a 2,01 millones ha.

**Cuadro 5: Área con alto y medio potencial productivo para el frijol en México bajo diferentes escenarios climáticos. Adaptado de Medina-García et al. (2016)**

Escenario	Período	Alto potencial (ha)	Medio potencial (ha)
Histórico	Actual	1'887.426	6'319.789
RCP4.5	2030	1'325.130	6'379.916
	2050	1'185.990	5'334.760
	2070	1'144.100	4'738.986
RCP8.5	2030	1'282.207	5'710.348
	2050	973.195	3'562.476
	2070	727.933	2'048.765

Por ser el segundo país en producción y consumo de frijol en todo el mundo, un déficit en México tendrá serias consecuencias, especialmente a luz de un déficit previsto para Brasil. Entre estos dos gigantes, y con los países de Centroamérica y el Caribe bajo la amenaza de estrés igual o mayor, se requiere acción decidida de adaptación para asegurar la contribución del frijol a la seguridad alimentaria.

***Estudio del cambio climático y sus efectos en la producción de granos básicos por Gigena Pazos (2004) Impacto del cambio climático sobre el rendimiento de maíz y frijol de los pequeños productores de Honduras (Díaz-Ambrona 2013)***

Esta investigación realizada en Zamorano como tesis por Gigena Pazos (2004) y publicada en revista científica por Diaz-Ambrona et al. (2013). El estudio presenta una evaluación de los efectos del cambio climático en los granos básicos del país (maíz y frijol) usando la tipología de productores de subsistencia en Honduras. El estudio utilizó datos experimentales colectados en Zamorano (ubicado en el centro del país). Se hizo una calibración de una variedad "ideotipo" para la cual se usaron los datos de frijol provenientes de experimentos conducidos en el periodo 1998-2002 con 12 cultivares de frijol común rojo: RAB-50, RAB-20, RAB-205, Desarrural, Desarrural gene I, Cuarenteño Brillante, Zamorano, Danlí 46, UW22-34, Dorado, Honduras43-40 y Tío Canela 75. Para la evaluación de impactos en los cultivos se utilizó el modelo CropSyst, acrónimo de Cropping Systems Simulation Model, al cual se introdujeron datos generados a partir información meteorológica mensual de las estaciones locales por el software ClimGem para generar datos diarios tanto de periodo de línea base (1961-1990) como para escenarios climáticos. Se usó los escenarios SRES (A2 and B2) de cinco modelos de circulación global (GFDL90, GISS95, HAD295, HAD300) para el periodo futuro del 2070-2099. Las simulaciones se corrieron para en cinco localidades del país (Zamorano, La Esperanza, Comayagua, La Lima, Valle de Sula) en donde se tenían datos de suelos y la climatología.

Se logró un buen ajuste del modelo CropSyst para la simulación de frijol con una correlación entre datos observados y simulados de 0.81 and RMSE de 0.342 t/ha. En cuanto a impactos del cambio climático, el estudio resalta los impactos en la fenología del cultivo, el rendimiento, la eficiencia en el uso de nitrógeno y la duración de su ciclo. Los rendimientos de frijol en el país presentan diversos resultados, en algunos casos suben y en otros casos bajan.

En Zamorano, que tiene un promedio de 2,692 kg/ha de rendimiento en la línea base se reportan incrementos de 28% y reducciones de hasta 32%, en La Esperanza que tiene un promedio de rendimiento durante la línea base de 2,535 kg/ha se reportan incrementos de rendimientos que oscilan entre 46% (B2) a 108% (A2). En Comayagua, que cuenta con un rendimiento promedio observado de 1,867 kg/ha el estudio encontró un incremento de un 7.6% (A2) y una reducción del mismo del 20%

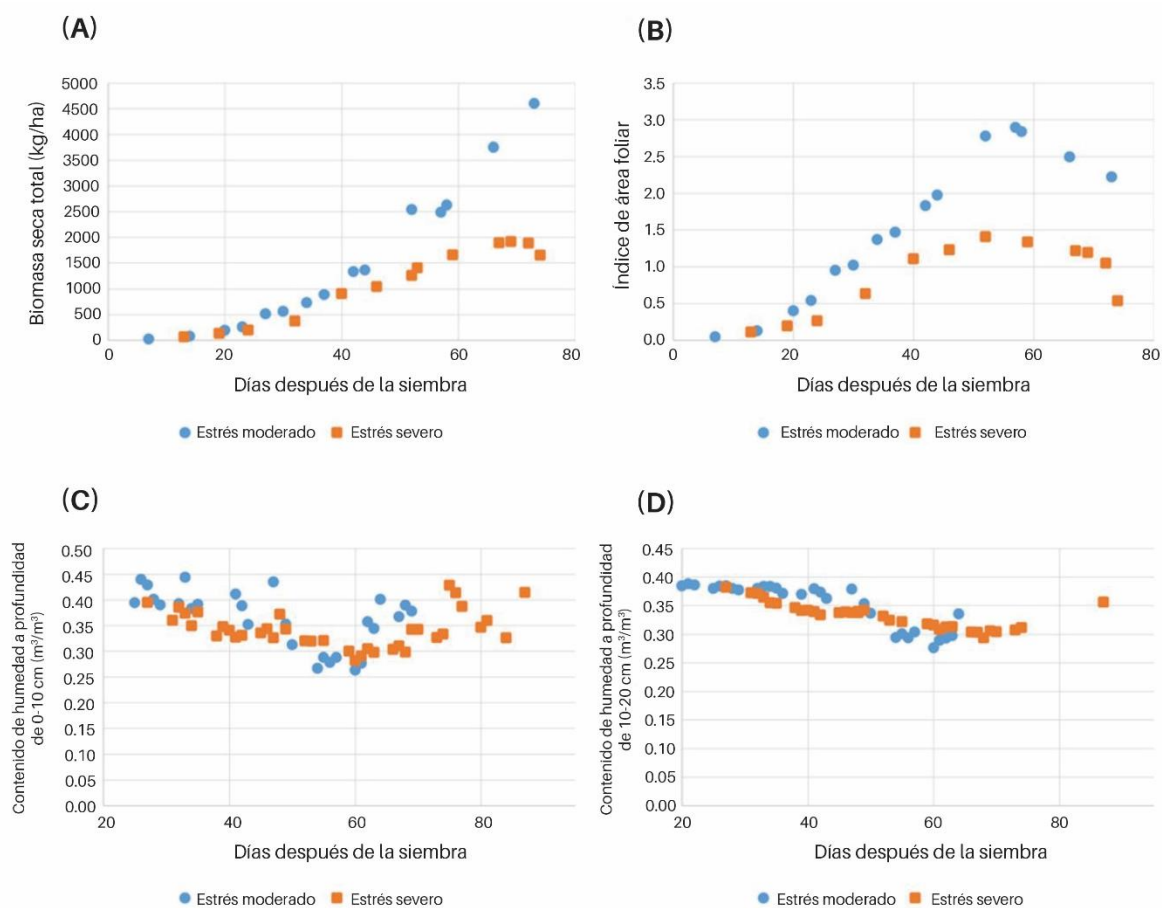
(B2). En el valle de Sula, que presenta rendimientos promedio observado de 3,524 kg/ha el estudio encontró incrementos de hasta 32% y reducciones de 54%. Para La Lima con promedio observado de 3,769 kg/ha de rendimiento, ningún escenario indico incrementos en el rendimiento, y las reducciones oscilaron entre 4% y hasta 33% con respecto al actual.

