

ESTUDIOS DE CAMBIO CLIMATICO EN COSTA RICA

ESTUDIOS DE CAMBIO CLIMATICO EN COSTA RICA

COMPONENTE AGRICOLA

EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE COSTA RICA AL CAMBIO CLIMATICO

CASO DE ESTUDIO: FRIJOL

SAN JOSÉ - COSTA RICA

MINISTERIO DEL AMBIENTE Y ENERGIA



INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL



COASTAL ZONE MANAGEMENT CENTRE



COMITE REGIONAL DE RECURSOS HIDRAULICOS



ESTUDIOS de CAMBIO CLIMATICO en COSTA RICA

COMPONENTE AGRICOLA

**EVALUACION DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMATICO
SOBRE LA PRODUCCION AGRICOLA DE COSTA RICA**

CASO DE ESTUDIO: FRIJOL

Roberto Villalobos Flores

José A. Retana Barrantes

MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGIA

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL

THE INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, VRIJE UNIVERSITY, AMSTERDAM

San José, Costa Rica

1999

ANTECEDENTES

Las emisiones resultado de la industrialización, la rápida deforestación y la producción energética con base en combustibles fósiles, han aumentado la concentración de gases con efecto invernadero en la atmósfera, incluyendo el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y clorofluorocarbonos (CFCs). Estos gases atrapan la radiación del sol reflejada por la superficie de la tierra hacia la atmósfera, y aumentan el efecto invernadero natural, esta mayor capacidad de retención de radiación está produciendo un calentamiento global que está cambiando el clima del mundo, principalmente a través de incrementar la temperatura, alterando los patrones de lluvia y elevando el nivel del mar.

La destrucción de bosques y el uso inapropiado del manejo de algunos cultivos, han contribuido en alto grado a la emisión de dióxido de carbono, razón por lo cual, según las proyecciones de los científicos que examinan el clima del planeta, las condiciones ambientales futuras podrían modificarse.

Bajo la hipótesis de que en los próximos 50 años la concentración actual de CO₂ atmosférico se podría duplicar como producto de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la actividad humana, los Modelos de Circulación General (GCM), estiman que se producirán incrementos en la temperatura, la evaporación y la transpiración, así como cambios en el régimen pluviométrico (McKenney y Rosenberg, 1993).

Considerando que los procesos fisiológicos en los organismos vegetales, tales como la respiración, fotosíntesis y transpiración, transcurren solamente a determinadas temperaturas, la temperatura del aire tiene una gran importancia en la vida de las plantas (Chacón, 1985).

Evidentemente, cualquier alteración en el patrón climático va a incidir directamente en la respuesta de los cultivos al medio, por lo que, las condiciones climáticas resultantes de este calentamiento, afectarían tanto a la actividad agrícola como a su entorno biológico, alterando la distribución e incidencia de malezas, plagas y enfermedades (Porter *et al.*, 1992; Patz *et al.*, 1996).

1. CASO DE ESTUDIO: CULTIVO DE FRIJOL

1.1. INTRODUCCIÓN

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) Es una leguminosa de rápido crecimiento. En Costa Rica es la leguminosa alimenticia de mayor consumo y constituye la principal fuente de proteína (18 a 25%) para la población de menores recursos económicos (Alfaro, 1983). El frijol se cultiva en una gran diversidad de climas, con diferentes altitudes sobre el nivel del mar. La Región Huetar Norte de Costa Rica (Caribe Norte), principalmente los cantones de Los Chiles y Upala, se han constituido en la principal zona semillera debido a que la topografía de la región, la receptividad del agricultor a este cultivo y las condiciones agroclimáticas propias de la zona, han permitido que la actividad se incremente, lo que se refleja en el aporte (52%) que esta zona ha hecho en los últimos cinco años a la producción nacional de este grano (Carrillo, 1996).

En las plantas de frijol, el primer producto de la fotosíntesis es un compuesto de tres carbonos, este tipo de mecanismo suele llamarse metabolismo fotosintético C₃, mediante el cual, la fijación de CO₂ depende de una serie de reacciones que implican la pérdida de carbono y energía; este proceso se denomina fotorespiración. Bajo condiciones de alta temperatura (mayor a 30°C) y baja disponibilidad de agua, las plantas de frijol son menos eficientes en términos fotosintéticos, que especies tropicales como el maíz, la caña de azúcar o el sorgo, que producen compuestos de cuatro carbonos (C₄), y usan mecanismos de fijación del CO₂ que evitan la fotorespiración. Se reporta que los mayores rendimientos de esta leguminosa se obtienen en zonas con temperaturas entre 18 y 24°C. Temperaturas mayores de 27°C producen caída de flores y reducen el número de granos en la vaina (White, 1985).

El frijol es una planta que requiere que la humedad se distribuya uniformemente. Precipitaciones fuertes pueden ocasionar pérdidas en la floración y el volcamiento de las plantas. Por otra parte, la maduración y la cosecha se deben producir en un ambiente seco. La precipitación es precisamente un factor limitante de producción, debido especialmente a su irregular distribución (Monge, 1981).

Estudios que permitan vislumbrar posibles impactos de un eventual cambio climático sobre actividades agrícolas tradicionales, se deben constituir en punto de partida para los tomadores de decisiones, razón por lo cual, se pretende concretar a través de este estudio, los siguientes objetivos específicos.

A.-Analizar los posibles efectos de la variación de la temperatura del aire y la precipitación sobre la fisiología general del cultivo de frijol, específicamente representado por la variedad Brunca, en la Región Huetar Norte de Costa Rica.

B.-Analizar el impacto de las variaciones climáticas sobre la producción de biomasa y el rendimiento de esta variedad de leguminosa.

C.-Sugerir medidas de mitigación, con base en las implicaciones socioeconómicas que los efectos de estas variaciones climáticas tengan sobre la actividad frijolera nacional.

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) cuenta con el modelo de simulación de crecimiento CROPGRO-Dry Beans, el cual forma parte de un Sistema de Soporte de Decisiones para la Transferencia de Agrotecnología (DSSAT). El DSSAT es un programa para microcomputadoras que combina bases de datos de suelos, cultivos y climas, con programas de aplicación que simulan el crecimiento y desarrollo de varios cultivos, permitiendo establecer estrategias de manejo y comparar las salidas del modelo con los datos observados. El sistema contempla un programa de "Manejo de Bases de Datos" (MDS), modelos de cultivos, análisis de estrategias y un simulador climático. Este último, le permite al usuario realizar cambios climáticos para simular la respuesta del cultivo a diferentes escenarios (IBSNAT, 1989).

