

CRECIMIENTO DE SOJA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y DE LA RADIACIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA

SOYBEAN GROWTH AS A FUNCTION OF AIR TEMPERATURE AND PHOTOSYNTHETIC ACTIVE RADIATION

CANFALONE, Adriana¹; VILLACAMPA, Yolanda²; CORTÉS, Mónica³; NAVARRO, Miguel⁴

RESUMEN

La productividad de los cultivos está gobernada por complejas interacciones entre el clima y los procesos ecofisiológicos de estos. La radiación solar, la temperatura del aire y la disponibilidad hídrica afectan el crecimiento de las plantas. Este experimento fue realizado en la estación experimental de la Facultad de Agronomía de Azul-UNCPBA, Buenos Aires, Argentina durante tres años agrícola. El modelo propuesto utiliza la suma de grados día para estimar la acumulación de índice de área foliar y la intercepción máxima de radiación fotosintéticamente activa a lo largo del ciclo con el objetivo de ajustar el modelo de la radiación en un cultivo de soja. Los tratamientos consistieron en parcelas irrigadas y no irrigadas. La reducción de disponibilidad hídrica afectó negativamente la evolución del Índice de Área Foliar y de la Materia Seca en el ajuste propuesto.

Palabras-clave: soja, grados-día, modelización, radiación fotosintéticamente activa, disponibilidad hídrica.

INTRODUCCIÓN

La soja es una leguminosa de gran importancia económica la cual es cultivada bajo condiciones ambientales muy variables y predominantemente sin irrigación. La mayoría de las veces está sujeta a déficit hídrico, con mayor o menor intensidad lo que puede afectar su crecimiento (MUCHOW et al., 1993). De esta forma, tanto su desarrollo como su rendimiento son muy dependientes de la precipitación pluvial, principalmente debido a la distribución irregular durante el ciclo del cultivo.

La radiación solar, la temperatura y el agua son los principales elementos agrometeorológicos que regulan los procesos metabólicos de las plantas. En condiciones atmosféricas, junto a otros elementos atmosféricos, se comportan como un sistema orgánico y complejo, por lo que

resulta difícil explicar el comportamiento de los cultivos. A pesar de las simplificaciones de la realidad hechas por los modelos, estos son una valiosa herramienta para la comprensión de la conducta de estos sistemas complejos (FORD, 1999).

Durante el déficit hídrico se produce menor traslocación de fotoasimilados en la planta, debido a la reducción de la fotosíntesis en las hojas y a la inhibición del crecimiento de los órganos de la planta (SIONIT & KRAMER, 1977; CONFALONE et al., 1997).

Para diversas especies vegetales, creciendo en condiciones no limitantes, ocurre una relación lineal entre la acumulación de materia seca y la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo, permitiendo el ajuste de un modelo simple para la estimación de la producción potencial en un determinado lugar (MONTEITH, 1977; GOSSE et al., 1986). Este tipo de modelos fue aplicado para diferentes cultivos por varios autores con el objetivo de estimar la producción de materia seca aérea (GOSSE et al., 1986; FRANÇA et al., 1999) y también la materia seca total (KINIRY et al., 1989; COSTA et al., 1999). En condiciones de estrés la eficiencia de utilización de la radiación (EUR) presenta variaciones mientras que cuando el cultivo crece en condiciones no limitantes, permanece relativamente constante a lo largo del ciclo (MUCHOW et al., 1993; CONFALONE & NAVARRO DUJMOVICH, 1999).

El cultivo de soja se encuentra generalmente, durante algún período de su ciclo, sujeta a estrés hídrico, lo que puede afectar sus mecanismos de captura y utilización de los recursos ambientales durante sus diferentes etapas de desarrollo y la utilización de modelos simples permite prever la productividad de los cultivos. Este trabajo propone desarrollar un modelo de crecimiento de la soja, considerando informaciones de radiación solar y

¹ Ing. Agrónomo-MSc en Meteorología Agrícola. Profesora de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Agrometeorología. Facultad de Agronomía de Azul-UNCPBA. CC 47, 7300-Azul, Buenos Aires, Argentina.

² Profesor Doctor en Matemáticas. Catedrática E.U. Dpto. Matemática Aplicada. E.P.S.A. Universidad de Alicante. Apto.99. E-03080,Alicante, España.

³ Profesor Doctor en Ingeniería Informática. Dpto. Matemática Aplicada. E.P.S.A. Universidad de Alicante. Apto.99. E-03080,Alicante, España.