En cuanto a la duración del ciclo del cultivo, el estudio encontró que todos los sitios presentaron reducciones en la duración del ciclo del cultivo debido al aumento de temperaturas y de concentración de CO<sub>2</sub> en todos los escenarios de clima futuros, o en algunos casos la distribución de la lluvia también. Debido a la falta de condiciones adecuadas, las fechas de siembra se modificaron para dos escenarios y localidades: adelantado para Zamorano en escenario B2 bajo, en ambos ciclos (primera y postrera); en Comayagua en el escenario A2 medio se cambió el orden de siembra sembrando primero frijol y 70 días después se podría sembrar maíz lo cual es contrario a prácticas actuales. Para el resto de escenario y localidades no se vio alteración en la época de producción.

## **7. Índices agro-fisiológicos: fenología, crecimiento de área foliar; materia seca; índice de cosecha**

Frente al cambio climático, algunos de los factores para los cuales el frijol no está bien adaptado actualmente pueden volverse aún más agudos. Las sequías y altas temperaturas se verán más extremos (Field et al. 2012; Collins et al. 2013), y altas temperaturas pueden conducir a mayor mineralización de materia orgánica, acelerando la degradación de la estructura del suelo y de su fertilidad. Ante un escenario complejo y cambiante, el modelaje puede indicar estrategias tanto genéticas como de prácticas culturales para enfrentar estos cambios. Estudios fisiológicos revelan los caracteres más importantes del cultivo que pueden servir como parámetros en un ejercicio de modelaje. En frijol tales estudios se han llevado tanto en condiciones favorables como de estrés fisiológico, pero en años recientes los estudios de respuesta a sequía han sido especialmente informativos. Estudios en condiciones de alta temperatura son incipientes pero críticos a la luz de las proyecciones de temperatura durante el Siglo XXI. En esta sección se resumen algunos experimentos importantes, que por las condiciones bajo las que fueron llevados a cabo serían de vital importancia en futuros análisis de modelaje en América Latina. También se resumen resultados importantes de investigación en relación a la respuesta a diferentes estreses.

Un primer experimento importante es aquel incluido en el estudio de Heinemann et al. (2016), y mostrado en la Figura 4. El experimento se sembró en la localidad de Santo Antonio de Goiás (latitud:  $-16.47$ , longitud:  $-49.28$ , elevación: 715 m.s.n.m). Se realizaron dos siembras, la primera el 17 de Mayo de 2013 y la segunda el 5 de Julio de 2013, con el cultivar Pérola, y en ambas se indujo sequía a los 40 días después de siembra.



**Figura 4. Mediciones de biomasa seca total (A), índice de área foliar (B), y contenido de humedad a profundidad de 0-10 cm (C) y de 10-20 cm (D), para experimentos de estrés moderado y severo de sequía. Los experimentos fueron sembrados en Santo Antonio de Goiás (latitud:  $-16.47$ , longitud:  $-49.28$ , elevación: 715 m.s.n.m), el 17 Mayo 2013 (estrés moderado) y 5 Julio 2013 (estrés severo). Basada en datos de Heinemann et al. (2016).**

En estos experimentos se clasificó la sequía, de acuerdo a su duración, como moderada (primera siembra) y severa (segunda siembra). Para la primera siembra, al final del otoño, la demanda hídrica de la planta fue más baja debido a las menores temperaturas, en comparación a la segunda siembra (al final del invierno). Estos dos experimentos pueden ser usados tanto para calibración como verificación de modelos de simulación de frijol, dado que proveen datos tanto de crecimiento, como de contenidos de humedad en el suelo, y han sido llevados a cabo bajo condiciones de sequía, que es un estrés importante para el frijol en América Latina. Los datos originales de estos experimentos, incluyendo meteorología, suelos, y eco-fisiológicos, pueden accederse contactando al autor para correspondencia del estudio en cuestión, Dr. Alexandre B. Heinemann ([alexandre.heinemann@embrapa.br](mailto:alexandre.heinemann@embrapa.br)).

Un segundo experimento de importancia para el modelaje de frijol en América Latina es el usado por Hwang et al. (2017) y Clavijo-Michelangeli et al. (2014), y llevado a cabo entre la Universidad de la Florida (USA), el CIAT, y otras dos instituciones. En este experimento se sembraron 187 líneas recombinantes a partir de un cruce entre los cultivares Jamapa (Mesoamericano de crecimiento indeterminado) y Calima (Andino de crecimiento determinado) (ver Bhakta et al. 2015). Las 187 líneas y los 2 padres fueron sembrados en cinco localidades: Citra (Florida, USA), Palmira (Colombia), Popayán (Colombia), Isabela (Puerto Rico), y Prosper (Dakota del Norte, USA), siguiendo un diseño experimental latinizado, con tres replicas (3 parcelas de cada genotipo, y 6-9 parcelas por cada padre). El Cuadro 6 presenta un resumen de características de los 5 sitios.

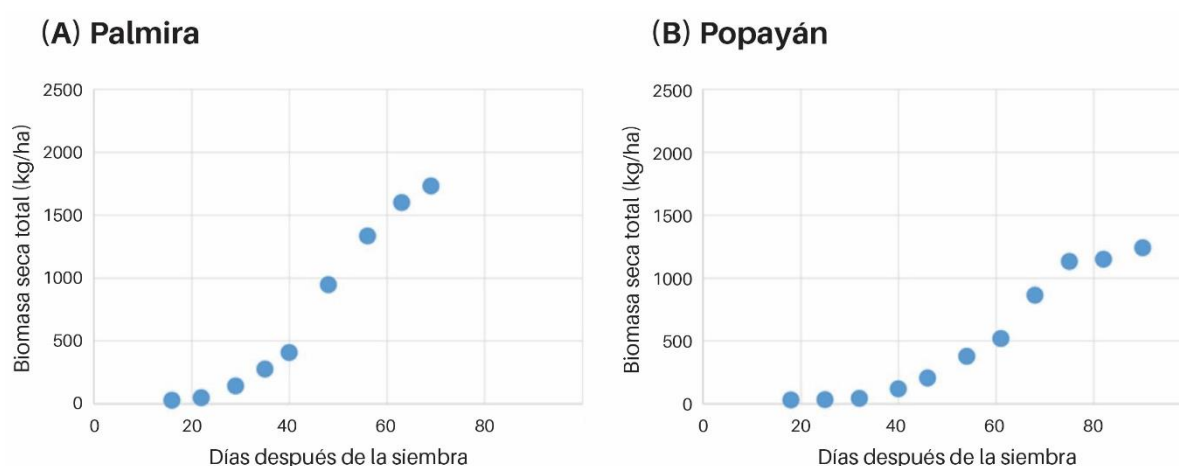
**Cuadro 6: Características generales de los sitios de ensayos experimentales del estudio de Hwang et al. (2017), y Clavijo-Michelangeli et al. (2014). Adaptado de Hwang et al. (2017).**

Sitio	Citra	Palmira	Popayan	Isabela	Prosper
Latitud	29° 39' N	03° 29' N	02° 25' N	18° 28' N	47° 00' N
Longitud	82° 06' W	76° 81' W	76° 62' W	61° 02' W	96° 47' W
Altitud (m.s.n.m)	60	1000	1800	128	280
Ciclo de cultivo	Mar–Jun 2011	Nov 2011–Ene 2012	Mar–Jun 2012	Feb–May 2012	May–Ago 2012
Textura del suelo	Arenoso	Arcilloso	Franco	Arcilla kaolinita	Limo/arcillos o franco
Plantas / m <sup>2</sup>	4.3	3.0	4.3	3.9	3.3
Espacio entre filas (cm)	90	120	90	100	150
Temperatura media (°C) <sup>1</sup>	24.6	23.9	18.1	24.4	20.4
Horas de luz por día	13.36	11.82	12.21	12.90	14.96

En ese experimento, se usó riego en Citra y en Isabela, mientras que los demás sitios se manejaron solamente con agua de lluvia. En todos los sitios se aplicó fertilización,

<sup>1</sup> Temperatura promedio diaria durante el ciclo de cultivo. Los datos meteorológicos originales se encuentran disponibles libremente en <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.010>

exceptuando en Prosper (Dakota del Norte). Los sitios fueron escogidos de manera tal que permitieran someter el cultivo a condiciones climáticas contrastantes, y en especial para que permitieran evaluar la respuesta al fotoperíodo. El set de mediciones eco-fisiológicas de estos experimentos es uno de los más completos que existen para frijol en el mundo. Las mediciones se realizaron cada 3 días, e incluyeron biomasa aérea total, biomasa de órganos (hojas, tallos, vainas y semillas), estado fenológico, número de hojas y nudos, y área foliar. La Figura 5 presenta la dinámica de biomasa total para las localidades de Palmira y Popayán, para uno de los padres (Calima).