La validación del modelo requirió de la obtención de información real de cuatro componentes principales: suelo, planta, clima y manejo de cultivo. Los datos referentes a estos componentes se tomaron de la zona frijolera más importante del país, el cantón de Los Chiles en la Región Huetar Norte. Territorialmente esta área pertenece al cantón XIV de la provincia de Alajuela (Los Chiles). Regionalmente se asienta en la subvertiente norte de Costa Rica formando parte de las Llanuras Aluviales de Los Guatusos. Las coordenadas medias están dadas por 10°51'28" de latitud norte y 84°40'37" de longitud oeste, a una altitud de 43 msnm. Se ubica en la hoja topográfica de Medio Queso, en las coordenadas planas en latitud 325 a 326, longitud 463 a 464.

Sobresale el relieve plano ondulado con pendientes de 5 a 15 % y la altura media es de 43 metros sobre el nivel del mar. Hacia el noroeste se presenta una pequeña franja con relieve accidentado y pendientes del 15 al 30%.

El sistema fluvial forma parte de la subvertiente norte de la vertiente Caribe. Hidrográficamente el área forma parte de la cuenca del río San Juan y se ubica dentro de la subcuenca del Río Medio Queso, con cercanía de las cuencas de los ríos Pocosol, Frío y Zapote.

La vegetación es de tipo bosque húmedo. Según Tosí (1969), Los Chiles presentan condiciones bioclimáticas que la ubican dentro de la zona de vida Bosque Tropical, transición a seco. El área está influenciada por el régimen de precipitación del Caribe. Presenta un clima tropical húmedo, aunque sus características climáticas no pueden generalizarse (al igual que en toda la vertiente del Caribe y subvertiente norte).

Según la estación meteorológica ubicada en Los Chiles, la temperatura promedio mensual es de 25.6 °C, con una máxima promedio de 30.2 °C y una mínima de 21.0 °C. Se presentan normalmente unas 4 horas de brillo solar como promedio mensual, que corresponden a una radiación aproximada de 14.4 Mj/m². El promedio de precipitación anual es de 2250 mm, distribuidos a todo lo largo del año, pero se destaca una merma pronunciada durante los meses de enero, febrero, marzo y abril.

Los suelos en esta región son en su mayoría Hidromorfos (Turbas, Gley, Húmicos y bajos en humus), (Bodenhassen,1978). Tradicionalmente los suelos se dedican a uso extensivo, cultivos permanentes, ganadería y bosques en suelos latosoles.

Según Hernández y Vahrson (1991) esta área presenta peligro de avalanchas cercanas al cauce del río Hernández y del río Medio Queso. No hay amenazas por lluvias intensas o inundaciones.

Cuadro 1. Aspectos generales del área de estudio

Relieve	Hidrografía	Clima	Vegetación	Suelos	Uso Potencial	Amenazas
Pendiente ondulada 5 a 15 %	Cuenca del río San Juan Subcuenca del río Medio Queso	Tropical Húmedo (temperatura media 22°C precipitación anual 2000-3000 mm)	Bosque Húmedo	Hidromorfos	-Extensivo -Ganadería -Forestal	Avalancha sobre el cauce del río Medio Queso

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional. 1999

1.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de la información necesaria para la calibración del modelo, se estableció un ensayo de campo en la localidad El Parque, cantón Los Chiles, provincia de Alajuela, a 10°57' de latitud y a 84°40' de longitud, y a 40 msnm. La ubicación del ensayo en esta zona, obedeció al asesoramiento de funcionarios del Programa de Investigación y Transferencia Tecnológica Agrícola del frijol (PITTA frijol), los cuales consideran que esta región es la mayor productora de semilla de frijol en la actualidad. Para evaluar las variables agronómicas y de producción, el ensayo se diseñó bajo un arreglo de cuatro repeticiones, en una parcela de terreno de aproximadamente 300 m², en topografía plana.

La variedad de frijol utilizada es la Brunca, de color negro y alta precocidad (35 días a floración, 75 días a cosecha) (ONS, 1987). Se sembró manualmente a espeque (tres semillas por golpe), con una distancia entre plantas de 0,35m, y 0,45m entre surcos, para una densidad promedio de 270.000 plantas/ha.

Se determinó la humedad volumétrica del suelo por el método gravitacional (González, 1980). Además, se realizó un análisis de fertilidad y textura de suelo en el laboratorio de suelos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Con base en el análisis de fertilidad del suelo, se fertilizó con úrea a los 20 días después de la siembra (dds). Se aplicó abono foliar a los 25 dds para corregir posibles deficiencias de elementos menores, y se reforzó con 12-24-12 al mes dds.

El combate de plagas se hizo con atomizaciones de metamidofos. El combate de malezas se realizó en forma manual.

Con la finalidad de dar seguimiento, determinar las variables agronómicas buscadas y estimar la duración en días fototérmicos de algunos estados fenológicos (altura de planta, densidad, biomasa por órganos, contenido de nitrógeno a prefloración y a cosecha, índice de área foliar, tamaño máximo de hoja, índice de crecimiento, índice de cosecha, producción promedio de vainas por planta, producción promedio de grano, porcentaje de envainado, peso promedio de semilla, número promedio de semillas por vaina,

número de semillas por metro cuadrado, biomasa total, número final de hojas, contenido de nitrógeno en la biomasa total, tiempo a floración, tiempo a primera vaina, tiempo a primera semilla, tiempo a madurez fisiológica, tiempo a final de expansión foliar, duración de llenado de vainas, entre otros.), se muestrearon los 10 primeros y los 10 últimos surcos de la parcela, dejando los surcos centrales para evaluar variables de producción. El diseño contempló los dos primeros surcos de borde a lo largo de la parcela y dos metros de distancia a lo ancho, como marco de la parcela. De esta forma se asegura que las plantas a muestrear estaban en competencia perfecta, eliminando el efecto de borde. El cálculo de biomasa se determinó como peso de materia seca. El contenido de nitrógeno total a floración y a cosecha, se realizó en los laboratorios del CIA. El índice de área foliar y el tamaño máximo de las hojas se calculó por medio del método de Burd y Lomas (1976).

Para medir las variables climáticas, se instaló dentro de la parcela (cercana a la línea de borde), a dos metros sobre el nivel del suelo, una estación meteorológica automática tipo W2000 Weather Watch, de la Campbell Scientific Inc., la cual fue programada mediante su propio software (PC208), con la finalidad de obtener lecturas horarias de temperaturas máxima y mínima del aire, humedad relativa del aire, presión de vapor, radiación solar, ráfaga máxima de viento, velocidad del viento y dirección predominante, total de lluvia en 24 horas, además de calcular la evapotranspiración en 24 horas de acuerdo al método Penman-Monteith (Monteith, 1981).

El Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), por medio del Departamento de Uso y Planificación de Suelos, proveyó al IMN del Sistema de Recursos Naturales de Costa Rica (RNCR), que cuenta con la base de datos de suelos a nivel nacional, de la cual se obtuvo la información general necesaria para construir el archivo de suelos.

Los datos estadísticos de producción y rendimiento utilizados en la validación del modelo, son los reportados por el Consejo Nacional de Producción (CNP) y la Secretaría Ejecutiva de Planificación del Sector Agrícola (SEPSA).