⁴ Ing. Agrónomo-MSc en Meteorología Agrícola, Doctorando, Profesor Asociado de la Cátedra de Agrometeorología. Facultad de Agronomía de Azul-UNCPBA. CC 47,7300-Azul, Buenos Aires, Argentina.

(Recebido para publicação em 02/07/2002)

temperatura durante el ciclo del cultivo, en diferentes condiciones hídricas. Los objetivos son: a- ajustar un modelo de estimativa del índice de área foliar (IAF) y de materia seca en función de la acumulación de tiempo térmico para el cultivo de soja.; b- ajustar el modelo de estimativa de acumulación de materia seca en función de la radiación fotosintéticamente activa interceptada para el cultivo de soja.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento de campo fue conducido en la Estación Experimental de la Facultad de Agronomía-UNCPBA, BA, Argentina (latitud: 36°45'S; longitud: 59°50'W; altitud: 132m), durante los años agrícolas 1997/98, 1998/99 y 2000/01. La etapa de desarrollo del modelo se realizó en el Departamento de Matemática Aplicada de la Universidad de Alicante, España.

Durante el primer año agrícola se sembró el cultivar Asgrow 4656 y durante los posteriores años, se sembró el cultivar Don Mario, siendo ambos cultivares de crecimiento indeterminado, sembrados todos durante la primera quincena de noviembre con un espaciado entre hileras de 0,70 m y una densidad de 29 plantas por metro cuadrado. El suelo fue fertilizado y se controlaron las malezas y las plagas.

El clima de la región es templado húmedo con influencia oceánica del tipo fundamental Cfb (KÖPPEN, 1931), que predomina en la región centro-este de la provincia de Buenos Aires.

El suelo fue caracterizado como Argiudol típico, según Soil Taxonomy (USDA-SMSS, 1990), con alto contenido de materia orgánica.

Los tratamientos utilizados considerados en este trabajo fueron: 1.- con irrigación (suelo mantenido próximo a capacidad de campo) y no irrigado (recibiendo solamente lluvia).

Se utilizó un delineamiento experimental en bloques casualizados, con tres repeticiones. Las unidades experimentales, de 15 x 6m, estaban separadas por una bordura de 3m. La distancia entre bloques fue de 3,5m.

La lámina de agua aplicada diariamente como complemento de la precipitación fue distribuida por medio de un sistema de riego por goteo, fue calculada considerándose la evapotranspiración de referencia, obtenida por medio de la ecuación de Penman-FAO, la cual fue multiplicada por el coeficiente del cultivo para obtener la evapotranspiración del cultivo de soja (DOORENBOOS & PRUIT, 1977).

El valor de la humedad del suelo a la capacidad de campo fue determinado con el método de CASSEL & NIELSEN (1986). El contenido de humedad en el suelo fue monitoreado semanalmente por el método gravimétrico (GARDNER, 1986). En el cultivo irrigado el suelo fue mantenido próximo a la capacidad de campo.

El nivel de estrés hídrico del cultivo fue determinado a través de mediciones del potencial osmótico del jugo celular (extraído de muestras del cultivo) por medio de un refractómetro (SLAVIK, 1974). Las mediciones fueron hechas cada cinco días y fueron muestreadas cinco hojas totalmente expandidas de plantas de cada parcela.

Semanalmente fueron determinados el peso seco de 10 plantas (incluyendo las raíces) y el índice de área foliar (IAF), con un analizador de dosel (LAI 2000, LI-COR, inc). Para la determinación de la masa de materia seca el material cosechado fue llevado a estufa ventilada a una temperatura de 65°C, hasta peso constante.

Dentro del cultivo, la radiación fotosintéticamente activa interceptada (IRFA) fue medida con un sensor cuántico lineal (PAR-Li-COR, inc.).

La acumulación de tiempo térmico fue calculado de la siguiente forma:

$$GD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad \text{ec. 1}$$

donde GD es el tiempo térmico o suma térmica o grados-día acumulados en los n días del período; T_i es la temperatura media diaria del aire (°C) y T_b es la temperatura base. La temperatura base utilizada en este cálculo fue de 8°C (JONES et al., 1991).

Los modelos para la estimativa del índice de área foliar y de la masa de materia seca producida en función de grados-día (IAFGD y MSGD respectivamente) relativo al período de crecimiento fueron ajustadas por polinomios que representaron los procesos biológicos utilizando las técnicas de regresión conocidas.