**Figura 5. Series de tiempo observadas de biomasa aérea total para el genotipo Calima en los sitios de Palmira y Popayán.**

Los resultados del experimento en cuestión han sido analizados desde diferentes puntos de vista, incluyendo el modelaje del desarrollo reproductivo del frijol, el modelaje de caracteres de crecimiento, el modelaje de efectos genéticos y ambientales en el desarrollo post-antesis, y la creación de modelos de simulación que combinan QTLs y con funciones de crecimiento (Clavijo-Michelangeli et al. 2014; Hwang et al. 2017). Con base en la calidad, cantidad, y uso actual de la información, se sugiere que esfuerzos de modelaje en América Latina usen este conjunto de datos para calibrar y evaluar otros sistemas de simulación. Los datos detallados de crecimiento y desarrollo, así como de suelo y manejo están disponibles al pedido de cualquier interesado por parte del CIAT (contacto Dr. Steve Beebe, [s.beebe@cgiar.org](mailto:s.beebe@cgiar.org)). Los datos meteorológicos se encuentran disponibles de libre acceso en <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.010>.

Otro experimento clave para modelaje de frijol en América Latina, por su nivel de detalle es el reportado en Ricaurte et al. (2016a). En ese estudio, se sembraron dos experimentos con el objetivo de investigar el efecto de la densidad de siembra en la adición de nodos y el desarrollo foliar. El primer experimento se sembró en Palmira (Colombia), el 13 de Octubre de 2013 en un Molisol fértil. El segundo experimento se sembró en Darién (Colombia), el 29 de Mayo de 2014 en un Inceptisol. En el experimento se mantuvieron condiciones óptimas de nutrición y agua, con riego cuando fue necesario, aplicación de P (60 kg P ha<sup>-1</sup>) en siembra en ambos sitios, y con aplicación de micronutrientes. Los experimentos consideraron 6 genotipos, que representan dos acervos genéticos importantes (Andinos y Mesoamericanos). Algunos de los resultados se presentan en las Figuras 6–8.

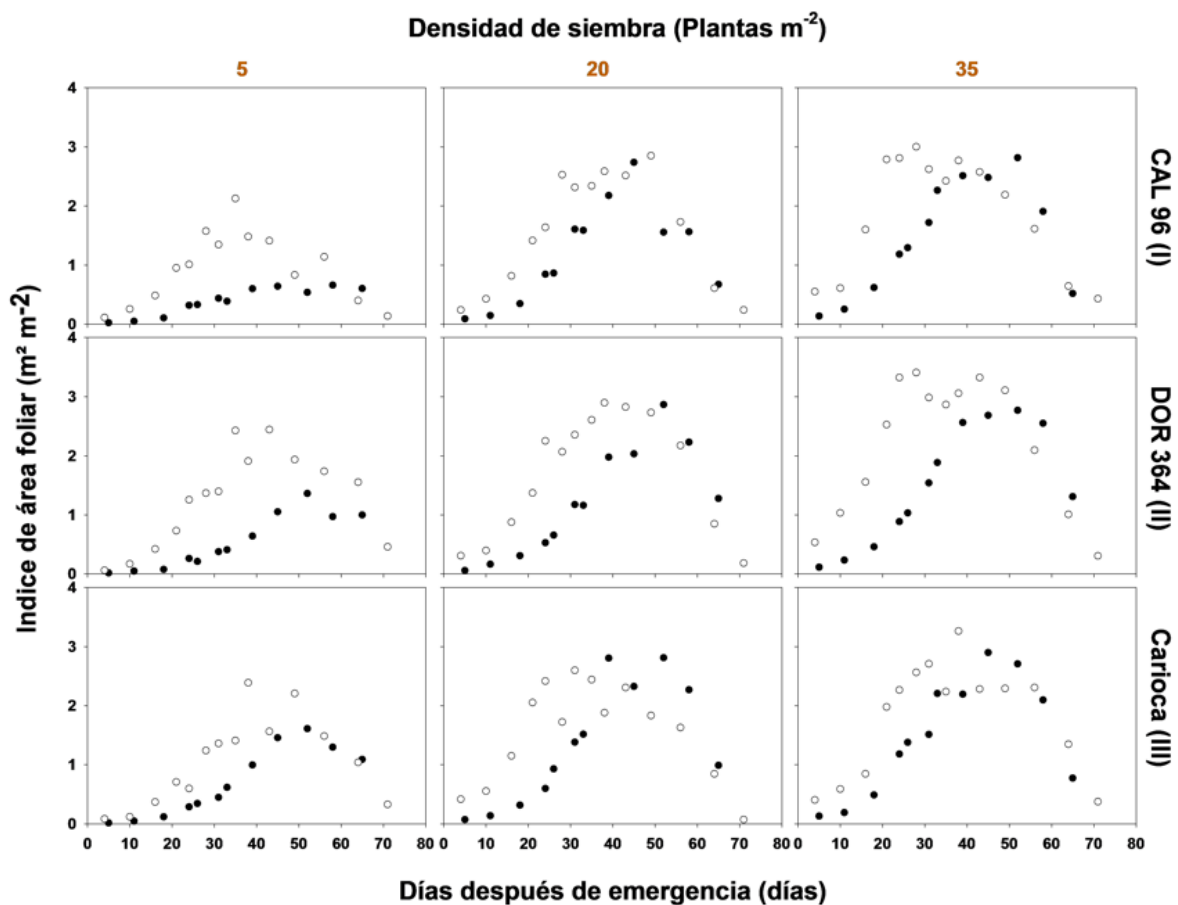


Figura 6. Series de tiempo observadas de índice de área foliar para tres genotipos en Palmira (●) y Darién (○), para tres densidades de siembra. Datos tomados por Ricaurte et al. (2016a)