La información edáfica, agrícola y climática obtenida durante la duración del ensayo, fue digitalizada en formato compatible con el DSSAT, sistema bajo el que opera el modelo CROPGRO Dry Bean. Con esta información debidamente organizada, se construyeron los archivos de entrada para calibrar el modelo. Los datos obtenidos permitieron fijar algunos coeficientes genéticos propios de la variedad Brunca, adecuar los datos referentes a labores culturales (siembra, fertilización, manejo fitosanitario) y enmarcar la producción en condiciones puntuales de clima y suelo. De esta forma el panorama base tiene mayor sustento para la corrida del modelo. Una vez alimentado el sistema con toda la información necesaria, se corrió el modelo de simulación para su calibración y validación. Para la calibración, se utilizó el set de datos correspondientes al año de establecimiento del ensayo de campo (1997). Para la validación se utilizó el registro histórico de rendimientos (kg/ha) del cantón de Los Chiles, que va de 1980 a 1996. La validación se realizó con base a la variable rendimiento, ya que es la única que cuenta con una serie de tiempo aceptable para fines estadísticos. Para los efectos de validar el modelo se calcularon los siguientes estadísticos sugeridos por Fox (1981) y Willmott (1982):

a)- El sesgo, el cual puede ser descrito por el error de apartamiento medio (MBE), que corresponde a la diferencia entre el valor medio estimado (E) y el valor medio observado (O).

$$MBE = n^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (1)$$

donde:

n es el número de casos,

E_i es el valor estimado,

O_i es el valor observado.

b)- La variabilidad de (E-O) respecto de MBE (DS^2), que puede ser descrita mediante:

$$DS^2 = (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i - MBE)^2 \quad (2)$$

donde:

DS^2 es la varianza de la distribución de las diferencias.

c)- El promedio de las diferencias, que puede ser descrito por:

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

donde:

RMSE es la raíz del cuadrado medio del error (MSE).

d)- El error absoluto medio (MAE), que se describe como:

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (4)$$

e)- La desviación estándar de la variable observada (DS_{E0}).

f)- La desviación estándar de la variable estimada (DS_{Ee}).

g)- La intercepción (a) y la pendiente (b) de la ecuación de regresión de mínimos cuadrados.

$$\hat{E}_i = a + b \times O_i \quad (5)$$

h)- Un índice de concordancia (d) como medida descriptiva del buen ajuste del modelo.

$$d = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^n (|\hat{E}_i| + |\hat{O}_i|)^2 \right] \quad (6)$$

donde:

$$0 \leq d \leq 1$$

$$\hat{E}_i = E_i - E$$

$$\hat{O}_i = O_i - O$$

También es importante conocer cuánto del error es de naturaleza sistemática y cuánto no lo es. El error sistemático puede ser descrito como:

$$MSE_s = n^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{E}_i - O_i)^2 \quad (7)$$

Mientras que el error no sistemático está representado por:

$$MSE_u = n^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2 \quad (8)$$

donde $MSE = MSE_s + MSE_u$

La información meteorológica necesaria para este estudio se tomó del banco de datos del IMN, el cual contiene información proveniente de la región Huetar Norte. Para alimentar el modelo, se reestructuró el formato de la serie de datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima y radiación solar de las estaciones Los Chiles (11°02' de latitud norte y 84°43' de longitud oeste, 40 msnm) y Upala (10°54' latitud norte y 85°10' de longitud oeste, 50 msnm). De esta manera se conformó una serie representativa de la zona.

En términos generales para nuestra latitud, tanto temperatura como horas de brillo solar o radiación solar, se mueven dentro de rangos de poca amplitud a través del año. La precipitación por el contrario, está sujeta a distribuciones y magnitudes variables en el tiempo y el espacio, que son particularmente sensibles a la estacionalidad anual y a la presencia de eventos atmosféricos extraordinarios (huracanes, ocurrencia del fenómeno El Niño, por ejemplo). Estas características hacen de la precipitación un elemento meteorológico limitante para la producción agrícola. Debido a lo anterior, fue necesario caracterizar un año típico-normal de lluvia, para poder usarlo como base de los estudios de simulación de cambio climático. Para lograr este objetivo, se analizó el registro de precipitación de la zona, que abarca 36 años de información (desde 1961 hasta 1997). Los datos faltantes de la serie fueron estimados mediante un generador climático estadístico incorporado al DSSAT.

Se analizó la distribución del Total de Precipitación Anual (TPA), para todo el registro de años, encontrándose una distribución de la precipitación cercana a la normal para cinco grupos de años con características pluviométricas similares (figura 1). Como criterio de separación de clases se usó el promedio, la primera y segunda desviación estándar de la serie. Se conformaron los siguientes grupos: seco, seco-normal, normal, lluvioso-normal y lluvioso.

Una vez obtenidos los grupos de años, se procedió a definir sus características promedio según el comportamiento de la lluvia mensual, la lluvia acumulada por mes, el porcentaje de aporte, el total de días con lluvia acumulados por mes y el porcentaje que esto significa. Con esta información se caracterizó el comportamiento promedio de un año seco, normal y lluvioso. Del grupo de años clasificado como normal, se tomó uno para usarlo como testigo en el corrimiento del modelo sobre distintos escenarios climáticos.

Se estableció como modelo de un cambio global, el criterio del Programa Centroamericano sobre Cambio Climático (PCCC), el cual se basa en los pronósticos de los modelos de circulación general (GISS y GCM) (Campos, 1998). Se consideró que los rangos de variación máxima en la precipitación diaria serían de -20 y +20%, mientras que el rango de variación moderada serían de -10 y +10%. Las variaciones en la temperatura media se establecieron en +1 y +2°C, y se consideró la posibilidad de que la concentración de CO₂ se duplique, por lo que los escenarios propuestos fueron los siguientes:

- 1) Testigo (año 1988).
- 2) +1°C en la temperatura máxima y mínima, y +10% en la precipitación.
- 3) +1°C en la temperatura máxima y mínima, y +20% en la precipitación.
- 4) +2°C en la temperatura máxima y mínima, y +10% en la precipitación.
- 5) +2°C en la temperatura máxima y mínima, y +20% en la precipitación.
- 6) +1°C en la temperatura máxima y mínima, y -10% en la precipitación.
- 7) +1°C en la temperatura máxima y mínima, y -20% en la precipitación.
- 8) +2°C en la temperatura máxima y mínima, y -10% en la precipitación.
- 9) +2°C en la temperatura máxima y mínima, y -20% en la precipitación.
- 10) +1°C en la temperatura máxima.
- 11) +1°C en la temperatura mínima.
- 12) +2°C en la temperatura máxima.
- 13) +2°C en la temperatura mínima.
- 14) +1°C en la temperatura máxima y mínima
- 15) +2°C en la temperatura máxima y mínima.

