

LARGE-AREA DRY BEAN YIELD PREDICTION MODELING IN MEXICO*

MODELO REGIONAL PARA PREDECIR EL RENDIMIENTO DE FRIJOL DE TEMPORAL EN MÉXICO

Guillermo Medina-García¹, Alma Delia Baez-González^{2§}, Jesús López-Hernández³, José Ariel Ruíz-Corral⁴, Carlos Alberto Tinoco-Alfaro⁵ and James R. Kiniry⁶

¹Campo Experimental Zacatecas. INIFAP. Carretera Zacatecas-Fresnillo, km 24.5. Calera, Zacatecas, México. C. P. 98600. Tel. 478 9850198. (medina.guillermo@inifap.gob.mx). ²Campo Experimental Pabellón. INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas, km 32.5. Pabellón, Aguascalientes, México. C. P. 20600. ³Campo Experimental Valle del Guadiana. INIFAP. Carretera Durango-El Mezquital, km 5. Durango, Durango, México. C. P. 34000. ⁴Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. INIFAP. Carretera libre Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Tepatitlán, Jalisco, México. C. P. 47600. ⁵Campo Experimental Cotaxtla. INIFAP. Ocampo Núm. 234. Desp. 322. Veracruz, Veracruz, México. C. P. 91700. ⁶United States Department of Agriculture (USDA). Agricultural Research Service (ARS). Grassland Soil and Water Research Lab. 808 East Blackland Road, Temple, TX 76502, USA. [§]Corresponding author: baez.alma@inifap.gob.mx.

ABSTRACT

Given the importance of dry bean in Mexico and the need of know their production before the harvest, for the authorities of the agricultural sector, in order to define support to producers according to the expected harvest volume. The aim of this study was to develop an empirical model to estimate the yield of dry bean at the regional level prior to the harvest. An empirical dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield model that incorporates data on climate, leaf area index and yield components was developed for Zacatecas state, the major bean-producing area of Mexico, with 2005 data from 54 sampling sites planted with Negro San Luis, Flor de Mayo and Flor de Junio varieties of dry bean. Precipitation, leaf area index, number of pods per plant, grains per pod and plant, weight of 100 grains, plant density and grain yield data were obtained, and correlation and multiple regression analyses were made using 2005 data and the Statistical Analysis System (SAS) program. The model was validated with 2006 and 2007 data from 53 and 59 farmers' sites, respectively, in Zacatecas. Additionally, it was tested with 2006 and 2007 data from 34 and 36 sites, respectively, in the adjoining state of Durango, whose bean varieties and climatic, farmland, and crop management conditions are similar to those of Zacatecas. The results were highly significant

RESUMEN

Dada la importancia del cultivo de frijol de temporal en México y la necesidad de conocer su producción antes de la cosecha por parte de las autoridades del sector agropecuario, para poder definir apoyos a los productores de acuerdo al volumen de cosecha esperado. El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo empírico para estimar el rendimiento de frijol de temporal a nivel regional con anticipación a la cosecha. Se generó un modelo empírico para estimar el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) de temporal, el cual incorpora datos de clima, índice de área foliar y componentes del rendimiento, para el estado de Zacatecas, el mayor productor de frijol en México. En el año 2005 se muestrearon 54 parcelas de productores sembradas con variedades de frijol Negro San Luis, Flor de Mayo y Flor de Junio bajo condiciones de temporal. Se obtuvieron datos de precipitación, índice de área foliar, número de vainas por planta, granos por vaina, peso de 100 granos, densidad de siembra y rendimiento de grano, con ellos (año 2005) se realizaron análisis de correlación y regresión múltiple utilizando el programa SAS (Statistical Analysis System). El modelo fue validado con datos de 53 sitios de muestreo de 2006 y 59 de 2007, del estado de Zacatecas. Adicionalmente, fue probado con datos de 34 y 36 sitios de muestreo en esos mismos años en el estado de Durango,

* Recibido: febrero de 2010
Aceptado: julio de 2010

($p < 0.0001$, $R^2 = 0.88$), indicating that the model can be used for large-area yield prediction at least one month before the crop is gathered from the field in Zacatecas and Durango, which comprise over 850 000 ha for bean. The predictions can complement those made early in the growing season for this region. Further studies are needed to determine the applicability of the model and the methodology of prediction to other bean-producing regions with similar climate and management conditions.

Key words: dry bean, leaf area index, modeling, yield components.

INTRODUCTION

The bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop occupies second place in Mexico in terms of cultivated area. Approximately a million and a half hectares are planted to bean each year. In the state of Zacatecas, where it is the most important crop, an average of 600 000 ha has been planted to bean in recent years, making it the major bean-producing state under dryland conditions in Mexico. Durango comes second with 250 000 ha. These two states comprise the major bean-producing region, with over 850 000 ha representing 57.1% of the total area in Mexico for bean production under dryland conditions (SIAP, 2009).

Large-area yield prediction methodologies for different crops have been developed to increase the grade of reliability in estimates and hence, better aid decision-making in agriculture (Báez-González *et al.*, 2002; Boote *et al.*, 2003; Lobell *et al.*, 2007). Simulation models of crop growth and development have been created for bean (Hoogenboom *et al.*, 1994; Adikua *et al.*, 2001; Villalobos and Retana, 2003; Moreau-Valancogne *et al.*, 2008) and other crops like maize (*Zea mays* L.) (Báez-González *et al.*, 2002), cereals (Tsubu *et al.*, 2005), and soya (*Glycine max*) (Pedersen *et al.*, 2008). Climate variables such as precipitation (Acosta-Díaz *et al.*, 2007), physiological indices such as leaf area index (Báez-González *et al.*, 2005), and components of yield (Shenkut and Brick, 2003) are among the parameters that have been used for yield models, though, to our knowledge, they have not been jointly used for bean yield prediction modeling in Mexico.

Water is a major limiting factor in bean production. Acosta-Díaz *et al.* (2007) found a strong relation between yield of bean grain and water availability; yield was reduced in

en donde las variedades de frijol, el clima y el manejo de cultivo son similares a las condiciones presentes en el estado de Zacatecas. El modelo resultó altamente significativo ($P < 0.0001$, $R^2 = 0.88$); lo cual indica que puede ser utilizado para predecir el rendimiento en grandes regiones, al menos un mes antes de la cosecha de frijol en Zacatecas y Durango, los cuales comprenden alrededor de 850 000 hectáreas. Las predicciones pueden complementarse haciéndose en la estación temprana de crecimiento del cultivo para esta región. Son necesarios otros estudios para determinar la aplicabilidad del modelo y la metodología de predicción a otras regiones que producen frijol en condiciones similares de clima y manejo.

Palabras clave: componentes del rendimiento, índice de área foliar, frijol, modelación, rendimiento.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) ocupa el segundo lugar en México en cuanto a superficie sembrada, anualmente se siembran alrededor de un millón y medio de hectáreas. En el estado de Zacatecas es el cultivo más importante; en los últimos siete años se sembraron en promedio alrededor de 600 mil hectáreas bajo condiciones de temporal, siendo el estado con mayor superficie sembrada en el país; el segundo estado es Durango con alrededor de 250 mil hectáreas. Estos dos estados conforman la región productora de frijol más importante en el país con alrededor de 850 mil hectáreas, lo cual representa el 57.1% de la superficie total sembrada en México con esta leguminosa bajo condiciones de temporal (SIAP, 2009).