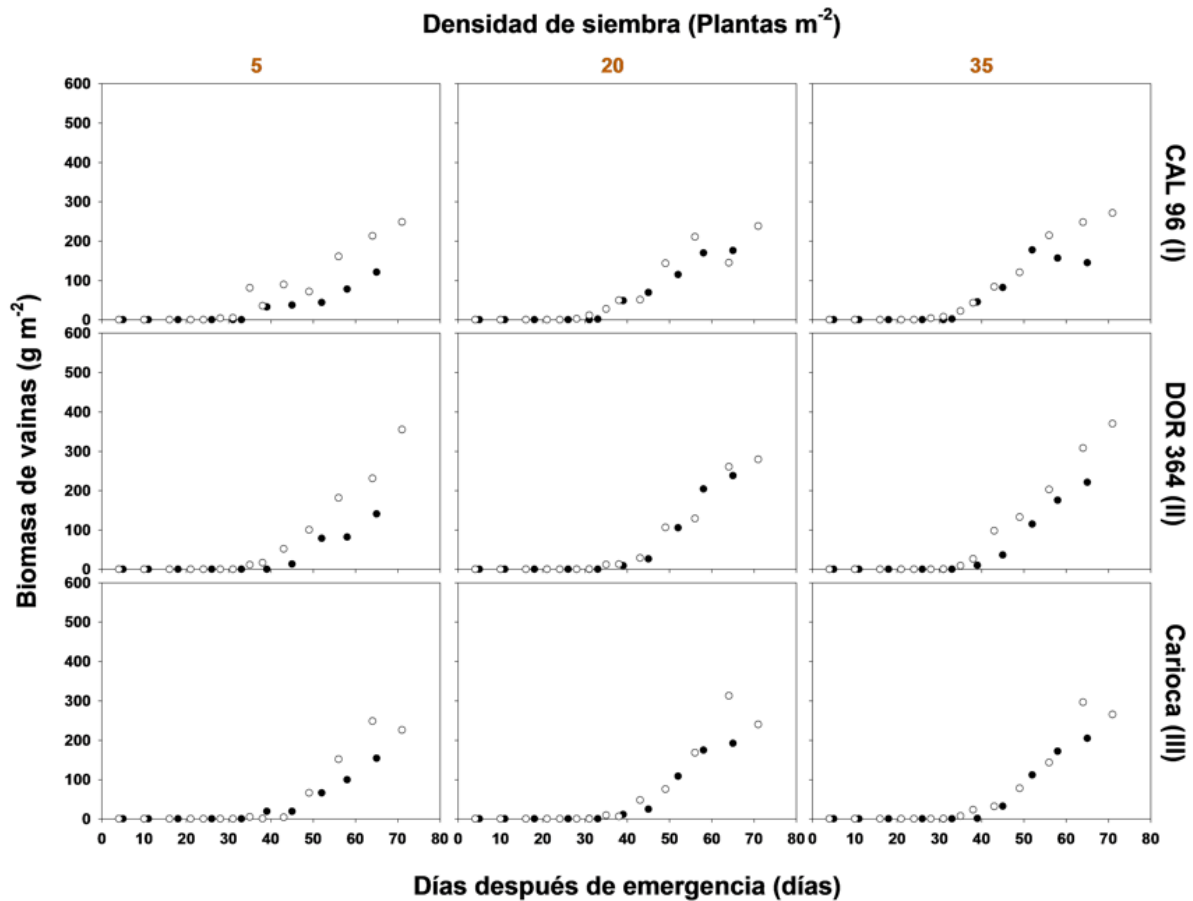


Figura 7. Series de tiempo observadas de biomasa de vainas para tres genotipos en Palmira (●) y Darién (○), para tres densidades de siembra. Datos tomados por Ricaurte et al. (2016a).

En ambos experimentos los tratamientos se organizaron como parcelas divididas en un diseño de bloques completamente al azar, con densidad de siembra (6 niveles) como parcelas principales, y genotipos como sub-parcelas, con 3 repeticiones en Darién y 4 en Palmira. Las densidades de siembra probadas fueron 5, 10, 15, 20, 25 y 35 plantas  $m^{-2}$ . Los datos colectados en los experimentos incluyeron fenología y crecimiento, tomados cada 2 o 3 días. Las medidas de fenología fueron: emergencia, formación de botón floral, y floración. Las mediciones destructivas incluyeron: número de nodos en el tallo principal, área foliar, biomasa total, y de órganos. El análisis de densidad de siembra hecho por Ricaurte et al. (2016a) indicó que el *phyllochron*, es decir, el tiempo térmico que transcurre entre la aparición de un nodo y el siguiente, difiere significativamente a través de los genotipos y las densidades de siembra. Las densidades bajas ( $< 15$  plantas  $m^{-2}$ ) reducen el índice de área foliar (i.e al nivel del cultivo), lo que en últimas afecta la interceptación de luz y la acumulación y dinámica de biomasa.