- 16) -10% en la precipitación
- 17) -20% en la precipitación.
- 18) +10% en la precipitación.
- 19) +20% en la precipitación.
- 20) +2°C en la temperatura máx. y mín., +20% en la precipitación y +2 CO₂.
- 21) +2°C en la temperatura máx. y mín., -20% en la precipitación y +2 CO₂.
- 22) +2°C en la temperatura máx. y mín. y +2 CO₂.
- 23) +2 CO₂.

1.3. RESULTADOS

Como resultado del análisis de la serie de precipitación, se obtuvieron cinco grupos de años con características pluviométricas similares.

Años lluviosos	TPA > 2700mm
Años normales-lluviosos	TPA entre 2500 y 2700mm
Años normales	TPA entre 2000 y 2500mm
Años normales secos	TPA entre 1800 y 2000mm
Años secos	TPA < 1800mm

En la figura 1 se muestra la frecuencia de los años por grupo. Puede observarse que el mayor número de casos corresponde al grupo normal, mientras que para los demás grupos, la distribución es muy semejante.

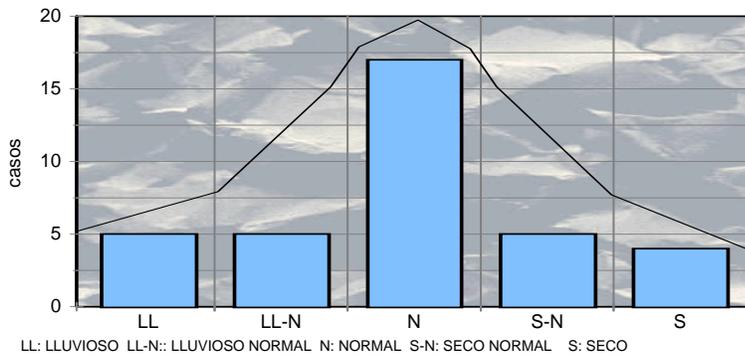


Figura 1. Distribución del Total de Precipitación Anual (TPA) en cinco grupos de años con características pluviométricas similares

El comportamiento mensual de los promedios de los tres grupos principales (se excluyen los grupos de transición) se puede observar en la figura 2.

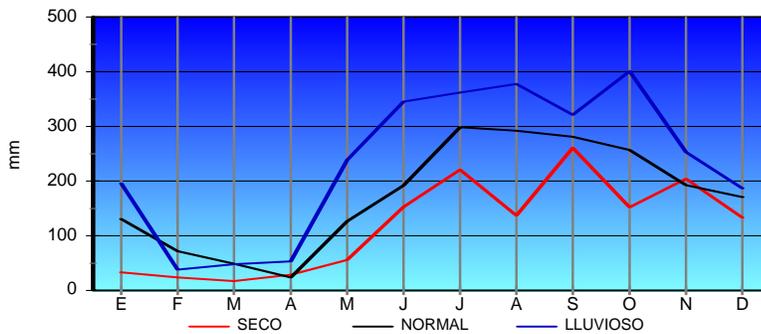


Figura 2. Comportamiento mensual del promedio de los grupos seco, normal y lluvioso.

El comportamiento promedio de un año normal, se caracteriza por tener un TPA comprendido entre los 2000 y 2500 mm. Posee dos períodos bien definidos: uno notablemente lluvioso desde mayo a noviembre, y otro de disminución progresiva del régimen pluviométrico a partir de diciembre y hasta abril, momento en que se espera el mínimo. Los meses más secos en promedio son marzo y abril, mientras que los más lluviosos en promedio son julio y octubre.

El promedio de días con lluvia (\geq a 1,0mm se consideró como día con lluvia), para años normales es de 185. La distribución mensual se puede observar en la figura 3.

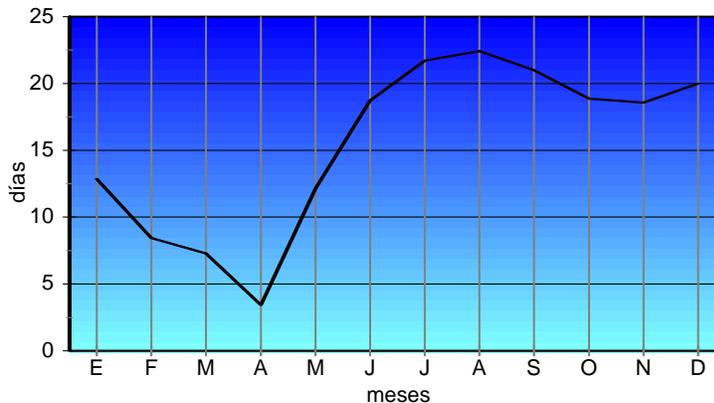


Figura 3. Comportamiento promedio mensual de los días con lluvia para el grupo de años normal. Los Chiles-Upala.

La plataforma que soportó la corrida del modelo con diferentes escenarios climáticos que simularan un cambio global, se basó en la selección de un año con precipitación normal, el año 1988. Los resultados de la calibración se presentan en el cuadro 2, donde se puede comprobar el grado de ajuste del modelo con respecto a los datos derivados del análisis de campo.

Cuadro 2. Resultados en algunas variables en la calibración del modelo CROPGRO Dry Bean.

Variable	Valores estimados	Valores observados
Días a floración	37	37
Días a primera vaina	42	42
Días a primera semilla	58	58
Días a madurez fisiológica	68	68
Rendimiento (kg/ha)	904	895
Peso promedio de semilla (g)	0,180	0,173
Semillas por vaina	6,22	5,80
Máximo Índice de área foliar	5,67	6,00
Índice de cosecha (kg/kg)	0,264	0,510
Hojas en tallo principal	13,04	12,75
Nitrógeno en semilla (kg n/ha)	34	65,75
Nitrógeno en biomasa (kg n/ha)	84	88,87
Nitrógeno en tallo (kg n/ha)	28	14,58
Nitrógeno en semilla (%)	3,76	4,30

En cuanto a la validación del modelo, la figura 4 muestra como los datos de rendimiento estimado se agrupan cercanos a la línea de relación 1:1, balanceándose en el valor medio de los valores estimados (\bar{R}_e , cuadro 3). La desviación estándar de los datos estimados (DS_{Re}) es similar a la de los datos reales (DS_{Ro}), lo cual representa un razonable grado de agrupamiento y distribución de los datos estimados.

Los parámetros de regresión "a" y "b" permiten determinar que la tendencia de los resultados del modelo es muy cercana a los rendimientos reales (relación 1:1), en vista de que "a" tiende a cero y "b" a la unidad.