Diferentes metodologías de predicción de cosechas para grandes regiones, han sido desarrolladas en diferentes cultivos, para aumentar el grado de confiabilidad de las estimaciones y de las decisiones tomadas en la agricultura (Báez-González *et al.*, 2002; Boote *et al.*, 2003; Lobell *et al.*, 2007). Modelos de simulación del desarrollo y crecimiento han sido creados para frijol (Hoogenboom *et al.*, 1994; Adikua *et al.*, 2001; Villalobos y Retana, 2003; Moreau-Valancogne *et al.*, 2008) y otros cultivos como maíz (*Zea mays* L.) (Báez-González *et al.*, 2002), cereales (Tsubu *et al.*, 2005), y soya (*Glycine max*) (Pedersen *et al.*, 2008). Variables de clima como precipitación (Acosta-Díaz *et al.*, 2007), índices fisiológicos como el índice de área foliar (Báez-González *et al.*, 2005), y componentes de rendimiento (Shenkut y Brick, 2003), son parámetros que han sido utilizados en modelos de rendimiento; sin embargo,

treatments with drought in a greenhouse study. Amador-Ramírez *et al.* (2007) likewise found that the relation between yield of bean under dryland conditions and leaf area index could be affected by precipitation. Among the stages of development of bean, the reproductive stage is especially vulnerable to drought (Acosta-Gallegos and Kohashi-Shibata, 1989; Nielsen and Nelson, 1998). It is during this stage that there is maximum demand for inputs. Acosta-Gallegos *et al.* (1998) point out that deficient and erratic precipitation regimes during the vegetative and reproductive stages of the bean plant affect yield.

Leaf area index (LAI) is the ratio of total upper leaf surface of vegetation divided by the surface area of the land on which the vegetation grows (Tanaka and Yamaguchi, 1977; Waring *et al.*, 1982). The leaf area index may vary among sites due to crop variety, management, development conditions and the interaction among these factors (Díaz *et al.*, 2001). A correlation between maize yield and leaf area index has been reported by Báez-González *et al.* (2002), while Padilla *et al.* (2005); Amador-Ramírez *et al.* (2007), found a significant relation between leaf area index measured in the phase of formation and filling of pods and bean yield under dryland conditions.

Yield components are quantitative parameters of the morphology of a plant that, when combined, have a value equal to the yield (White, 1988). Components of dry bean yield have been studied to determine their relation with yield. Singh (1995) reports a low negative correlation between yield and seed weight while Ramírez-Vallejo and Kelly (1998) mention inconsistent correlations between components of yield and yield in conditions of stress and no stress. On the other hand, Nienhuis and Singh (1988) and Infante *et al.* (2003) found a positive correlation between yield of bean under dryland conditions and its components. Westermann and Crothers (1977) and Shenkut and Brick (2003) reported a high correlation between yield and the number of pods per plant, but not with the number of grains per pod or weight of grains. Amador-Ramírez *et al.* (2007) suggest that further studies be conducted to add yield components such as number of pods (Singer *et al.*, 2004) to LAI and climate parameters in order to improve the accuracy of bean yield model predictions.

A model is a schematic representation of the conception of a system or a set of equations, which represents the behavior of a system. A model is, by definition “a simplified version

de acuerdo a nuestro conocimiento, no han sido utilizados de manera conjunta para el modelado del rendimiento de frijol en México.

El agua es el factor más limitante en la producción de frijol. Acosta-Díaz *et al.* (2007) encontró una fuerte relación entre el rendimiento de grano de frijol y la disponibilidad de agua; en un estudio de invernadero el rendimiento se redujo en los tratamientos con sequía. Amador-Ramírez *et al.* (2007), de igual manera, encontró que la relación entre el rendimiento de frijol bajo condiciones de temporal y el índice de área foliar puede ser afectada por la precipitación. Entre las etapas de desarrollo del frijol, la etapa reproductiva es especialmente vulnerable a la sequía (Acosta-Gallegos y Kohashi-Shibata, 1989; Nielsen y Nelson, 1998). Es durante esta etapa que existe la máxima demanda por agua. Acosta-Gallegos *et al.* (1998) señala que los regímenes de precipitación escasa y errática durante la etapa vegetativa y reproductiva del frijol afectan el rendimiento.

El índice de área foliar (IAF) es la relación entre el área de hojas de las plantas de un cultivo, por unidad de superficie (Tanaka y Yamaguchi, 1977; Waring *et al.*, 1982). El índice de área foliar puede variar entre diferentes sitios de cultivo debido a la variedad, al manejo, al ambiente de desarrollo y a la interacción entre ellos (Díaz *et al.*, 2001). Se ha encontrado alta correlación entre el rendimiento y el índice de área foliar, tal como lo reporta Báez-González (2002) en maíz. Padilla *et al.* (2005); Amador-Ramírez *et al.* (2007), encontraron relación significativa entre el índice de área foliar, medido en la etapa de formación y llenado de vainas, con el rendimiento en frijol de temporal.

Los componentes del rendimiento son parámetros cuantitativos de la morfología de una planta, los cuales multiplicados en conjunto tienen un valor igual al rendimiento (White, 1988). Los componentes del rendimiento de frijol de temporal, han sido estudiados para determinar su relación con el rendimiento. Singh (1995) reportó una baja correlación negativa entre el rendimiento y el peso de la semilla. Correlaciones inconsistentes entre componentes del rendimiento y el rendimiento en ambientes con y sin estrés fueron reportados por Ramírez-Vallejo y Kelly (1998). Nienhuis y Singh (1988); Infante *et al.* (2003) encontraron correlación positiva entre el rendimiento de frijol de temporal y sus componentes. Westermann y Crothers (1977); Shenkut y Brick (2003) reportaron alta correlación entre el rendimiento de frijol de temporal y el número de vainas por planta, pero no con el número de granos por vaina o peso de granos.

of a part of reality, not a one to one copy". New agricultural research is needed to supply information to farmers, policy makers and other decision makers on how to accomplish sustainable agriculture over the wide variations in climate around the world (Murthy, 2004). Crop yield forecasts using combined climate and crop modeling systems enable estimation of the impacts of climate variability on food production. The objective of a model is to reproduce the impact of weather on observed crop yield (Challinor *et al.*, 2004; Van Den Berg and Smith, 2005).

The objective of this study is to develop an empirical model for estimating dry bean grain yield in large areas using a methodology that combines climatic data and non-destructive field sampling of leaf area index and yield components.

MATERIALS AND METHODS

Model construction

To develop the model, we used data obtained from farm sites in Zacatecas. This Mexico State, along with the state of Durango, is located in northern central Mexico, in the zone called Altiplano Mexicano. An annual average temperature of 15 to 17 °C and an annual precipitation of 300 to 600 mm (Medina and Ruiz, 2004; Medina *et al.*, 2005) characterize this region.

In 2005, 54 sampling sites were established on farm sites in Zacatecas that had been planted with Negro San Luis, Flor de Mayo y Flor de Junio varieties of bean under dryland conditions (Figure 1). The plant variables considered in the model, i.e., yield components and LAI, when measured in the field, were expected to consider any differences that may exist among the different varieties. These sites were established at random, considering areas that were at least two hectares and had the same planting date as the majority of the sites. They were identified and located geographically after the crop had been established, approximately when the bean crop was in the vegetative stage V3-V4 (Schoonhoven and Pastor-Corrales, 1987), with one to three open trifoliate leaflets, 30 days after sowing (DAS).

Amador-Ramírez *et al.* (2007) sugieren que se realicen más estudios para agregar los componentes del rendimiento, como el número de vainas (Singer *et al.*, 2004), IAF y los parámetros climáticos con el fin de mejorar la precisión de las predicciones de modelos de producción de frijol.