El ajuste del modelo que relaciona la producción e materia seca con el total de radiación interceptada y el acúmulo de grados-día, en el período de crecimiento del cultivo, estuvo basado en el método de la radiación (MONTEITH; 1977, GOSSE et al., 1984; FRANÇA et al. 1999), donde:

$$MS = EUR * IRFA \quad \text{ec.2}$$

siendo MS la producción de materia seca ($g \cdot m^{-2}$), $IRFA$ la radiación fotosintéticamente activa interceptada y la EUR fue determinada en un trabajo previo por la regresión de MS en función de $IRFA$ (CONFALONE & NAVARRO, 1999), representando la eficiencia de utilización de la radiación.

A su vez, la variable $IRFA$ está dada por :

$$IRFA = RFA_{inc} * E_i \quad \text{ec.3}$$

donde RFA_{inc} es la radiación fotosintéticamente activa incidente en el tope del cultivo y E_i es la eficiencia de intercepción de la radiación fotosintéticamente activa.

La máxima eficiencia de intercepción (E_i) fue calculada a partir del coeficiente de transmisión de RFA (CT) según:

$$E_i = 1 - CT \quad \text{ec.4}$$

Siendo el coeficiente de transmisión (CT) para RFA determinado por:

$$CT = \frac{RFA_t}{RFA_{inc}} \quad \text{ec.5}$$

donde RFA_t (RFA transmitida) es la radiación que pasa a través del cultivo y alcanza niveles inferiores del dosel o el nivel del suelo.

En función de los dos parámetros meteorológicos, RFA_{inc} y acumulación de grados-día (GD), la producción de materia seca puede ser determinada por medio de:

$$MS = EUR * RFA_{inc} * E_{ie}$$

siendo EUR estimada por la ecuación 2 y E_{ie} (eficiencia de intercepción de RFA estimada) por la siguiente ecuación:

$$Eie = \beta * (1 - \exp^{-k * IAFgd}) \quad \text{ec. 6}$$

donde β es la máxima eficiencia de intercepción, determinada por la ecuación 4, IAFgd fue calculado por la regresión entre la acumulación de grados día (GD) y el IAF observado y k es el coeficiente de extinción determinado según CONFALONE et al., (1997).

De esta forma, el modelo de la radiación (GOSSE et al., 1986) puede ser expresado como:

$$MS = EUR (RFAinc * \beta * (1 - \exp^{-k * IAFgd})) \quad \text{ec.7}$$

Para obtener una ecuación de ajuste que mejor represente el IAF en función de los grados día se han utilizado distintos programas SPLUS(1997) y MODELHSS (CORTÉS, 2000) que desarrollan las metodologías que construyen ecuaciones matemáticas analizadas respectivamente en SPLUS (1997), VILLACAMPA & USÓ (1999) y CORTÉS (2000). De las ecuaciones propuestas se ha seleccionado aquella que mejor interpreta el comportamiento del IAF o MS por el mayor coeficiente de determinación (r^2) obtenido a partir del programa MODELHSS, haciendo distinción entre el cultivo irrigado y de secano.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparando el IAF de ambos tratamientos, podemos observar que la precipitación pluvial ocurrida durante los años del experimento es insuficiente para lograr el óptimo crecimiento de la soja (Figura 1)

El IAF máximo alcanzado durante los años de experimento fue de 7,2 para el tratamiento con riego en tanto que para el no regado fue de 4,9. En ambos tratamientos el IAF coincidió con el estadio fenológico de floración. Reducciones de IAF y/o peso foliar en situaciones de sequía fueron documentadas (PANDEY et al,1984; COX & JOLIFF, 1986). La caída en IAF por efectos de la sequía se explican por reducción en el crecimiento foliar y aceleración de la senescencia de las hojas.