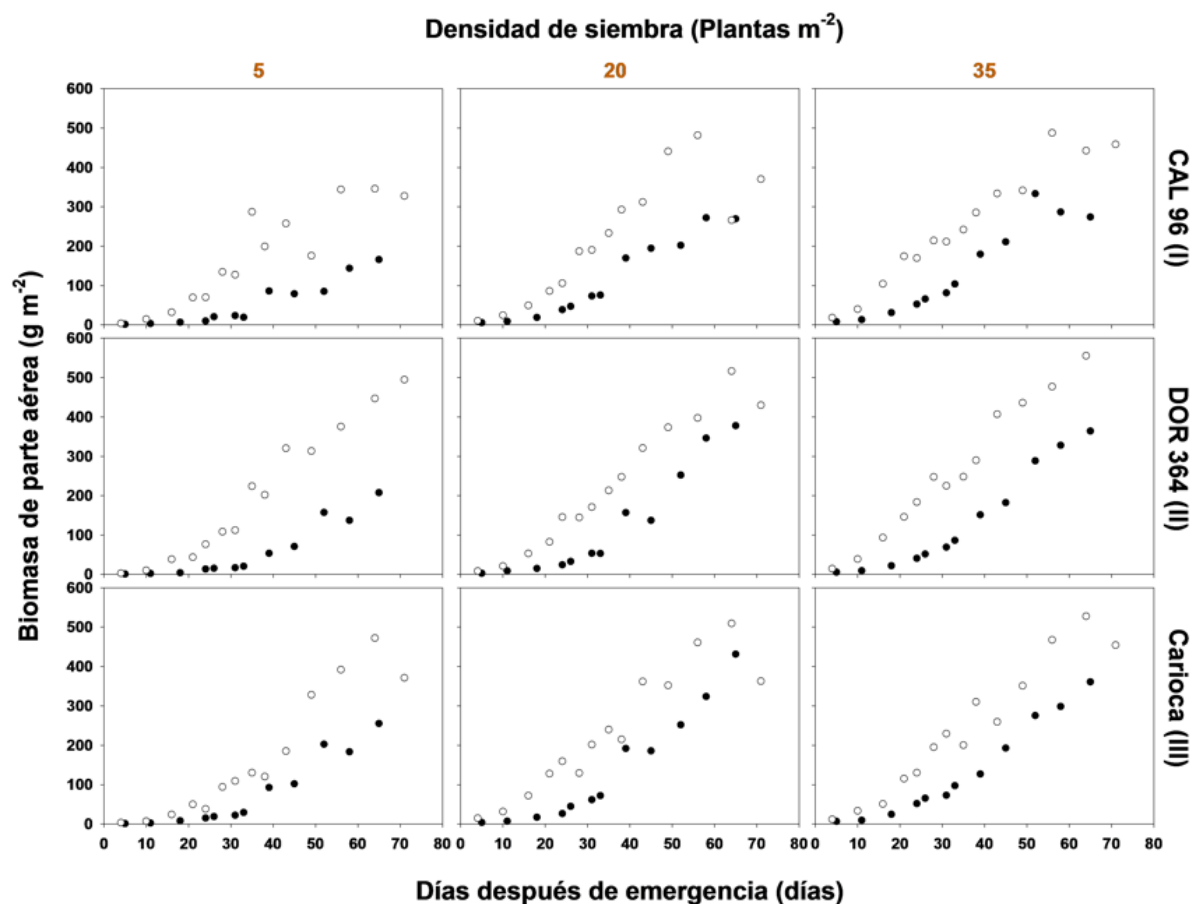


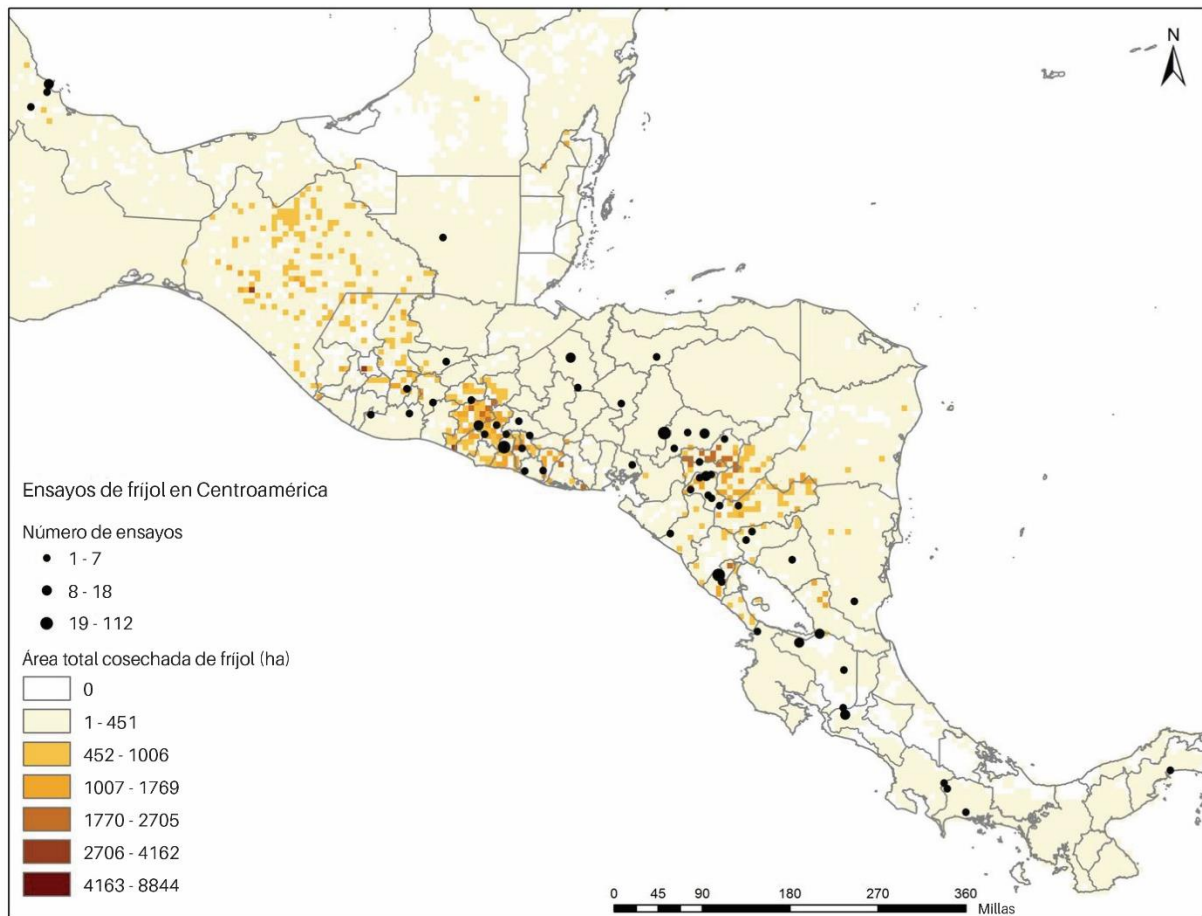
Figura 8. Series de tiempo observadas de biomasa aérea total para tres genotipos en Palmira (●) y Darién (○), para tres densidades de siembra. Datos tomados por Ricaurte et al. (2016a).

Los datos de estos ensayos en breve estarán disponibles en el sitio web del CIAT.

El grupo de experimentos para los que se colectó información en Centroamérica se presenta en la Figura 9.

En tanto que los experimentos resumidos anteriormente dan cuenta de conjuntos de datos clave para modelaje, es importante también notar las necesidades y perspectivas de cara a futuros esfuerzos, incluyendo estreses y caracteres genéticos de importancia para el mejoramiento genético y el manejo del cultivo. En cualquier ambiente la producción de biomasa es sin duda una capacidad necesaria para rendimiento de grano. Estudios en sequía confirman esta correlación. Sin embargo, una revisión de literatura revela que índice de cosecha es la variable que en muchos ambientes y con diferentes genotipos presenta una relación significativa y alta con rendimiento en estrés de sequía. En CIAT se ha desglosado el índice de cosecha en fases: primero en una medida porcentual de la biomasa dedicada a la formación de

vainas (PPI, *pod partitioning index* o índice de particionamiento a vainas); y después en el llenado de grano, medida que se expresa en biomasa de semilla como porcentaje de peso total de vaina (PHI, *pod harvest index* o índice de cosecha de vainas).



**Figura 9. Distribución de los 58 sitios de ensayo en Centroamérica recuperados para el presente estudio. Cada sitio de ensayo contiene entre 1 y 112 ensayos, y cada ensayo está asociado con datos de fenología, rendimiento y clima.**

El PHI ha sido especialmente promisorio como indicador de tolerancia a sequía, sosteniendo correlaciones con rendimiento en muchos estudios y con muchos diferentes conjuntos de accesiones y líneas, especialmente bajo estrés, pero también sin estrés, debido a que refleja una mayor re-movilización de fotosintatos al grano (Polanía et al., 2012; Klaedtke et al., 2012). La Figura 10 ilustra resultados de un estudio con líneas recombinantes segregando por tolerancia a la sequía, en el cual la correlación entre PHI y rendimiento fue 0.49 ( $p \leq 0.001$ ). En un estudio de ganancia genética correlacionada, selección de PHI bajo estrés de sequía resultó en ganancia



tolerancia a toxicidad de aluminio (Butare et al., 2011) y algunos de sus caracteres fueron transferidos al frijol común (Butare et al., 2012).

Sponchiado et al. (1989) relacionaron la tolerancia a la sequía con profundidad de raíces, y White et al. (1990) mostraron mayor productividad con profundidad de raíces y con una baja discriminación contra  $^{13}\text{C}$ . Extendiendo esta línea de trabajo, se ha logrado clasificar los genotipos como ahorradores de agua o gastadores de agua, según su estrategia para enfrentar la sequía (Polanía et al, 2016a). En la Figura 11 se ven genotipos como NCB 226 que demuestran alta discriminación contra  $^{13}\text{C}$ , indicando que los estomas están abiertos y que están transpirando normalmente. Los gastadores continúan transpirando frente a un déficit de presión de vapor, con raíces largas que aprovechan humedad en estratos profundos del suelo. Tal estrategia es apropiada cuando hay humedad en el suelo que al contrario el cultivo no estaría aprovechando. Los ahorradores de agua como BFS 67 y BFS 10 rinden igual o más que NCB 226 pero son más adaptados a condiciones en las cuales la cantidad total de agua es limitada, y es preferible conservar humedad para la fase de llenado de grano, sacrificando una mayor tasa de fotosíntesis en etapas anteriores por medio del cierre de los estomas. Esto debe ser un tema para modelaje, para predecir donde un genotipo dado puede ser más apropiado.

Reconociendo el papel esencial de raíces ante la sequía, y frente a una creciente degradación del suelo, es crítico entender mejor las implicaciones de cambio climático en el contexto que incluye consideraciones de las raíces (Lynch and St. Clair, 2004). ¿Cuáles son las demandas sobre el sistema radicular para sostener al cultivo? Y ¿Cuáles son los limitantes impuestas al sistema radicular por los cambios en el ambiente? Ante la dificultad de ejecutar estudios de raíces, el modelaje de diferentes caracteres de raíces puede dar luces sobre cual tipo de raíz es más apropiada en diferentes condiciones, y en diferentes combinaciones de estrés de sequía, de fertilidad y/o compactación de suelo.