Un modelo es una representación esquemática de la concepción de un sistema o un conjunto de ecuaciones, las cuales representan el comportamiento de un sistema. Un modelo por definición, es "una versión simplificada de una parte de la realidad, no una copia uno a uno". Una nueva investigación agrícola es necesaria, para suministrar información a los agricultores, responsables políticos y otros tomadores de decisiones, sobre cómo llevar a cabo una agricultura sostenible, considerando las amplias variaciones del clima de todo el mundo (Murthy, 2004). El rendimiento de cultivos combinado con pronósticos del clima y modelos de simulación, permiten la estimación de los impactos de la variabilidad del clima en la producción de alimentos. La misión del modelo es reproducir el impacto del clima sobre rendimientos de cultivos observados (Challinor *et al.*, 2004; Van Den Berg y Smith, 2005).

El objetivo de este estudio fue desarrollar un modelo empírico para estimar a nivel regional el rendimiento de grano de frijol de temporal, usando una metodología que combina datos climáticos, muestreos de campo no destructivos del índice de área foliar y componentes del rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Construcción del modelo

Para generar el modelo se utilizaron datos obtenidos en parcelas de productores del estado de Zacatecas; éste junto con el estado de Durango, está localizado en el norte-centro de México, en la región conocida como Altiplano mexicano. Una temperatura media anual de 15 a 17°C y una precipitación anual de 300 a 600 mm caracterizan esta región (Medina *et al.* 2004; Medina *et al.* 2005).

En el año 2005 se establecieron 54 sitios de muestreo en parcelas de productores de frijol de temporal del estado de Zacatecas, sembrados con las variedades Negro San Luis, Flor de Mayo y Flor de Junio (Figura 1). Las variables

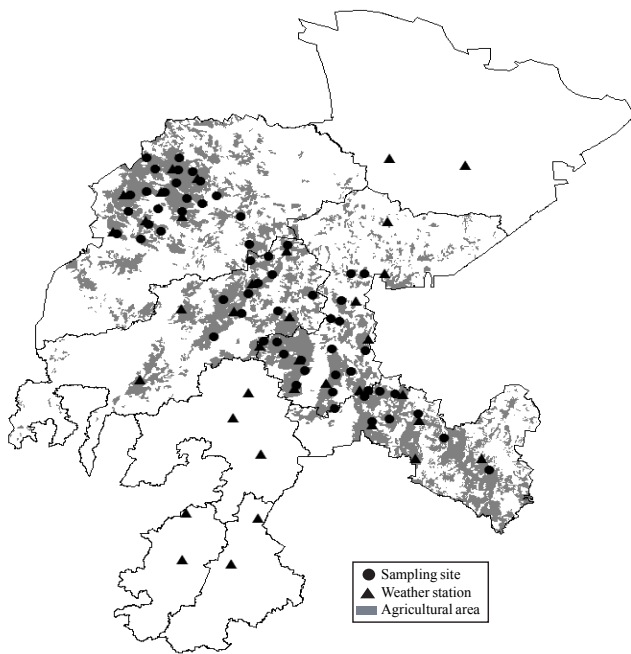


Figure 1. Agricultural areas, sampling sites, and weather stations in 2005 in the state of Zacatecas, Mexico.

Figura 1. Áreas agrícolas, sitios de muestreo y estaciones de clima en el año 2005 en Zacatecas, México.

At the start of flowering (48 DAS), sampling of leaf area index (LAI) was done observing a 10-day interval between samplings in order to determine the maximum value for this index. During each sampling, four replications were made for each site. LAI was measured using a linear ceptometer (Decagon Devices, 2003).

When most of the pods were full (73 DAS), we counted the number of filled pods per plant and grains per pod in five plants with four replications on each sampling site. At 88 DAS, we measured the density of the population and the production of grain to estimate the yield and the weight of 100 grains, both at 12% water content. To estimate bean production, we harvested bean in 7.6 m² with four replications. The number of grains per pod and the number of pods per plant were used to calculate the grains per plant. We used precipitation data for the growing season recorded daily by the 36 automatized meteorological stations of the agroclimatological monitoring network of the state of Zacatecas (Figure 1). We obtained data of accumulated precipitation every 10 days, the total accumulated precipitation of each month and of the full growing season.

componentes del rendimiento e IAF, fueron medidas en campo y se consideró que las variaciones entre variedades fueron registradas en sus mediciones. Los sitios fueron establecidos al azar considerando áreas de dos hectáreas y aproximadamente la misma fecha de siembra. Los sitios se identificaron y ubicaron geográficamente después que el cultivo estuvo establecido, aproximadamente cuando el cultivo de frijol se encontraba en la etapa fenológica V3-V4 (Schoonhoven y Pastor-Corrales, 1987), de uno a tres trifolios abiertos, 30 días después de la siembra (DDS).

A partir del inicio de floración (48 DDS) se comenzaron a realizar muestreos del índice de área foliar (IAF), espaciados aproximadamente 10 días entre uno y otro, con el fin de encontrar el máximo valor de este índice, en cada muestreo se hicieron cuatro repeticiones; para las mediciones se utilizó un ceptometro lineal (Decagon Devices, 2003).

Cuando la mayor parte de las vainas estuvieron llenas (73 DDS), se realizaron conteos del número de vainas llenas por planta y granos por vaina, en cinco plantas con cuatro repeticiones en cada sitio de muestreo. Al final del ciclo (88 DDS) se muestreó la densidad de plantas, la producción de grano para estimar el rendimiento y el peso de 100 granos, ambos al 12% de humedad. Para estimar la producción, se cosecharon 7.6 m² de frijol en cuatro repeticiones. El número de granos por vaina y el número de vainas por planta se utilizaron para calcular el número de granos por planta. Se registraron datos diarios de precipitación durante la estación de crecimiento de las 36 estaciones automáticas de la red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas (Figura 1). Se calcularon las precipitaciones acumuladas cada 10 días de cada mes y todo el ciclo de cultivo.

Para desarrollar el modelo, se utilizaron los datos de 2005 de las siguientes variables: índice de área foliar, número de vainas por planta, granos por vaina y granos por planta, peso de 100 granos, densidad de población, rendimiento de grano y la precipitación acumulada durante diferentes periodos de la estación de crecimiento. Se realizaron análisis de correlación y regresión múltiple utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS, 2001).

Validación del modelo

La validación es el proceso de comparar las estimaciones del modelo con un conjunto independiente de observaciones, para verificar si el modelo funciona como se esperaba (Richardson y Berish, 2003). En este caso, el modelo de frijol fue validado utilizando datos de los años 2006 y 2007, obtenidos de parcelas de productores del estado de Zacatecas.

To develop the model, we used the 2005 data of the following variables: leaf area index, number of pods per plant, grains per pod, and grains per plant, weight of 100 grains, population density, grain yield and accumulated precipitation during different periods of the growing season. A multiple correlation and regression analysis was made using the Statistical Analysis System program (SAS, 2001).

Model validation

Validation is the process of comparing the model with a set of independent observations to verify if the model has been developed as expected (Richardson and Berish, 2003). In this case, the bean model was validated using 2006 and 2007 data gathered from farmers' fields in Zacatecas.

During the 2006 and 2007 growing seasons, LAI was sampled once during the R7 phenological stage, which corresponds to the formation of pods (Schoonhoven and Pastor-Corrales, 1987); since this is the stage of maximum LAI. Later, during the R8 phase (filling of pods), filled pods per plant, grains per pod and density of the population were measured in the same way as in 2005.