Desde el momento de la aplicación de los tratamientos, los datos relativos a la evolución de la radiación interceptada mostraron diferencias significativas y los valores de máxima intercepción alcanzados para cada tratamiento a lo largo de los años fueron de 97 % y 90% para los tratamientos con y sin riego respectivamente. Por su parte, el resultado del potencial osmótico de las hojas mostró una tendencia a menores valores para el cultivo creciendo con deficiencia hídrica (-1,85 Mpa y -1,77 Mpa), mientras que en el cultivo sin estrés se observó una disminución de estos valores a lo largo del ciclo. Aunque menos sensible que la expansión foliar, la EUR también se redujo en condiciones de estrés hídrico, los valores encontrados fueron de 1,38 para el cultivo con riego y de 1,34 para el cultivo de secano, demostrando que la expansión de tejidos es mucho más sensible a déficits hídricos que la fotosíntesis. Estos resultados ya fueron reportados en CONFALONE & NAVARRO (1999 a y b). Valores aproxi-

mados de EUR fueron encontrados en cultivos de soja creciendo en la provincia de Buenos Aires (SADRAS & MILROY, 1996). La disminución de la EUR ante situaciones de estrés hídrico se explica por caídas en la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar debida a factores estomáticos y no estomáticos, presentándose la soja como un cultivo de gran sensibilidad en la fotosíntesis en respuesta a déficits hídricos, producida por su conductividad estomática (COX & JOLIFF, 1987).

Las ecuaciones seleccionadas fueron:

Ecuación de ajuste del IAF en función de los grados día para cultivo irrigado :

$$IAF1 = -0,1059E-11 * GD^4 - 0,3931E-5 * GD^2 + 0,1445E-1 * GD - 3,7875 \\ r^2 = 0,79$$

Ecuación de ajuste del IAF en función de los grados día para cultivo de secano:

$$IAF2 = -0,9472E-12 * GD^4 - 0,3515E-5 * GD^2 + 0,1079E-1 * GD - 2,6338 \\ r^2 = 0,74$$

En la figura 2 podemos ver la menor producción de biomasa de la soja cultivada sin riego con respecto a la irrigada durante todo el ciclo; esto se debió a la reducción de radiación interceptada debido también al menor IAF alcanzado por el tratamiento de secano y también a la disminución en la EUR. El tratamiento regado alcanzó su rendimiento máximo observado durante los tres años de 2311,2 g/m², mientras en el tratamiento sin riego, el máximo alcanzado fue de 1380,9 g/m². Se constata que el tratamiento regado presentó mejor desempeño en relación al IAF y MS en razón de las mayores tasas de crecimiento proporcionadas, atribuidas a la mejor disponibilidad hídrica ocurrida.

Ecuación de ajuste de MS en función de los grados día para cultivo irrigado:

$$MS1 = -0,1600E-9 * GD^4 + 0,5999E-3 * GD^2 + 1,2627 * GD - 501,1677 \\ r^2 = 0,91$$

Ecuación de ajuste de MS en función de los grados día para cultivo de secano:

$$MS2 = -0,8029E-3 * GD^2 + 2,5566 * GD - 836,5342 \\ r^2 = 0,95$$

Considerando el modelo de radiación para el tratamiento con riego, para el cultivo de soja, teniendo como variables de entrada la RFAinc y la acumulación de grados-día (GD), asume la siguiente forma:

$$MS = 1,38 * PARinc * 0,97 * (1 - \exp^{(0,98 * (-0,1059E-11 * GD^4 - 0,3931E-5 * GD^2 + 0,1445E-1 * GD - 3,7875))})$$

Mientras que para el tratamiento de secano, al disminuir la EUR y la máxima eficiencia de intercepción, el modelo de la radiación asume la siguiente forma:

$$MS = 1,34 * PARinc * 0,90 * (1 - \exp^{(0,98 * (-0,9472E-12 * GD^4 - 0,3515E-5 * GD^2 + 0,1079E-1 * GD - 2,6338))})$$