En general, como se puede apreciar en el cuadro 3, se encontró un coeficiente de determinación (r^2) de 97% (0,967), que corresponde al porcentaje de las observaciones que son explicadas por el modelo. La relación entre las variables es positiva y corresponde a un 98% (0,983) de coeficiente de correlación (r). El índice de concordancia (d) es de 99% (0,991), el cual indica que el modelo presenta solo un 1% de imprecisión con respecto a lo observado. El hecho que los rendimientos usados para validar el modelo corresponden específicamente al cantón de Los Chiles y que éste posee una topografía plana en una área relativamente pequeña, que contribuye a homogenizar el clima, pueden ser argumentos que demuestren cómo la información de una sola estación meteorológica explica la variación productiva del cantón.

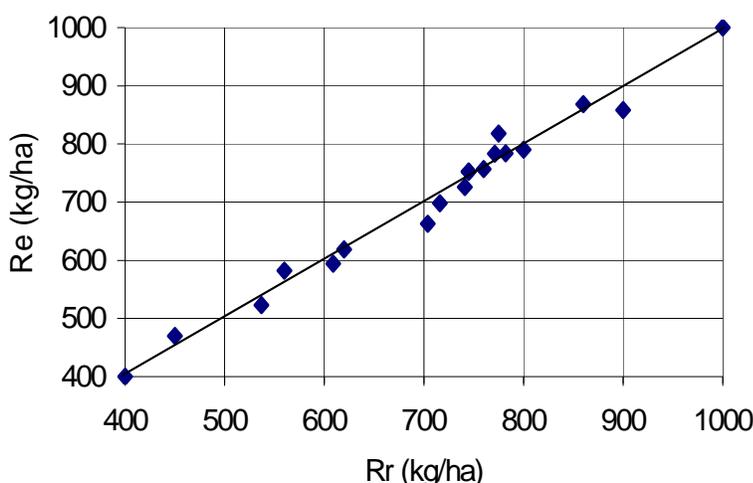


Figura 4. Rendimiento observado (R_o) y Rendimiento estimado (R_e) al utilizar el modelo CROPGRO-Dry Bean.

Cuadro 3. Medidas cuantitativas sobre la evaluación del modelo.

\bar{R}_o	\bar{R}_e	DS_{R_o}	DS_{R_e}	a	b	MAE	RMSE	$RMSE_s$	$RMSE_U$	d	r^2
710,3	708,1	114,8	112,4	24,57	0,96	16,47	21,10	4,87	20,53	0,99	0,97

Los términos b, d y r^2 son adimensionales, los otros términos tienen unidades de kg/ha.

Considerando los resultados obtenidos en las corridas del modelo, se puede establecer que como resultado neto de los procesos metabólicos, la planta de frijol puede describirse como una máquina productora de materia seca, por eso, la medición y análisis del desarrollo de la planta es importante para obtener algún entendimiento de lo que sucede con los productos derivados de la fotosíntesis (asimilados), durante las diferentes fases de desarrollo. Durante el período de crecimiento, los asimilados se invierten principalmente en la producción de hojas, tallos y raíces. La distribución de estos asimilados en la planta, está muy influenciada por los factores climáticos y por el estado fenológico de la planta.

La Figura 5 describe el seguimiento del peso seco de hojas y tallos durante el ciclo del cultivo, el cambio en las pendientes de las curvas de ajuste pareciera indicar que los asimilados a hoja son los primeros en ser utilizados por la planta en la producción de los órganos reproductivos y llenado del grano.

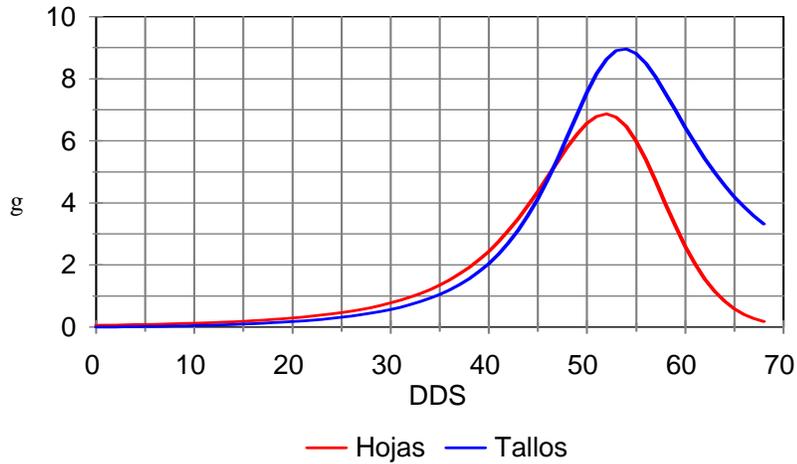


Figura 5. Peso seco de tallos y hojas, días después de siembra (DDS).

La Figura 6 representa el peso seco de las vainas y del grano. El peso de las vainas aumenta hasta aproximadamente 17 días después de floración (DDF), cuando las vainas alcanzan su tamaño máximo, lo cual coincide con lo reportado por White (1985). A partir del día 15 DDF, el peso del grano aumenta marcadamente y alcanza su estabilidad alrededor de los 20 DDF. Este proceso requiere la traslocación de los asimilados al grano, razón por la cual, a partir de los 50 días después de siembra (DDS), el peso seco de las hojas disminuye rápidamente. Un proceso similar ocurre con el peso seco de los tallos, pero unos días más tarde (Figura 5).

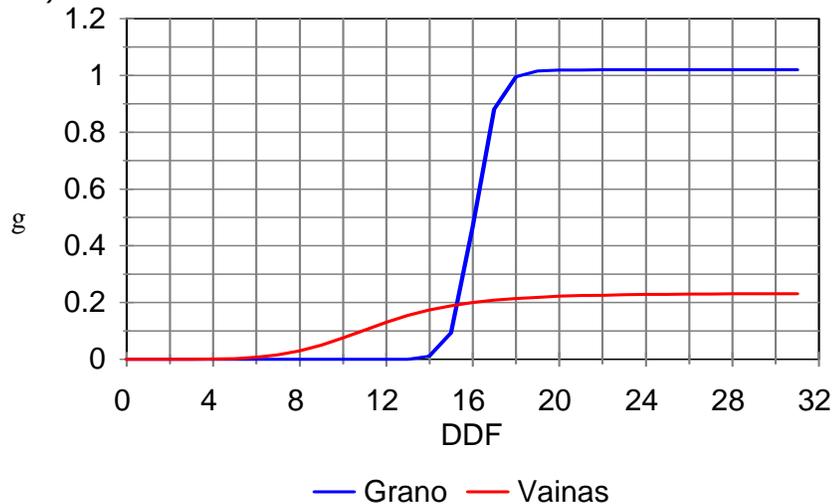


Figura 6 Peso seco de Granos y Vainas, días después de floración (DDF).

La tasa de fotosíntesis es un parámetro que mide la actividad fotosintética y expresa la cantidad de CO_2 que absorbe la planta por unidad de tiempo y de área foliar, la tasa máxima de fotosíntesis de la planta de frijol es del orden de 2 gramos de CO_2 por hora y metro cuadrado de hojas (White, 1988). La Figura 7 muestra lo que podría ser el CO_2 máximo fijado en un metro cuadrado de plantación durante el ciclo del cultivo, considerando el índice de área foliar (IAF) del momento (Figura 8), y un período diario de 12 horas de luz solar.