A regression analysis was made of the observed yield values for 2006 and 2007 and those estimated by the model. Model precision in the estimation of bean production was based on the following assumptions: for an acceptable R^2 , the slope must not be significantly different from 1 and the intercept must not be significantly different from 0 (White *et al.*, 2007). The estimated values of the model have optimum precision when the slope is close to 1, indicating that for each unit of observed production, there is a corresponding unit of estimated production (Fritz *et al.*, 1997; Khorsandi *et al.*, 1997; Amador-Ramírez *et al.*, 2007).

For comparisons of model performance during the two years (2006 and 2007), the mean squared deviation (MSD) for grain yield was calculated as well as each of its three components: the squared bias (SB), the lack of correlation weighted by the standard deviation (LCS), and the squared difference between standard deviations (SDSD) (Kobayashi and Salam, 2000).

To test the capability of the model to predict bean yield in other important bean-producing areas of Mexico, the bean model was also run using field data from the adjoining state

Durante el ciclo de cultivo de los años 2006 y 2007, se muestreó el IAF solo durante la etapa fenológica R7, la cual corresponde a la formación de vainas (Schoonhoven y Pastor-Corrales, 1987); ya que es la etapa con el mayor IAF. Posteriormente durante la etapa R8 (llenado de vainas), se contaron número de vainas llenas por planta, granos por vaina y densidad de plantas, tal como fueron medidos en el año 2005.

Se realizó una regresión entre los valores observados en el año 2006 y 2007 y los estimados por el modelo. La precisión del modelo en la estimación de la producción fue de acuerdo a las siguientes asunciones: una R^2 apropiada, la pendiente debe ser significativamente igual a uno y el intercepto debe ser significativamente igual a cero (White *et al.*, 2007). La precisión óptima de los valores estimados por el modelo ocurre cuando la pendiente se acerca a uno, que implica que por cada unidad de producción observada, corresponderá una unidad de producción estimada (Fritz *et al.*, 1997; Khorsandi *et al.*, 1997; Amador-Ramírez *et al.*, 2007).

Para la comparación de los resultados del modelo durante los años (2006 y 2007), se calculó la desviación media al cuadrado (DCM) para rendimiento de grano, así como cada uno de sus tres componentes: el sesgo al cuadrado (SC), la falta de correlación ponderada por el desviación estándar (FCDE), y la diferencia al cuadrado entre las desviaciones estándar (DCDE) (Kobayashi y Salam, 2000).

Para probar la capacidad del modelo de predecir el rendimiento de frijol en otras áreas productoras de frijol en México; el modelo también fue validado utilizando datos del estado de Durango, el cual tiene condiciones similares de clima y suelo al estado de Zacatecas. La hipótesis de esta segunda validación fue que debido a las condiciones similares de ambos estados, el modelo desarrollado en Zacatecas, podría también ser utilizado en Durango, para predecir el rendimiento de frijol de temporal con la misma precisión que en Zacatecas.

Los datos de campo de Durango en 34 y 36 parcelas de productores durante los años 2006 y 2007, respectivamente (Figura 2), fueron muestreados tal como se hizo en Zacatecas. Con estos datos el modelo fue validado para cada año. Los datos de precipitación fueron obtenidos de la red de estaciones automáticas de clima de Durango (Figura 2). El análisis estadístico aplicado fue similar al realizado con los datos de Zacatecas.

of Durango, which has similar soil, climate and management conditions as Zacatecas. The hypothesis of this second validation is that due to the similar conditions of the two states, the model developed for Zacatecas can also be used in Durango to predict dry bean yield with the same level of precision as in Zacatecas.

The field data of Durango was sampled just like in Zacatecas, in 34 and 36 farm sites in 2006 and 2007, respectively (Figure 2). With these data, the model was validated for each year, considering sampling sites yield. Precipitation data were obtained from the automatic weather stations network of Durango (Figure 2). The statistical analysis applied was similar to that used for the Zacatecas data.

The total production of the state of Durango for 2006 and 2007 was obtained by multiplying the simulated mean yield of all the sampling sites by the total surface sown to bean in the state. The simulated yield was then compared with actual yield reported by SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera).

RESULTS AND DISCUSSION

Model construction

The best model resulting from the data of yield, yield components, precipitation, and leaf area index of 54 sampling sites during 2005 in the state of Zacatecas is as follows:

$$GY = -555.95916 + 74.52122PDP + 62.86604LAI + 1.33191PPAUG + 0.00515PD - 7.1725GPP$$

Where: GY= grain yield; PDP= number of pods per plant; LAI= leaf area index; PPAUG= precipitation for the month of August; PD= population density; GPP= grains per plant.

The model was highly significant ($p < 0.0001$), $n = 54$ and $R^2 = 0.88$. Its coefficient of determination was good since it explained almost 90% of the total variance, taking into account the great variability in farmland conditions, precipitation, and crop management. Similar to what has been reported by Westermann and Crothers (1977);

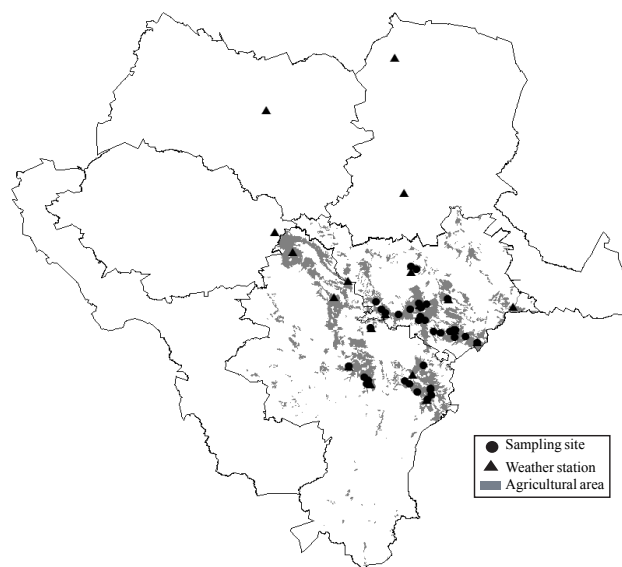


Figure 2. Agricultural areas, sampling sites, and weather stations in 2006 and 2007 in the state of Durango, Mexico.

Figura 2. Áreas agrícolas, sitios de muestreo y estaciones de clima en los años 2006 y 2007 en Durango, México.

La producción total del estado de Durango para 2006 y 2007, se obtuvo multiplicando el rendimiento medio simulado de todos los sitios de muestreo por la superficie total sembrada con frijol. El rendimiento simulado se comparó con el rendimiento real reportado por SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Construcción del modelo

El mejor modelo resultante con los datos de rendimiento, componentes del rendimiento, precipitación e índice de área foliar de los 54 sitios de muestreo del año 2005 en el estado de Zacatecas, fue el siguiente:

$$RG = -555.95916 + 74.52122VPP + 62.86604IAF + 1.33191PPAGO + 0.00515DP - 7.1725GPP$$

Donde: RG= rendimiento de grano; VPP= número de vainas por planta; IAF= índice de área foliar; PPAGO= precipitación del mes de agosto; DP= densidad de plantas; GPP= granos por planta.

Shenkut and Brick (2003), a close relationship was found between yield and its components. In this model, PDP (number of pods per plant) was the component that contributed the most, explaining 82% of the total variance.

Other variables closely related to yield were leaf area index, as has also been previously reported for crops like maize and wheat (Báez-González *et al.*, 2002; Amador-Ramírez *et al.*, 2007), and accumulated precipitation for the month of August, which generally corresponded with the stage of maximum development of the crop, i.e., the stages of flowering and filling of pods (Acosta-Gallegos *et al.*, 1998).