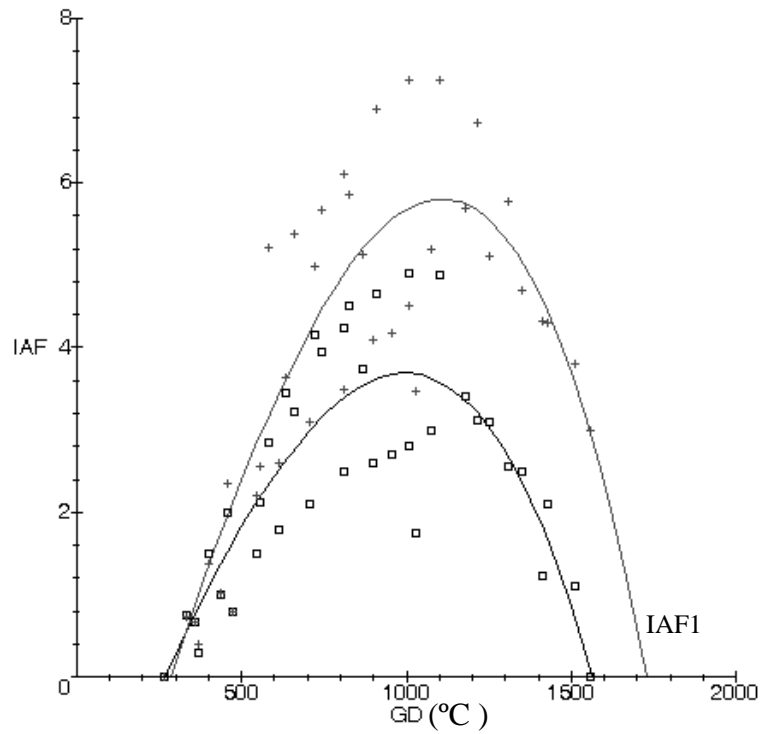


Figura 1- Índice de área foliar (IAF) para los dos tratamientos (irrigado, + (IAF1) y no irrigado, (IAF2)) en función de los grados-día (GD) acumulados para los tres años del experimento y sus correspondientes ajustes. Azul, BA, Argentina.

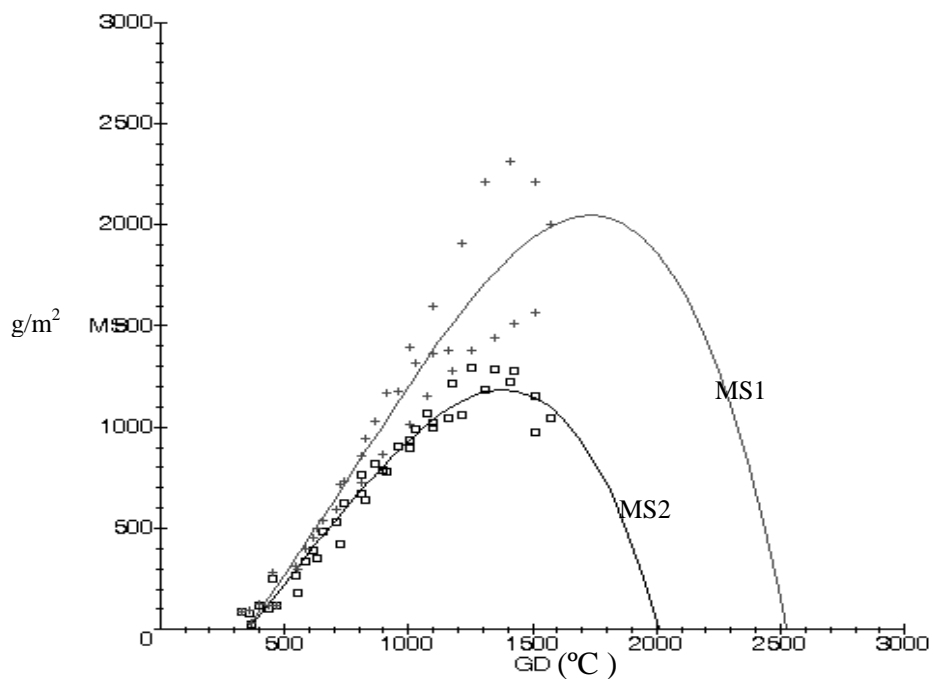


Figura 2 - Materia seca (MS) en función de los grados-día acumulados para los dos tratamientos (irrigado, + (MS1), y no irrigado, (MS2)) en función de los grados-día (GD) acumulados para los tres años del experimento Azul, BA, Argentina.

CONCLUSIONES

La producción de MS y el IAF en soja pueden ser estimadas a partir de modelos de relación con la temperatura media del aire a través de la acumulación de grados-día y con la sumatoria de radiación fotosintéticamente activa incidente, considerando la RFA interceptada.

La disponibilidad hídrica afecta el modelo de estimativa de materia seca e índice de área foliar en función de la acumulación de grados-día. El modelo de estimativa de materia seca en función de la sumatoria de radiación fotosintéticamente activa interceptada también es afectada por el déficit hídrico, disminuyendo la máxima intercepción de radiación y la eficiencia en la utilización de la misma.