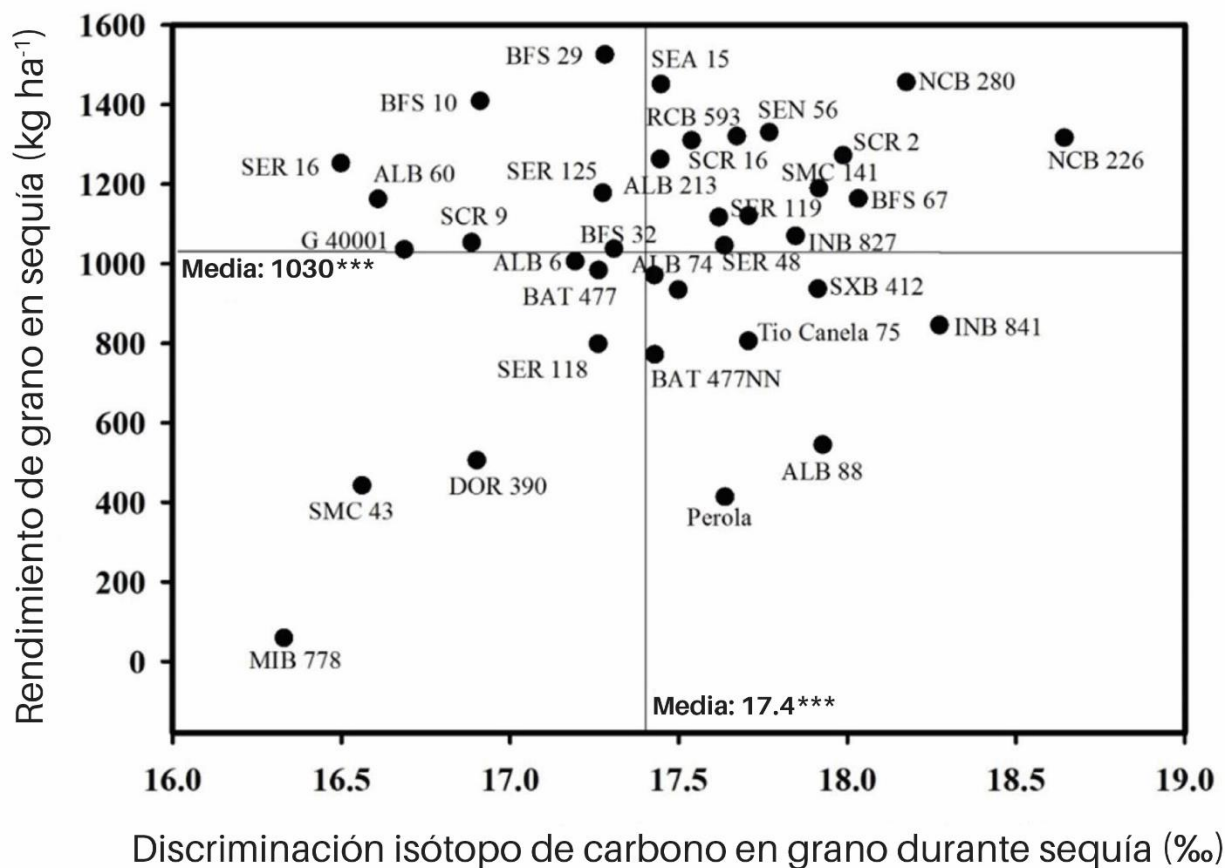


Figura 11. Relación entre rendimiento y discriminación contra el isótopo carbono-13 como indicador de transpiración de la planta. (reproducida de Polanía et al, 2016a bajo la licencia Creative Common Attribution ("CC BY")<sup>2</sup>).

Estudios reportados en la literatura sobre tolerancia del frijol al calor están mayormente llevados en condiciones controladas de cuarto de crecimiento o invernadero, y están enfocados en viabilidad de polen como en punto más sensible a altas temperaturas. Otra especie hermana, *Phaseolus acutifolius* (frijol tépari) es altamente tolerante a temperaturas extremas y a la sequía (Rao et al., 2013). Un estudio reciente de una línea inter-específica entre frijol común y tépari presenta tolerancia a temperaturas nocturnas mínimas de 22°C (Chaves et al., 2016). La secuenciación de esa línea sugiere la introgresión de un segmento importante de tépari en el cromosoma 8, y otros segmentos menores en otras partes del genoma, que estarían contribuyendo a la tolerancia a altas temperaturas. La simulación de tolerancia a altas temperaturas es un tema que amerita mayor investigación, dado que hasta el momento no se conoce con precisión el desempeño de los modelos de simulación existentes bajo estas condiciones.

Finalmente, la fijación simbiótica de nitrógeno (N) es altamente sensible a la sequía, y también a las altas temperaturas y la deficiencia de fósforo (P). Existe, además, mucha variación, entre los materiales genéticos, en su capacidad de fijación de N bajo estrés de sequía (Polanía et al, 2016b). Por este motivo, esta característica es otra candidata para ser evaluada en ejercicios de modelaje del frijol frente al estrés de cambio climático.

Los posibles caracteres candidatos para modelaje mencionados arriba han mostrado variabilidad genética que puede figurar en un ejercicio de modelaje, junto con efectos de manejo de cultivo. Esto implica la necesidad de estudios adicionales diseñados para parametrizar modelos con datos de la respuesta del cultivo ante condiciones representativas de futuros ambientes de producción, y con la variabilidad genética que ha sido desarrollada recientemente.

## 8. Conclusiones generales

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.

Estos sin duda crearán déficits en el mercado con posibles efectos nocivos en la seguridad alimenticia. El modelaje puede contribuir a direccionar la respuesta ante tal amenaza, siempre y cuando está estrechamente coordinado con investigación sobre prácticas agronómicas y con estudios fisiológicos para orientar el mejoramiento genético, aprovechando de la diversidad genética dentro de la especie, y de las especies parientes del género *Phaseolus* que evolucionaron en ambientes extremos.

Se han identificado varios avances en el uso de modelos de cultivos para la evaluación de efectos del cambio en el cultivo de frijol en Latinoamérica. Sin embargo, dada la importancia alimentaria de este cultivo en la región y la estimada magnitud de los efectos negativos que el cambio climático puede ocasionar, los estudios de estimación de impactos y particularmente de evaluación de opciones de adaptación son relativamente escasos.

Considerando la gran diversidad genética del cultivo, el alcance de los estudios en cubrir esta variabilidad es limitado. Una mejor cobertura de tal variabilidad de material por estudios de investigación de evaluación de impactos y potenciales estrategias de adaptación es recomendable.



## 9. Uso y acceso de la información

La información aquí presentada hace parte en su totalidad de estudios publicados. Los datos originales se incluyen como parte del reporte en la máxima medida posible, y, cuando no se incluyen, se provee un contacto directo a través del cual se puede recurrir para tener acceso a los datos. Un ejemplo de esto serían los más de 20 ensayos experimentales del estudio de Heinemann et al. (2016), o los ensayos multi-sitio del estudio de Hwang et al. (2017). El contacto directo con los investigadores responsables de esos ensayos garantizará la robustez de cualquier ejercicio de modelaje, dado que proveerá al modelador con (además de los datos) información cualitativa sobre las condiciones ensayo.

## 10. Referencias bibliográficas

Acosta-Gallegos, J.A., Vargas-Vazquez, P., White, J.W., 1996. 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.

Álvarez, P., Fischer, M., González, C., Mason-D’Croz, D., Moreno, P., Robertson, R., Rodríguez, J., Prager, S.D. 2016. Technology of drought tolerant beans. A case study in the series: Ex-ante impact assessment of agricultural technologies in the global food system. 2016. Unpublished.

Assefa, T., S. E. Beebe, I.M. Rao, J.B. Cuasquer, M.C. Duque, M. Rivera, A. Battisti, M. Lucchin. 2013. Pod harvest index as a selection criterion to improve drought resistance in white pea bean. *Field Crops Research* 148: 24-33.

Beebe S.E. 2012. Common bean breeding in the tropics. *Plant Breeding Reviews* 36: 357–426.

Beebe, S., J. Ramirez, A. Jarvis, I. M. Rao, G. Mosquera, J. M. Bueno, and M. W. Blair. 2011. Genetic improvement of common beans and the challenges of climate change. p. 356-369. In: S. Singh Yadav, R. Redden, J. L. Hatfield, H. Lotze-Campen, and A. Hall (eds). *Crop adaptation to climate change*. Wiley-Blackwell, Ames, IA.