The model was able to predict dryland bean yield production at least one month before the Mexican farmers gathered the bean from the field. This one-month period included the time after the pods had filled and become mature, when the plants were left in the field to allow the grains to dry. According to FAO recommendations, it is not only the length of the growing season that must be taken into account when harvesting but also the degree of maturity of the grain, which must be appropriate to the succeeding treatments. The moisture content is an important factor to consider since the higher the moisture content at harvest time, the higher is the risk of losses due to mold, insects, etc (FAO, 2009).

Model validation

During the validation phase, the model made acceptable estimations for Zacatecas for the growing seasons of 2006 and 2007. The simulation of grain yield under dryland conditions showed a mean error of prediction (simulated minus measured) of 0.25 Mg ha⁻¹ for 2006 and 0.22 Mg ha⁻¹ for 2007. The growth model accounted for 69% of the variability in measured yield in 2006 and 71% for 2007 (Figure 3). These results closely approximate those of bean prediction studies conducted by Amador-Ramírez *et al.* (2007) who reported 65% and 71% accuracy for bean in Zacatecas and Shenkut and Brick (2003) who obtained 65% for bean in Ethiopia. The model satisfied the requirement that statistically, the intercept must not be different from 0 and the slope must not be different from 1 (Table 1) (White *et al.*, 2007). This indicates that the model can be used to predict bean yield in Zacatecas under dryland conditions.

El modelo resultó altamente significativo ($P < 0.0001$), $n = 54$ y $R^2 = 0.88$, su coeficiente de determinación se considera bueno dado que explica casi el 90% de la varianza total, pese a la gran diversidad de condiciones de los terrenos de cultivo, la precipitación y el manejo del cultivo. Al igual que Westermann y Crothers (1977); Shenkut y Brick, (2003) encontraron una alta relación entre el rendimiento y sus componentes, siendo representados en este modelo por VPP el cual resultó con la mayor aportación al modelo, ya que explica el 82% de la varianza total.

Otra variable de alta relación con el rendimiento resultó ser el IAF, la cual ha resultado con alta correlación en diferentes cultivos como maíz, trigo, etc. (Báez-González *et al.*, 2002; Amador-Ramírez *et al.*, 2007), así como la precipitación acumulada durante el mes de agosto, la cual corresponde con la etapa de mayor desarrollo del cultivo, que coincide con las etapas de floración y llenado de vainas (Acosta-Gallegos *et al.*, 1998).

El modelo fue capaz de predecir la producción de frijol de temporal, al menos un mes antes de la cosecha. Este mes incluye el tiempo después que las vainas llenan y llegan a la madurez y secado de grano. Según las recomendaciones de la FAO, no sólo es la longitud de la estación de crecimiento que se debe tener en cuenta cuando se cosecha, sino también el grado de madurez del grano, que debe ser adecuado a los tratamientos posteriores. A mayor contenido de humedad del grano en época de cosecha, mayor será el riesgo de pérdidas debido al moho, insectos, etc (FAO, 2009).

Validación del modelo

En la fase de validación, el modelo predijo estimaciones aceptables para Zacatecas en el ciclo de cultivo primavera-verano 2006 y 2007. La simulación de rendimiento de grano bajo condiciones de temporal mostró un error medio de predicción (estimado menos observado) de 0.25 Mg ha⁻¹ para 2006 y 0.22 Mg ha⁻¹ para 2007. El modelo explicó 69% la variabilidad del rendimiento observado en 2006 y 71% en 2007 (Figura 3). Estos resultados son muy aproximados a estudios de predicción de frijol conducidos por Amador-Ramírez *et al.* (2007) quien reportó 65 y 71% de precisión para frijol en Zacatecas; mientras que Shenkut y Brick (2003) obtuvieron 65% para frijol en Etiopía. El modelo cumplió la demanda estadística, el intercepto no debe ser diferente de 0 y la pendiente no debe ser diferente de 1 (Cuadro 1) (White *et al.*, 2007). Esto indica que el modelo puede ser utilizado para predecir el rendimiento de frijol de temporal en Zacatecas.

Table 1. Modeled yield as a function of observed yield of bean under dryland conditions in the state of Zacatecas and Durango, Mexico.

Cuadro 1. Rendimiento estimado en función del rendimiento observado de frijol de temporal en Zacatecas y Durango, México.

Year	Intercept	Slope	R ²	N
Zacatecas				
2006	144.2	1.16**	0.6907	53
2007	101.3595	1.2373**	0.7172	58
2006-2007	121.1834**	1.1965**	0.7177	111
Durango				
2006	-134.3491	1.595**	0.7411	34
2007	20.7071	1.2228**	0.776	36
2006-2007	-20.5544	1.3596**	0.7283	70

**intercept not significantly different from zero or slope not significantly different from 1 ($p \leq 0.05$).

To measure the overall deviation of the model, the MSD for the two years of data was calculated (Table 2). The MSD value for 2007 was lower than that for 2006 (0.095 vs 0.114). The SB values (0.0619 for 2006 and 0.048 for 2007) show that the accuracy of the model was similar during the two years. The mean and standard deviations of predicted yield during 2006 and 2007 were 0.65 ± 0.29 and 0.5 ± 0.27 Mg ha⁻¹, respectively. On the other hand, the mean and standard deviations of real yield for both years were 0.9 ± 0.4 and 0.72 ± 0.39 Mg ha⁻¹, respectively.

The model showed similar values of LCS during the two years of validation. These results indicate that the model simulated in a similar way the pattern of fluctuations across measurements in the 111 sites regardless of the year, in the same way than Gauch *et al.* (2003). However, the magnitude of yield fluctuations was better simulated in 2006 than in 2007 (SDSD of 0.0129 for 2006 and 0.0148 for 2007) probably because of the different precipitation patterns in the central and southeast regions of Zacatecas.

The use of the model in Durango state with 2006 and 2007 data also had acceptable results since it complied with the requirement that statistically, the intercept must not be different from 0 and the slope not different from 1 (Table 1 and Figure 4). The simulation of grain yield under dryland conditions showed a mean error of prediction (simulated minus measured) of 0.33 Mg ha⁻¹ for 2006 and 0.2 Mg ha⁻¹ for 2007. The growth model accounted for 74% of the variability in measured yield in 2006 and 77% for 2007 (Figure 4). To