ABSTRACT

Crop productivity is mainly related to complex interactions between climate and crop ecophysiological processes. Solar radiation, air temperature and water availability affect plant growth. This trial was performed at the experimental station of the Facultad de Agronomía de Azul - UNCPBA, Buenos Aires, Argentina throughout three agricultural seasons. The model uses the sum of degree days to predict dry matter accumulation and the maximum interception of photosynthetically active radiation throughout the cycle in order to adjust the radiation model in a soybean crop. Treatments consisted in irrigated and non-irrigated plots. In the proposed adjustment, decrease of water availability affected the evolution of leaf area and dry matter indices negatively.

Key words: soybean, degree-days, modelling, photosynthetically active radiation, water availability.

REFERENCIAS

- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R. Field capacity and available water capacity. In KLUTE, A. (ed). **Methods of soil analysis**, Madison, ASA-SSSA, Monograph nº9, 1986, 25p.
- CONFALONE, A.; COSTA, L.C.; PEREIRA, C.R. Eficiencia de uso de la radiación en distintas fases fenológicas bajo estrés hídrico. **Revista Facultad de Agronomía**, Buenos Aires, v.17, n.1, p.63-66, 1997.
- CONFALONE, A.; NAVARRO DUJMOVICH, M. Influência do déficit hídrico sobre o desenvolvimento e rendimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.183-187, 1999.
- CONFALONE, A.; NAVARRO DUJMOVICH, M. Influência do déficit hídrico sobre a eficiencia de utilização da radiação em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.5, n.3, p. 195-198, 1999.
- CORTÉS, M. **Un nuevo algoritmo para la modelización de sistemas altamente estructurados**. Alicante. España. 2000, 232p. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante.
- COSTA, L.C.; CONFALONE, A.; PEREIRA, C.R. Effect of water stress on the efficiency of capture of water and radiation by soybean. **Tropical Science**, London, v.39, p.91-97, 1999.
- COX, W.J.; JOLLIFF. Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, p. 226-230, 1986.
- COX, W.J.; JOLLIFF. Crop-water relations of sunflower and soybean under irrigated and dryland conditions. **Crops Science**, Madison, v. 27, p. 553-557, 1987.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Necesidad de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1977. 194p. (Serie Riego y Drenaje, 24)
- FORD, A. **Modeling the environment**. Island Press, Washington D.C., 1999, 401p.
- FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; GONÇALVES ROSA, L. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1, p.59-66, 1999.
- GARDNER, W.H. Water content (Ed.) **Methods of soil analysis**. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, 1986, p. 493-594.
- GOSSE, G.; CHARTIER, M.; LEMAIRE, G. Mise au point d'un modèle de prévision de production pour une culture de Luzerne. **Compte Rendu Academie Sciences**. Série III, Paris, v.298, p.541-544, 1984.
- GOSSE, G.; VARLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R. et al. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, Paris, v.6, p.47-56, 1986.
- JONES, J.W.; BOOTE, K.; JAGTAP, S. et al. Soybean development. In: HANKS, J. & RITCHIE J. (Eds.). **Modelling plant and soil systems**, Madison, v.31, ASA, CSSA, SSSA, 1991, p. 71-90.
- KINIRY, J.R.; JONES, C.A.; O'TOOLE, J.C. et al. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.20, p.51-64, 1989.
- KÖPPEN, W. **Grundriss der klimakunde**, Walter de Gruyter, Berlin, 1931, 338p.
- MONTEITH, J.L. **Climate and efficiency of crop production in Britain**. Phil Trans.R. Soc., London, v.281, p.277-294, 1977.
- MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; PENGELLY, B.C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.32, n.1, p.1-6, 1993.
- PANDEY, R.K.; HERRERA, E.A.; PENDLETON, J.W. Drought response of grain legumes under irrigation gradient: II. Plant water status and canopy temperature. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, n.3, p.553-557, 1984.
- SADRAS, V.O.; MILROY, S. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.47, p.253-266, 1996.
- SIONIT, N.; KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agronomy Journal**, Madison, v.69, n.2, p.274-278, 1977.
- SLAVIK, B. **Methods of studying plant water relations**, Prague: Academy Publishing Company, 1991. 565 p.
- SPLUS. **Guide to statistics**. Data analysis. Products division, Math soft. United States.1997.
- USDA-SMSS. Department of Agriculture. Soil Management Support Services. **Keys to soil taxonomy**. Washington, 1990. 422p. (tech monograph, 19).
- VILLACAMPA, Y.; USÓ, J.L. Mathematical models of complex structural systems. A linguistic vision. **International Journal of General Systems**, New York, v.28, p.37-52, 1999.