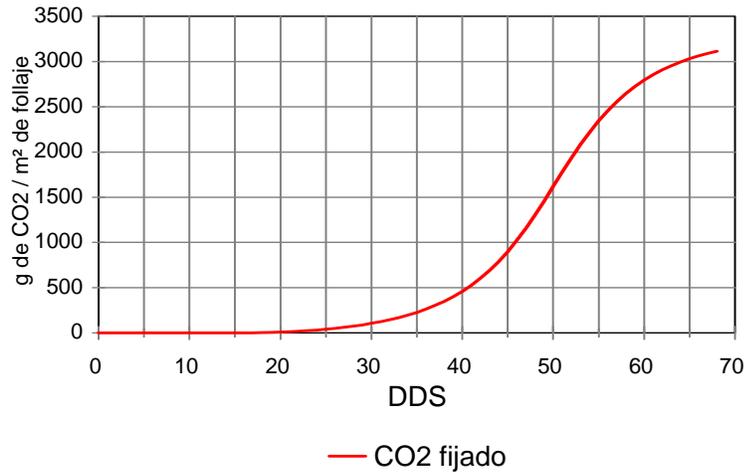


Figura 7. Máximo CO₂ fijado por metro cuadrado de follaje durante el ciclo del cultivo de frijol.

Esta información así considerada, parece indicar que, si la fotosíntesis fuera el único proceso que interviniera en el crecimiento y desarrollo de las plantas de frijol, bajo condiciones óptimas, se podrían fijar alrededor de 32 toneladas de CO₂ por hectárea en el ciclo del cultivo. Sin embargo, según White (1985), por cada gramo de CO₂ fijado, solamente se producen 0,68 g de carbohidrato (CH₂O). Por otra parte, para cualquier proceso de síntesis en base a carbohidratos, hay una pérdida de energía normalmente asociada con la liberación de CO₂, la cual dependerá del compuesto que la planta esté sintetizando. Esto es particularmente importante si consideramos que, producir semillas de frijol con un contenido de 22% de proteína, requiere de un mayor costo energético que producir granos de arroz o trigo, con sólo un 12% de proteína. Esta es la razón por lo que el frijol común nunca rendirá igual que el arroz o el trigo.

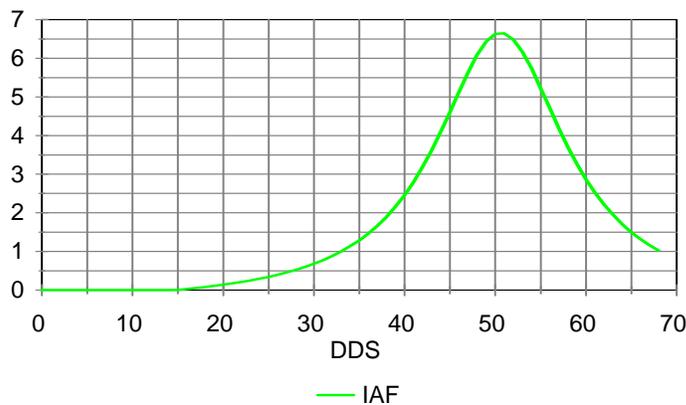


Figura 8. Índice de área foliar observado.

El seguimiento del IAF durante el ciclo del cultivo es importante, debido a que las hojas de la mayoría de los cultivos presentan una superficie foliar extendida, la cual determina la eficiencia en la intercepción de la luz y el flujo de intercambio de gases a la atmósfera. Tal y como fuera descrito por Loomis y Connors (1992), la transpiración puede ser modificada mediante una reducción en el área foliar o por pérdidas de unidades de área foliar. Estos ajustes en el área foliar son contabilizados en períodos de días o semanas mediante una menor expansión foliar y/o más senectud. En contraste, el cierre de los estomas y el movimiento de las hojas, actúan como procesos mediante los cuales, la planta reduce su transpiración por

unidad de área en cuestión de minutos u horas. El cierre estomático reduce la conductancia foliar, mientras que los movimientos de hoja reducen la interceptación de la radiación, y por lo tanto, se disminuye tanto la temperatura como la presión de vapor de saturación de la hoja saturante.

Como ya se mencionó, la variabilidad climática tiene un efecto significativo en los procesos de desarrollo de la planta de frijol, como prueba de ello se puede observar en el cuadro 4, los resultados obtenidos en los rendimientos y la biomasa seca durante el ciclo del cultivo, cuando se aplicaron los escenarios propuestos. Puede observarse como algunos elementos meteorológicos son más relevantes que otros bajo las condiciones de crecimiento y desarrollo del cultivo de frijol.

La producción de materia seca por unidad de agua utilizada por un cultivo, depende del crecimiento de la planta y del uso del agua bajo las condiciones ambientales que se presenten. La eficiencia en el uso del agua, es un índice que está expresado por la proporción de biomasa producida contra el proceso transpiratorio. Esto se deriva de la relación funcional entre la fotosíntesis y la transpiración, siendo esta última, proporcional a la demanda evaporativa atmosférica e inversamente proporcional a la resistencia del canopeo. La figura 9 compara esta relación existente entre la biomasa seca y la transpiración, como respuesta del cultivo a algunos de los escenarios propuestos. Si se considera que la producción de biomasa por unidad de agua utilizada determina un índice de eficiencia en el uso del agua, puede observarse en la figura 9, que los tratamientos incrementales de temperatura (14 y 15), descritos en el cuadro 4, presentan una menor eficiencia en el uso del agua, por consiguiente, para una misma cantidad de biomasa formada se requiere de un mayor consumo de humedad y de energía, lo cual se refleja a través de la pendiente de la relación biomasa-transpiración (Sadras y Hall, 1988).

También se deduce de la figura 9, que los escenarios incrementales de temperatura, tienen como resultado una disminución en el proceso transpiratorio del cultivo, el cual, por medio de algunos mecanismos citados en el contexto, evita la pérdida de humedad.

Es importante recalcar que toda reducción en el proceso transpiratorio está asociada a una reducción en el crecimiento. En vista de que estos procesos conllevan una disminución en el mecanismo fotosintético, esta es la razón por la cual los rendimientos se reducen.

Tal y como se observa en la figura 9, cuando se separó el efecto térmico de la temperatura máxima y la mínima (tratamientos 10 al 13), se observa que la tendencia es que la temperatura máxima genera un mayor costo energético de mantenimiento, razón por lo cual, los rendimientos son más afectados. Las reducciones en el rendimiento atribuidas solo a la temperatura mínima (tratamientos 11 y 13), no son tan importantes como las reducciones observadas por efecto aislado de la temperatura máxima (tratamientos 10 y 12). Por otra parte, los tratamientos que involucran las dos temperaturas (máxima y mínima) hacen reducir los rendimientos en proporciones semejantes al tratamiento aislado de temperatura máxima. El tratamiento +2°C sobre la temperatura máxima hace reducir el rendimiento en un 29%, mientras que el tratamiento de +2°C sobre la temperatura máxima y la mínima reduce el rendimiento en un 40%.