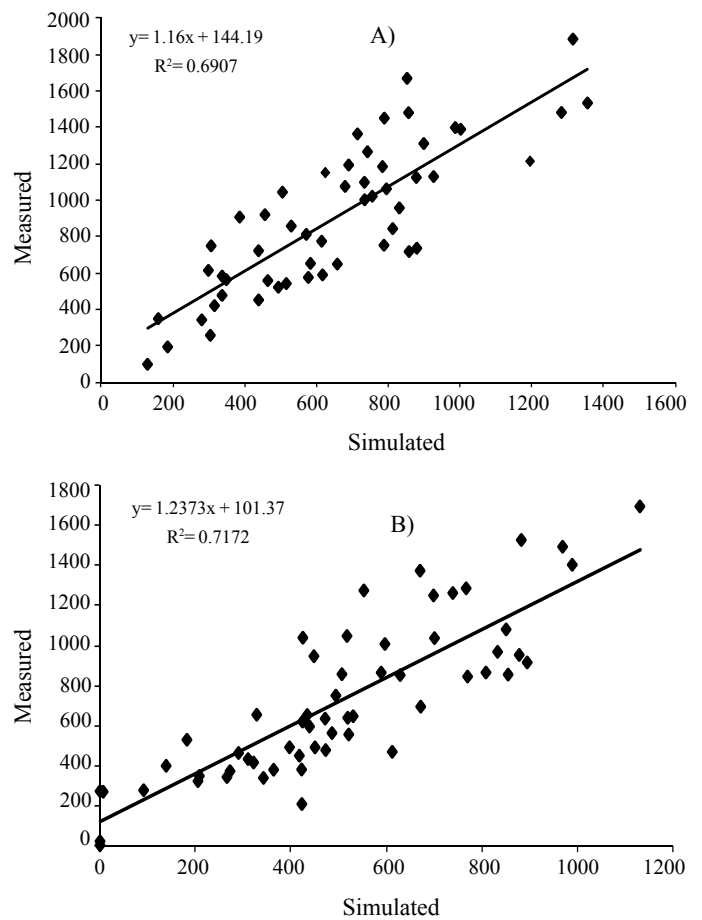


Figure 3. Comparison of simulated and observed bean yield under dryland conditions during 2006 (A) and 2007 (B) spring-summer growing seasons in the state of Zacatecas, Mexico.

Figura 3. Comparación de rendimiento observado y estimado de frijol de temporal en primavera-verano 2006 (A) y 2007 (B) en Zacatecas, México.

Para medir la desviación global del modelo, el MCD de los dos años de datos fue calculado (Cuadro 2). El valor de la DCM para 2007 fue menor que para 2006 (0.095 vs. 0.114). Los valores del SC (0.0619 para 2006 y 0.048 para 2007), muestran que la precisión del modelo fue similar durante los dos años. La media y la desviación estándar de los rendimientos predichos para 2006 y 2007 fueron 0.65 ± 0.29 y 0.5 ± 0.27 Mg ha⁻¹, respectivamente. Por otra parte, la media y las desviaciones estándar de los valores reales de rendimiento para ambos años fueron 0.90 ± 0.4 y 0.72 ± 0.39 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Table 2. Measured and simulated bean yield (Mg ha⁻¹) in sites under dryland conditions in Zacatecas and Durango, Mexico.**Cuadro 2. Rendimiento observado y estimado de frijol (Mg ha⁻¹) en sitios bajo condiciones de temporal en Zacatecas y Durango, México.**

Year of the growing season		Zacatecas		Durango	
		Measured	Simulated	Measured	Simulated
2006	MEAN	0.9018	0.6531	1.1235	0.7886
	SD	0.4044	0.2897	0.5431	0.2931
	RMSE		0.337		0.4645
	MSD		0.1136		0.2232
	SB		0.0619		0.1122
	LCS		0.0388		0.0434
	SDSD		0.0129		0.0676
	2007	MEAN	0.7242	0.5033	1.0135
SD	0.3896	0.2667	0.4953	0.3568	
	RMSE		0.308		0.3166
	MSD		0.0949		0.1006
	SB		0.048		0.0406
	LCS		0.0312		0.05
	SDSD		0.0148		0.0099

SD= standard deviation; RMSE= root mean square; MSD= mean squared deviation; LCS= lack of correlation weighted by standard deviation; SDSD= squared difference between standard deviation; SB= squared bias.

measure the overall deviation of the model in the Durango study, the MSD for the two years of data was calculated (Table 2). The MSD value for 2007 was lower than that for 2006 (0.1006 vs. 0.2232). The SB values (0.1122 for 2006 and 0.0406 for 2007) indicate similar accuracy during the two years. The mean and standard deviations of predicted yield during 2006 and 2007 were 0.79 ± 0.29 and 0.81 ± 0.36 Mg ha⁻¹, respectively, while the mean and standard deviations of real yield for both years were 1.12 ± 0.54 and 1.01 ± 0.5 Mg ha⁻¹, respectively. These values approximate those reported by Báez-González *et al.* (2005) for an LAI-based yield model for maize.

The similar values of LCS during the two years of validation (0.043 for 2006, 0.05 for 2007) show that, just like in Zacatecas, the model simulated in a similar way the pattern of fluctuations across measurements in the 70 sites in Durango regardless of the year (Gauch *et al.*, 2003). However, the magnitude of yield fluctuations was better simulated in 2007 than in 2006 (SDSD of 0.0676 for 2006 and 0.0099 for 2007). As has been explained earlier, this was expected since the quantity and distribution of

El modelo mostró valores similares de FCDE para los dos años de validación; estos resultados indican que el modelo simuló el mismo patrón de fluctuaciones en mediciones de 111 sitios independientemente del año, resultados similares obtuvo Gauch *et al.* (2003). Sin embargo, la magnitud de las fluctuaciones de rendimiento fue mejor simulada en 2006 que en 2007 (DCDE de 0.0129 para 2006 y 0.0148 en 2007), probablemente debido a la diferente distribución de las precipitaciones en la zona centro y sureste de Zacatecas.

El uso del modelo en el estado de Durango con datos de los años 2006 y 2007, también tuvo resultados aceptables ya que se cumplieron los requerimientos estadísticos, el intercepto no debe ser diferente de 0 y la pendiente no debe ser diferente de 1 (Cuadro 1 y Figura 4). La estimación de rendimiento de grano de frijol bajo condiciones de temporal mostró un error medio de estimación (estimado menos observado) de 0.33 Mg ha⁻¹ para 2006 y 0.2 Mg ha⁻¹ para 2007. El modelo explicó 74% la variabilidad del rendimiento observado en 2006 y 77% en 2007 (Figura 4). Para medir la desviación global del modelo en Durango,

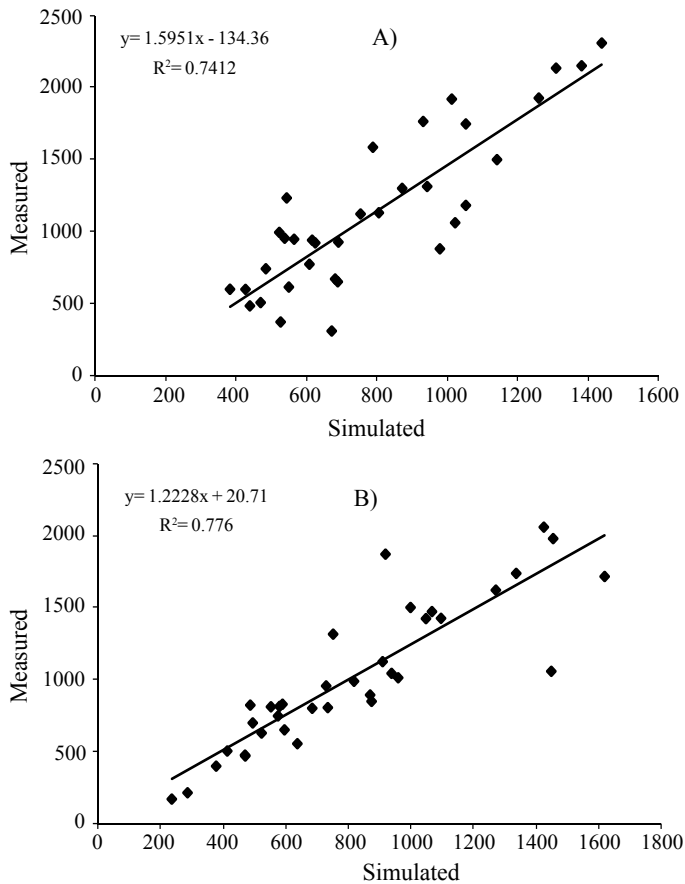


Figure 4. Comparison of simulated and observed bean yield under dryland conditions in the state of Durango during 2006 (A) and 2007 (B) spring-summer growing seasons.