Bhakta, M.S., Jones, V.A., Vallejos, C.E., 2015. Punctuated Distribution of Recombination Hotspots and Demarcation of Pericentromeric Regions in *Phaseolus vulgaris* L. *PLoS One* 10, e0116822.

Boote, K.J., Jones, J.W., Hoogenboom, G., Pickering, N.B. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. En: *Understanding Options for Agricultural Production*. Volumen 7 de la serie *Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development*, pp 99-128.

Burrige, J., Jochua, C.N., Buksch, A., Lynch, J. 2016. Legume shovelomics: High—Throughput phenotyping of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* subsp, *unguiculata*) root architecture in the field. *Field Crops Research* 192: 21-32.

Butare, L., I. M. Rao, P. Lepoivre, J. Polania, C. Cajiao, J. B. Cuasquer and S. Beebe. 2011. New sources of resistance in *Phaseolus* species to individual and combined

aluminium toxicity and progressive soil drying stresses. *Euphytica* 181:385-404. DOI 10.1007/s10681-011-0468-0.

Butare, L., I. M Rao, P. Lepoivre, C. Cajiao, J. Polania, J. Cuasquer, and S. Beebe. 2012. Phenotypic evaluation of interspecific recombinant inbred lines (RILs) of *Phaseolus* species for aluminium resistance and shoot and root growth response to aluminium–toxic acid soil. *Euphytica* 186(3): 715-730. DOI: 10.1007/s10681-011-0564-1

Chaves de Oliveira, E. 2007. Desempenho do modelo CROPGRO-Dry Bean em estimar data de semeadura e a produtividade do feijoeiro. Tesis de Magisteria, Universidades Federal de Vicosa.

Chaves, N.F., Polanía, J. A., Muñoz Perea, C. G., Rao, I. M., Beebe, S. E. 2016. Caracterización de líneas interespecíficas de frijol común por su resistencia a alta temperatura. Presentación en el LXI PCCMCA: "Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales" (5-8, abril, 2016, San Jose, Costa Rica)

Chenu, K., Cooper, M., Hammer, G.L., Mathews, K.L., Dreccer, M.F., Chapman, S.C., 2011. Environment characterization as an aid to wheat improvement: interpreting genotype-environment interactions by modelling water-deficit patterns in North-Eastern Australia. *Journal of Experimental Botany* 62: 1743–1755.

Chenu, K., 2015. Characterizing the crop environment – nature, significance and applications. In (V.O. Sadras and D.F. Calderini, Eds.), *Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy* 2nd ed., Elsevier, pp. 321–348.

Clavijo Michelangeli, J.A.; Boote, 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.. 2014. Modeling genetic traits of five common bean (*Phaseolus vulgaris*) genotypes in multi-location trials . University of Florida, Florida, FL, USA. 1 p. (Poster presented at ASA, CSSA, & SSSA International Annual Meeting. Nov. 2-5, 2014, Long Beach. CA.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M., 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and

and Irreversibility, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Cota Oliveira, L.J., Costa, L.C., Chohaku Sedyama, G., Marques Ferreira, W.P., de Oliveira, M.J. 2011. Modelos de estimativa de produtividades potencial para as culturas do feijão e do milho. *Engenharia na agricultura, Viçosa, Minas Gerais*. 19 (4): 304-319.

Delgado Assad, E., Aryeverton Fortes de Oliveira, A., Massaru Nakai, A., Pavão, E., Pellegrino, G., Monteiro, J.E. 2016. 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. p. 127-188.

Diaz-Ambrona, C.G.H., Gigena, R., Mendoza, C.O. Impacto del Cambio Climático sobre el rendimiento de maíz y frijol de los pequeños productores de Honduras/ Climate change impacts on maize and dry beans yields of small farmers in Honduras. *Revista Iberoamericana de Estudios de Desarrollo / Iberoamerican Journal of Development Studies Volumen/volume 2, número/issue 1 (2013), pp. 4-22. ISSN: 2254-2035*

Eitzinger, A., Läderach, P., Rodriguez, B., Fisher, M., Beebe, S., Sonder, K., Schmidt, A. 2017. 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. doi:10.1007/s11027-015-9696-2

Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M., 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

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.

Gigena Pazos, R. 2004. Estudio del cambio climático y su efecto en la producción de granos básicos. 48 paginas. Tesis. Panamerican Agriculture University, Zamorano. Accesible en <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2082/1/IAD-2004-T011.pdf>

Heinemann, A.B., Ramirez-Villegas, J., Souza, T.L.P.O., Didonet, A.D., di Stefano, J.G., Boote, K.J., Jarvis, A., 2016. Drought impact on rainfed common bean production areas in Brazil. Agricultural and Forest Meteorology 225: 57–74.

Hoogenboom, G., White, J.W., Acosta-Gallegos, J., Gaudiel, R.G., Myers, J.R., Silbernagel, M.J. 1997. Evaluation of a crop simulation model that incorporates gene action. Agronomy Journal 89: 613 – 620.

Hoogenboom, G. , White, J.W., Jones, J.W., and Boote, K.J. 1993. BEANGRO: A Process-Oriented Dry Bean Model with a Versatile User Interface. Agronomy Journal 86: 182-190.

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.010>

You, L., U. Wood-Sichra, S. Fritz, Z. Guo, L. See, and J. Koo. 2016. Spatial Production Allocation Model (SPAM) 2005 v3.1. Disponible en <http://mapspam.info/>

Iizumi, T., Luo, J.-J., Challinor, A.J., Sakurai, G., Yokozawa, M., Sakuma, H., Brown, M.E., Yamagata, T., 2014. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops. Nature Communications 5: 3712. doi:10.1038/ncomms4712

IPCC, 2014. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D], in: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C.,

Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 688.

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. 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18: 235–265. [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030102001077](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030102001077)

Klaedtke SM, Cajiao C, Grajales M, Polania J, Borrero G, Guerrero A, Rivera M, Rao IM, Beebe S, Leon J (2012) Photosynthate remobilization capacity from drought-adapted common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) lines can improve yield potential of interspecific populations within the secondary gene pool, *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 4: 49-61.

Lynch, J.L., and St. Clair, S.B. 2004. Mineral stress: The missing link in understanding how global climate change will affect plants in the real world soils. *Field Crops Research* 90:101-115.

Medina-García, G., Ruiz-Corral, J.A., Rodríguez-Moreno, V.M., Soria-Ruiz, J., Díaz-Padilla, G., Zarazúa Villaseñor, P. 2016. Efecto del cambio climático en el potencial productivo del frijol en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13: 2465-2474.

Polania, J. A., Poschenrieder, C., Beebe, S., Rao, I. M. 2016a. Effective use of water and increased dry matter partitioned to grain contribute to yield of common bean improved for drought resistance. *Frontiers in Plant Science* [doi.org/10.3389/fpls.2016.00660](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00660)

Polania, J., Poschenrieder, C., Rao, I. M., Beebe, S. 2016b. Estimation of phenotypic variability in symbiotic nitrogen fixation ability of common bean under drought stress using <sup>15</sup>N natural abundance in grain. *European Journal of Agronomy* 79: 66-73

Polanía JA, Rao IM, Beebe S, García R (2009) Desarrollo y distribución de raíces bajo estrés por sequía en fríjol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema de tubos con suelo. *Agronomía Colombiana* 27(1): 25-32.

Polania, J., Rao, I.M., Cajiao, C., Grajales, M., Rivera, M., Velasquez, F., Raatz, B., and Beebe, S.E. 2017. Shoot and root traits contribute to drought resistance in recombinant inbred lines of MD 23–24 × SEA 5 of common bean. *Frontiers in Plant Science* 3., doi: 10.3389/fpls.2017.00296

Polanía J, Rao I, Mejía S, Beebe S, Cajiao S (2012) Características morfo-fisiológicas relacionadas a la adaptación a sequía en frijol común *Phaseolus vulgaris* L. *Acta Agronómica* 61: 197-206.

Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L., Taylor, S., 2016. Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*: 218–219, 102–113.

Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., Läderach, P., 2013. 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.

Rao I, Beebe S, Polania J, Ricaurte J, Cajiao C, Garcia R, Rivera M (2013) Can tepary bean be a model for improvement of drought resistance in common bean? *African Crop Science Journal* 21: 265 – 281.

Ricaurte, J.J., Clavijo Michelangeli, J.A., Sinclair, T.R., Rao, I.M., Beebe, S. 2016a. Sowing density effect on common bean leaf area development. *Crop Science* 56: 2713–2721.

Ricaurte, J., Otero, M., Molina, J., Beebe, S., Rao, I.M. 2016b. Diferencias fenotípicas en desarrollo de pelos de raíces entre genotipos de frijol común. Presentación en LXI PCCMCA: “Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales” (5-8, abril, 2016, San Jose, Costa Rica)

Ritchie, J.T., 1998. Soil water balance and plant stress. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer, Dordrecht The Netherlands, pp. 41–54.

Rivera, M., Polanía, J., Ricaurte, J. Borrero, G., Beebe, S., Rao, I. M. 2016. Efectos de compactación inducida en la habilidad de penetración de raíces de frijol común. Presentación en LXI PCCMCA: Reunión Anual del Programa Cooperativo

Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales” (5-8, abril, 2016, San Jose, Costa Rica

Sponchiado B, White J, Castillo J, Jones P. 1989. Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments with contrasting soil types. *Experimental Agriculture* 25: 249-257.

Stott, P., Good, P., Jones, G., Gillett, N., Hawkins, E., 2013. The upper end of climate model temperature projections is inconsistent with past warming. *Environmental Research Letters* 8: 14024.

Taba, G., Hyman, G., Musoni, A., Beebe, S.E., Rubiano, J., Castro, F., Mukankusi, C., Buruchara, R.A., Rubyogo, J.C. 2016. 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.

Wheeler, T., von Braun, J., 2013. Climate change impacts on global food security. *Science* 341, 508–513. doi. 10.1126/science.1239402

White JW, Castillo JA, Ehleringer JR. 1990. Associations between productivity, root growth and carbon isotope discrimination in *Phaseolus vulgaris* under water deficit. *Australian Journal of Plant Physiology* 17: 189-198

World Bank. 2008. World development report 2008. <http://go.worldbank.org/LBJZD6HWZ0>.





## Lista de figuras

Figura 1. Área foliar como función de número de nudos para tres genotipos de frijol común cultivado a 5, 20 y 35 plantas m <sup>-2</sup> y en dos sitios (Palmira=PAL; Darién=DAR). Los círculos representan valores observados, mientras las líneas representan valores predichos (Tomado de Ricaurte et al., 2016a)...	9
Figura 2. Distribución del cultivo de frijol según el área total por celda de cuadrícula de 10×10 km de resolución. Fuente: JRC con datos de SPAM You et. al., (2016).....	16
Figura 3. Rendimientos promedio de frijol en 15 sitios en tres épocas de siembra para línea base (1950-2000) y en dos periodos futuros: 2020s (2010-2039) y 2050s (2040-2069). Las barras oscuras son rendimientos con fertilizante; barras claras son rendimientos sin fertilizante. Desviaciones estándar son para 19 GCMs (Adaptado de Eitzinger et al., 2017). .....	23
Figura 4. Mediciones de biomasa seca total (A), índice de área foliar (B), contenido de humedad a profundidad de 0-10 cm (C), y contenido de humedad a profundidad de 10-20 cm (D), para experimentos de estrés moderado y severo de sequía. Los experimentos fueron sembrados en Santo Antonio de Goiás (latitud: -16.47, longitud: -49.28, elevación: 715 m.s.n.m), el 17 Mayo 2013 (estrés moderado) y 5 Julio 2013 (estrés severo). Basada en datos de Heinemann et al. (2016). .....	30
Figura 5. Series de tiempo observadas de biomasa aérea total para el genotipo Calima en los sitios de Palmira y Popayán. ....	32
Figura 6. Series de tiempo observadas de índice de área foliar para tres genotipos en Palmira (●) y Darién (o), para tres densidades de siembra. Datos tomados por Ricaurte et al. (2016a) .....	33
Figura 7. Series de tiempo observadas de biomasa de vainas para tres genotipos en Palmira (●) y Darién (o), para tres densidades de siembra. Datos tomados por Ricaurte et al. (2016a). ....	34
Figura 8. Series de tiempo observadas de biomasa aérea total para tres genotipos en Palmira (●) y Darién (o), para tres densidades de siembra. Datos tomados por Ricaurte et al. (2016a). ....	35
Figura 9. Distribución de los 58 sitios de ensayo en Centroamérica recuperados para el presente estudio. Cada sitio de ensayo contiene entre 1 y 112 ensayos, y cada ensayo está asociado con datos de fenología, rendimiento y clima. ....	36
Figura 10. Relación entre rendimiento e índice de cosecha de vainas (PHI) en un estudio de líneas recombinantes segregando para tolerancia a la sequía. (reproducida de Polanía et al, 2017 bajo la licencia Creative Common Attribution ("CC BY")).....	37
Figura 11. Relación entre rendimiento y discriminación contra el isótopo carbono-13 como indicador de transpiración de la planta. (reproducida de Polanía et al, 2016a bajo la licencia Creative Common Attribution ("CC BY") <sup>2</sup> ).....	39

## Lista de tablas

Cuadro 1: Área, rendimiento y producción total en países de América Latina y del Caribe. FAO Statistics (2016). .....	15
Cuadro 2: Sistemas de producción, tipos de grano, hábitos de planta y fechas de siembra que predominan en países y regiones de Latina América.....	19
Cuadro 3: Área en producción de frijol en países seleccionados en América Latina que estará sujeto al estrés de altas temperaturas de 25°C o más en 2030. (Datos no publicados del CIAT) .....	21
Cuadro 4: Posible impacto sobre área sembrada de frijol, comparada con 1990 bajo dos escenarios de cambio de clima (Adaptado de Delgado Assad et al, 2016).....	25
Cuadro 5: Área con alto y medio potencial productivo para el frijol en México bajo diferentes escenarios climáticos. Adaptado de Medina-García et al. (2016).....	26
Cuadro 6: Características generales de los sitios de ensayos experimentales del estudio de Hwang et al. (2017), y Clavijo-Michelangeli et al. (2014). Adaptado de Hwang et al. (2017).....	31

## **GETTING IN TOUCH WITH THE EU**

### **In person**

All over the European Union there are hundreds of Europe Direct information centres. You can find the address of the centre nearest you at: <http://europa.eu/contact>

### **On the phone or by email**

Europe Direct is a service that answers your questions about the European Union. You can contact this service:

- by freephone: 00 800 6 7 8 9 10 11 (certain operators may charge for these calls),
- at the following standard number: +32 22999696, or
- by electronic mail via: <http://europa.eu/contact>

## **FINDING INFORMATION ABOUT THE EU**

### **Online**

Information about the European Union in all the official languages of the EU is available on the Europa website at: <http://europa.eu>

### **EU publications**

You can download or order free and priced EU publications from EU Bookshop at: <http://bookshop.europa.eu>. Multiple copies of free publications may be obtained by contacting Europe Direct or your local information centre (see <http://europa.eu/contact>).

## JRC Mission

As the science and knowledge service of the European Commission, the Joint Research Centre's mission is to support EU policies with independent evidence throughout the whole policy cycle.



### EU Science Hub

[ec.europa.eu/jrc](https://ec.europa.eu/jrc)



@EU\_ScienceHub



EU Science Hub - Joint Research Centre



Joint Research Centre



EU Science Hub