Cuadro 4. Rendimiento y biomasa seca total por escenario propuesto

ESCENARIO	RENDIMIENTO (kg/ha)	BIOMASA (kg/ha)
1. Testigo (año 1988)	523	4085
2. +1°C Tmáx y Tmín. +10%Prec.	443	3994
3. +1°C Tmáx y Tmín. +20%Prec.	447	4034
4. +2°C Tmáx y Tmín. +10%Prec.	319	3682
5. +2°C Tmáx y Tmín. +20%Prec.	323	3690
6. +1°C Tmáx y Tmín. -10%Prec.	435	3973
7. +1°C Tmáx y Tmín. -20%Prec.	428	3945
8. +2°C Tmáx y Tmín. -10%Prec.	309	3646
9. +2°C Tmáx y Tmín. -20%Prec.	300	3633
10. +1°C Tmáx.	455	4020
11. +1°C Tmín.	517	4074
12. +2°C Tmáx.	372	3903
13. +2°C Tmín.	497	4019
14. +1°C Tmáx. y Tmín.	439	3971
15. +2°C Tmáx. y Tmín.	315	3673
16. -10% Luvia	519	4071
17. -20% Luvia	514	4067
18. +10% Luvia	532	4141
19. +20% Luvia	539	4191
20. +2°C Tmed. + 20%Luvia +2 CO ₂	457	5808
21. +2°C Tmed. - 20%Luvia +2 CO ₂	439	5318
22. +2°C Tmed. +2 CO ₂	449	5398
23. +2 CO ₂	731	5970

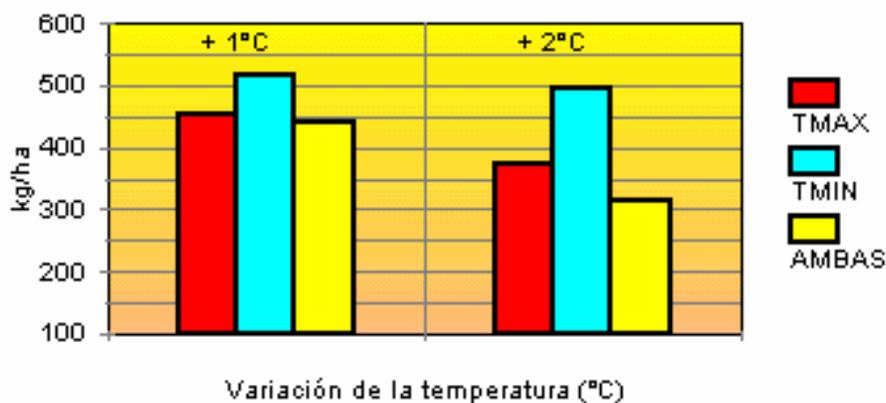


Figura 9. Efecto de aumentos en la temperatura sobre el rendimiento de frijol

La eficiencia en el uso del recurso hídrico al aumentar la temperatura, disminuye progresivamente tal y como se desprende de la figura 10. Una unidad de biomasa seca requiere de una mayor transpiración por parte de la planta cuando se aumenta la temperatura ambiental en 1°C; y esa misma unidad de biomasa será producida con un mayor gasto hídrico al aumentar a 2°C la temperatura ambiente.

La mayor demanda atmosférica provocada por el aumento de la temperatura, deriva en un mayor costo de utilización del agua, con mayor pérdida energética y menor producción de biomasa.

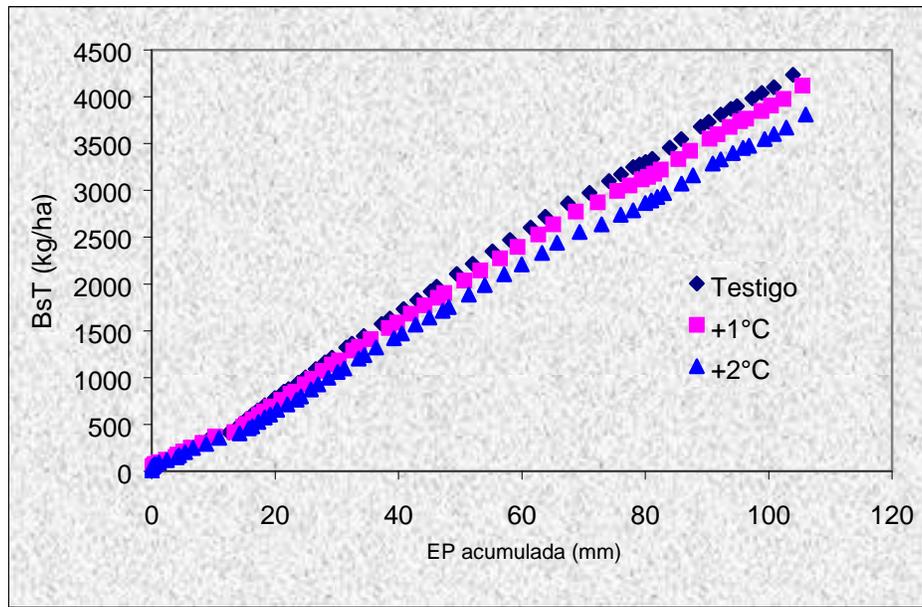


Figura 10. Relación entre la biomasa seca total y la transpiración acumulada durante el ciclo del cultivo de frijol

La comparación de los tratamientos 2, 3, 6 y 7, con el 14; destacan poca variación en los rendimientos debido a incrementos o disminuciones en la precipitación, lo que hace pensar que el mayor peso en la reducción de los rendimientos es debido a los efectos de la temperatura, tal y como se puede inferir de la figura 11.