Figura 4. Comparación de rendimiento observado y estimado de frijol de temporal en primavera-verano 2006 (A) y 2007 (B) en Durango, México.

precipitation in the area in 2005 (year of data for model construction) were similar to that in 2007. These results indicate that the bean model can be used to estimate bean grain yield at large scale, covering Zacatecas and Durango, the two most important bean-producing states of Mexico.

Official reports of the yield production of dry bean under non-irrigated condition in Zacatecas showed an average of 0.67 and 0.45 Mg ha⁻¹ for the spring-summer growing seasons of 2006 and 2007, respectively (SIAP, 2009). Considering all sampling sites, the model predicted an average of 0.65 for 2006 and 0.5 Mg ha⁻¹ for 2007 (Table 2). Therefore the error of prediction, was only 0.02 Mg ha⁻¹

fue calculado el MCD de los dos años de datos (Cuadro 2). El valor de la DCM para 2007 fue menor que para 2006 (0.1006 vs. 0.2232). Los valores del SC (0.1122 para 2006 y 0.0406 para 2007) muestran que la precisión del modelo fue similar en los dos años. La media y la desviación estándar de los rendimientos predichos para 2006 y 2007 fueron 0.79 ± 0.29 y 0.81 ± 0.36 Mg ha⁻¹, respectivamente; mientras que la media y las desviaciones estándar de los valores reales de rendimiento para ambos años fueron 1.12 ± 0.54 and 1.01 ± 0.50 Mg ha⁻¹, respectivamente. Estos valores son aproximados a los reportados por Báez-González *et al.* (2005) para un modelo de rendimiento de maíz basado en el IAF.

El modelo mostró valores similares de FCDE para los dos años de validación (0.043 para 2006, 0.05 para 2007); estos resultados indican, al igual que en Zacatecas, el modelo simuló de manera similar el patrón de las fluctuaciones en las mediciones en los 70 sitios en Durango independientemente del año (Gauch *et al.*, 2003). Sin embargo, la magnitud de las fluctuaciones de rendimiento fue mejor simulada en 2007 que en 2006 (DCDE de 0.0676 para 2006 y 0.0099 en 2007). Como se explicó anteriormente, esto se esperaba ya que la cantidad y distribución de las precipitaciones en la zona en 2005 (año de los datos de construcción de modelos) fue similar a la de 2007. Estos resultados indican que el modelo de frijol se puede utilizar para estimar el rendimiento de grano de frijol a gran escala, abarcando Zacatecas y Durango, los dos estados productores de frijol más importantes de México.

Reportes oficiales del rendimiento de frijol bajo condiciones de temporal en Zacatecas, indican una media de 0.67 y 0.45 Mg ha⁻¹ para el ciclo primavera-verano en los años 2006 y 2007, respectivamente (SIAP, 2009). Considerando todos los sitios de muestreo, el modelo predijo un promedio de 0.65 para 2006 y 0.5 Mg ha⁻¹ para 2007 (Cuadro 2). Por lo que el error de predicción fue de sólo 0.02 y 0.05 Mg ha⁻¹ para 2006 y 2007, respectivamente. En el caso de Durango, la media del error de predicción fue 0.03 Mg ha⁻¹ para 2006 y 0.028 Mg ha⁻¹ para 2007, ya que la producción promedio reportada fue de 0.82 Mg ha⁻¹ para 2006 y 0.53 Mg ha⁻¹ para 2007, mientras que el modelo predijo 0.79 y 0.81 Mg ha⁻¹ para 2006 y 2007, respectivamente, (Cuadro 2). Resultados similares sobre rendimiento de frijol, fueron reportados por Amador-Ramírez *et al.* (2007) e indica que independientemente del tipo de modelo, es una necesidad

and 0.05 Mg ha⁻¹ for 2006 and 2007, respectively. In the case of Durango, the mean error of prediction was 0.03 Mg ha⁻¹ for 2006 and 0.028 Mg ha⁻¹ for 2007 since average yield production was reported as 0.82 Mg ha⁻¹ in 2006 and 0.53 Mg ha⁻¹ for 2007 while the model predicted 0.79 Mg ha⁻¹ and 0.81 Mg ha⁻¹ for 2006 and 2007 (Table 2), respectively. Similar results were reported in beans by Amador-Ramírez *et al.* (2007) and notes that regardless of the type of model, there is a necessity to aid predicting dry bean yield in order for farmers in obtaining supports for grain commercialization, and also for decisions makers to predict yield.

CONCLUSIONS

The model using climatic data and data from non-destructive field sampling of leaf area index and yield components was able to predict bean yield of native and improved varieties at large scale in Zacatecas. It showed similar accuracy during the two years of model validation.

The use of the model with data from the neighboring state of Durango likewise showed similar accuracy, indicating that the model developed in Zacatecas has the capacity to predict bean yield in Durango.

Further studies can be made to determine the applicability of the model to neighboring areas with similar climate and crop management conditions. The model has the advantage of including variations in climate since they are implied in the samples of the yield components, which are influenced by this factor.

This modeling methodology is considered an improvement over the prevailing farm-by-farm estimation method that provides yield data weeks after harvest. It has the potential to be used for large-area dry bean yield prediction to benefit governmental decision-making at the regional level.

LITERATURE CITED

Acosta-Díaz, E.; Amador-Ramírez, M. D.; Padilla-Ramírez, J. S.; Gómez-Delgado, J. P. y Valadez-Montoya, H. 2007. Biomasa y rendimiento de frijol tipo Flor de Junio bajo riego y sequía. *Agríc. Téc. Méx.* 33:153-162.

ayudar a pronosticar el rendimiento de frijol para que los agricultores obtengan apoyos para la comercialización de granos, y también para que los tomadores de decisiones sean capaces de predecir el rendimiento.

CONCLUSIONES

El modelo generado que utiliza datos de clima, muestreos de campo no destructivos de índice de área foliar y componentes del rendimiento, fue capaz de predecir el rendimiento del frijol de temporal a escala regional en Zacatecas, de manera similar en los dos años de validación.

El uso del modelo con datos del estado de Durango mostró similar precisión, indicando que el modelo desarrollado en Zacatecas tiene la capacidad de predecir el rendimiento de frijol en Durango.

Se pueden realizar nuevos estudios para determinar la aplicabilidad del modelo a las áreas vecinas con el clima y condiciones similares de manejo de cultivos. El modelo tiene la ventaja de incluir las variaciones en el clima, ya que están implícitos en los muestreos de los componentes del rendimiento, que se ven influidos por este factor.

Esta metodología de modelado se considera una mejora con respecto al método de estimación prevaleciente de encuesta productor por productor que proporciona datos de rendimiento semanas después de la cosecha. Esto tiene el potencial de ser utilizado para la predicción de grandes superficies de frijol de temporal en beneficio de la toma de decisiones gubernamentales a nivel regional.

Fin de la versión en español



- Acosta-Gallegos, J. A.; Acosta-Díaz, E.; Padilla-Ramírez, S.; López-Salinas, E.; Salinas-Pérez, R. A.; Mayek-Pérez, N. and Kelly, D. J. 1998. Seed yield of dry bean cultivars under drought stress. *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 41:151-152.
- Acosta-Gallegos, J. A. and Kohashi-Shibata, J. 1989. Effect of water stress on growth and yield of indeterminate dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Field Crop Res.* 20:81-93.

- Adikua, S. G. K.; Rengerb, M.; Wessolekb, G.; Facklamb, M. and Hecht-Bucholtz, C. 2001. Simulation of the dry matter production and seed yield of common beans under varying soil water and salinity conditions. *Agric. Water Manag.* 47:55-68.
- Amador-Ramírez, M. D.; Acosta-Díaz, E.; Medina-García, G. and Gutiérrez-Luna, R. 2007. An empirical model to predict yield of rainfed dry bean with multi-year data. *Rev. Fitotec. Mex.* 3:311-319.
- Báez-González, A. D.; Chen, P. Y.; Tiscareño-López, M. and Srinivasan, R. 2002. Satellite-based method of estimating corn yield in real time under irrigated and non-irrigated conditions in Mexico. *Crop Sci.* 42:1943-1949.
- Báez-González, A. D.; Kiniry, J. R.; Maas, S. J.; Tiscareño, L. M.; Macias, J. C. M.; Richardson, C. W.; Salinas, J. G. and Manjarrez, J. R. 2005. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model. *Agron. J.* 97:418-425.
- Boote, K. J.; Jones, J. W.; Batchelor, W. D.; Nafziger, E. D. and Myers, O. 2003. Genetic coefficients in the CROPGRO-soybean model: links to field performance and genomics. *Agron. J.* 95:32-51.
- Challinor, A. J.; Wheeler, T. R.; Slingo, J. M.; Craufurd, P.; Grimes, D. I. F. and Chee-Kiat, T. 2004. The development of combined weather and crop yield forecasting systems for the tropics. *Proceedings of 4th International Crop Science Congress*. Brisbane, Australia. 237 p.
- Decagon Devices. 2003. AccuPAR model LP-80, PAR/LAI Ceptometer. Operator's Manual Version 1.0. Decagon Devices Inc. Pullman, WA. 87 p.
- Díaz, M. C. E.; Figueroa, N. R. y Warnock, R. 2001. Estudio del crecimiento y desarrollo de la caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo diferentes densidades de población. II Evolución del índice de área foliar. *Maracay. Rev. Fac. Agron.* 27:55-66.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2009. Agricultural engineering in development-the harvest. URL: <http://www.fao.org/docrep/t0522e/T0522605.htm>.
- Fritz, J. O.; Vanderlip, R. L.; Heiniger, R. W. and Abelhalim, A. Z. 1997. Simulating forage sorghum yields with SORKAM. *Agron. J.* 89:64-68.
- Gauch, H. G.; Hwang, J. T. G. and Fick, G. W. 2003. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. *Agron. J.* 95:1442-1146.
- Hoogenboom, G.; White, J. W.; Jones, J. W. and Boote, K. J. 1994. BEANGRO: a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. *Agron. J.* 86:182-190.
- Infante, N.; Madriz, P. y González, T. 2003. Fases de desarrollo y componentes del rendimiento de tres cultivares de frijol mungo [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] en Maracay, Aragua, Venezuela. *Rev. Fac. Agron.* 20:417-429.
- Khorsandi, F. M.; Boone, Y. L.; Weerakkody, G. y Wishler, F. D. 1997. Validation of the soil temperature subroutine HEAT in the cotton simulation model GOSSYM. *Agron. J.* 89:415-420.
- Kobayashi, K. and Salam, M. U. 2000. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agron. J.* 92:345-352.
- Lobell, D. B.; Ortiz-Monasterio, J. I. and Falcon, J. I. 2007. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data. *Agric. Syst.* 92:76-90.
- Medina, G. G. y Ruiz, C. J. A. 2004. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Zacatecas (periodo 1961-2003). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas. Calera de V. R. Zacatecas. Libro técnico. Núm. 3. 240 p.
- Medina, G. G.; Díaz, P. G.; López, H. J.; Ruiz, C. J. A. y Silva, M. M. 2005. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango. (1961-2003). INIFAP-CIRNOC-CEVAG. Durango, Durango, México. Libro técnico. Núm. 1. 224 p.
- Moreau-Valancogne, P.; Coste, F.; Crozat, Y. and Dürr, C. 2008. Assessing emergence of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) seed lots in France: field observations and simulations. *Europ. J. Agronomy.* 28:309-320.
- Murthy, V. R. K. 2004. Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. *In: satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*. Ed. Sivakumar, M. V. K.; Roy, P. S.; Harmsen, K. and Saha, S. K. 235-261 pp.
- Nielsen, D. C. and Nelson, N. O. 1998. Black bean sensitivity to water stress at various growth stages. *Crop Sci.* 38:422-427.
- Nienhuis, J. and Singh, S. P. 1988. Genetics of seed yield and its components in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) of middle-america origin. *Plant Breed* 101:155-163.

- Padilla, R. J. S.; Acosta, D. E.; Gaytán, R. B. y Rodríguez, V. M. M. 2005. Índice de área foliar en frijol de temporal y su relación con biomasa y rendimiento. *Agric. Téc. Méx.* 31:213-219.
- Pedersen, P.; Boote, K. J.; Jones, J. W. and Lauer, J. G. 2004. Modifying the CROPGRO-soybean model to improve predictions for the upper Midwest. *Agron. J.* 96:556-564.
- Ramírez-Vallejo, P. and Kelly, J. D. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica*. 99:127-136.
- Richardson, J. and Berish, C. 2003. Data and information issues in modeling for resource management decision making: communication is the key. *In: Dale, V. H. (Ed). Ecological Modeling for Resource Management*. Springer. New York. 167-179 pp.
- Schoonhoven, A. y Pastor-Corrales, M. A. 1987. Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 56 p.
- Shenkut, A. A. and Brick, M. A. 2003. Traits associated with dry edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.) productivity under diverse soil moisture environments. *Euphytica*. 133:339-347.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2009. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON) Versión 2007. México. URL: <http://www.siap.gob.mx>.
- Singer, J. W.; Malone, R. W.; Meek, D. W. and Drake, D. 2004. Predicting yield loss in indeterminate soybean from pod density using simulated damage studies. *Agron. J.* 96:584-589.
- Singh, P. S. 1995. Selection for water stress tolerance in interracial populations of common bean. *Crop Sci.* 35:118-124.
- Statistical Analysis System (SAS). 2001. SAS/STAT Users' Guide. SAS Institute, Inc. Release 8.02. SAS Inc. Cary, NC.
- Tanaka, A. and Yamaguchi, J. 1977. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz. Talleres gráficos del Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 124 p.
- Tsubo, M.; Walker, S. and Ogindo, H. O. 2005. A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions. I Model development. *Field Crops Res.* 93:10-22.
- Van Den Berg, M. and Smith, M. T. 2005. Crop growth models for decision support in the South African sugarcane industry. *Proc S. Afr. Sug. Technol. Ass.* 79:495-509.
- Villalobos, F. R. y Retana, J. A. 2003. Validación de CROPGRO-drybean, un modelo de simulación del crecimiento y desarrollo del cultivo de frijol en Los Chiles, Costa Rica. *Top. Meteor. Oceanog.* 10:63-68.
- Waring, R. H.; Schroeder, P. E. and Oren, R. 1982. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. J. For. Res.* 12:556-560.
- Westermann, D. T. and Crothers, S. E. 1977. Plant population effects on the seed yield components of bean. *Crop Sci.* 17:493-496.
- White, J. W. 1988. Conceptos básicos de la fisiología del frijol. Guía de estudio. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali, Colombia. 55 p.
- White, J. W.; Boote, K. J.; Hoogenboom, G. and Jones, P. G. 2007. Regression-based evaluation of ecophysiological models. *Agron. J.* 99:419-427.