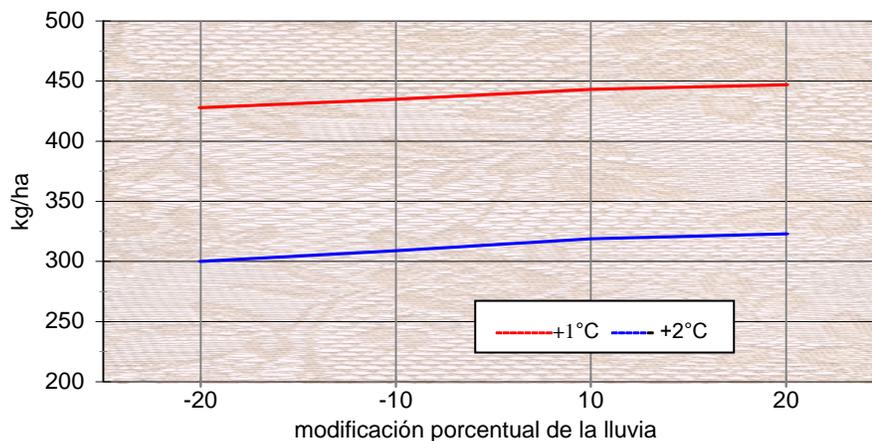


Figura 11. Rendimientos de frijol bajo diferentes escenarios de cambio climático

Esta inferencia se confirma al comparar el testigo con los tratamientos 16 a 19, donde los incrementos en precipitación tienen un efecto positivo en los rendimientos (Figura 12), aspecto que también marca la diferencia entre los tratamientos 2 y 3 con 6 y 7; y los correspondientes a 4 y 5 con 8 y 9. Además, los efectos aislados del aumento de la precipitación (tratamientos 18 y 19) consiguen aumentar el rendimiento en tan solo un 1 y 2% con respecto al promedio; mientras que cualquier suma de temperatura (en la máxima o en la mínima) combinada a aumentos en la precipitación, hacen caer los rendimientos abruptamente entre un 16% y un 39% (tratamientos del 2 al 5).

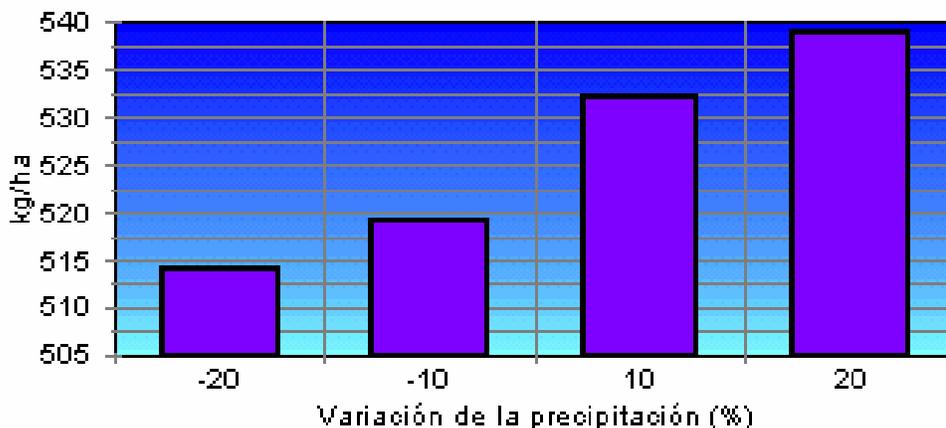


Figura 12. Efecto de las variaciones en la precipitación sobre el rendimiento de frijol

La formación de biomasa se mejoró bajo los tratamientos 18, 19 y 23 (cuadro 4), esto sucede cuando se presentan escenarios incrementales de precipitación y un enriquecimiento del CO_2 atmosférico. Esto concuerda con resultados de experimentos con altos contenidos de CO_2 , que indican que el comportamiento estomático producido, podría generar una economía del agua consumida por las plantas, así como un efecto fertilizante, al reaccionar positivamente ante la fijación de nitrógeno atmosférico y liberación de fosfatos en el suelo por las micorrizas (FAO 1992). Además, un incremento en la concentración del CO_2 , aumentaría directamente la tasa de fotosíntesis y la producción de biomasa de las plantas C_3 , con cambios poco significativos en las plantas C_4 , como el maíz, sorgo y caña de azúcar (Salinger, 1997). Los tratamientos 20 y 21 muestran como, a pesar del efecto favorable del CO_2 , la temperatura es la que provoca que los rendimientos disminuyan.

REFERENCIAS

- Alfaro, R. 1983. El cultivo del frijol. Editorial CAFESA. San José, Costa Rica. 100p.
- Burd, P. and Lomas, J. 1976. Leaf area measuring methods: a study of accuracy and cost. Paper submitted at the World Meteorology Organization (WMO) on the Agrometeorology of the maize crop. Iowa State University, Ames, Iowa. United States of America. 12pp.
- Campos, M. 1998. Escenarios climáticos para Costa Rica. Programa Centroamericano sobre Cambio Climático (PCCC). 15p (correspondencia personal)
- Carrillo, O. 1996. Informes anuales de la Oficina Nacional de Semillas, San José, Costa Rica. sp.
- Chacón, A. Z. 1985. Agroclimatología. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica.
- FAO. 1992. Cambio Climático: Agricultura mundial y medio ambiente rural. Grupo de trabajo sobre Cambio Climático. Roma, Italia. 1pp.
- Fox, D. G. 1981. Judging Air Quality Model Performance. A summary of the AMS Workshop on Dispersion Model Performance. Bulletin American Meteorological Society. 62:599-609.
- González, M. 1980. Manual de laboratorio de edafología. Universidad de Costa Rica. Facultad de Agronomía. Escuela de Fitotecnia. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San Pedro, San José. 96 pp.
- IBSNAT. 1989. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT v2.1). Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- McKenney, M. S. and Rosenberg, N. J. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. Agricultural Forest Meteorology 64: 81-110.
- Monge, L. 1981. Cultivos Básicos. Editorial Universidad Estatal a Distancia. San José, Costa Rica. 219-260 pp.
- Monteith, J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 107 (451): 1-27.
- Loomis, R. S. and D. J. Connor. 1992. Crop Ecology: Productivity and management in agricultural systems. Cambridge University Press. 538 p.
- ONS (Oficina Nacional de Semillas). 1987. Brunca: Nueva variedad de frijol negro de gran precocidad. 4p (correspondencia personal).
- Patz, J. A.; P. R. Epstein; T. A. Burke and J. M. Balbus. 1996. Global Climate Change and Emerging Infectious Diseases. Journal of the American Medical Association (JAMA):275 (3):217-223.
- Porter, J. H.; M. L. Parry and T. L. Carter. 1991. The potential effects of climatic change on agricultural insect pest. Agricultural and Forest Meteorology 57:221-240.
- Sadras, V. O. and Hall, A. J. 1988. Quantification of temperature, photoperiod and population effects on plant leaf area in sunflower crops. Field Crops Res. 18:185-196.
- Salinger, M.; Desjardins, R.; Jones, B.; Sivakumar, M.; Strommen, N.; Veerasamy, S.; Lianhai, W. 1997. Climate variability, agriculture and forestry: an update. World Meteorological Organization. WMO-841. Geneva-Switzerland. 51pp.

White, J. W. 1985. Conceptos básicos de fisiología del frijol. En: frijol, investigación y producción. Editado por Marcoliano López, Fernando Fernández y Aart van Schoonhoven. CIAT. 43-60.

White, J. W. 1988. Conceptos básicos de la fisiología del frijol. Editado por Clemencia Gómez de Enciso y Carlos Valencia. Centro de Investigaciones en Agricultura Tropical (CIAT) 55p.

Willmott, C. J. 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. Bulletin American Meteorological Society. 63:1309-1313.