

MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AMBIENTES CLIMÁTICOS Y EVALUACIÓN DE RESPUESTAS DE CULTIVARES DE SOJA

ROSBACO, Irene¹ (*ex-aequo*); BISARO, Vilma¹ (*ex-aequo*); ROMAGNOLI, Miriam¹ (*ex-aequo*) y MARTIGNONE, Ricardo¹⁻².

⁽¹⁾ Docentes de la Cátedra de Manejos de Cultivos
Facultad de Ciencias Agrarias. UNR
C.C. N° 14. (S 2125 ZAA) - Zavalla - Santa Fe - Argentina.
E-mail: irerosba@fcagr.unr.edu.ar

⁽²⁾ Consejo de Investigaciones de la UNR

Resumen

La identificación de los genotipos superiores para cada ambiente de producción requiere de la utilización de técnicas de análisis que permitan detectar las interacciones genotipo x ambiente (G x A), surgidas de las diferencias adaptativas de los cultivares a cada lote de cultivo. El presente trabajo permite demostrar que la aplicación de técnicas de análisis multivariado constituye una herramienta eficaz para tal propósito. Se condujeron experimentos a campo en Zavalla (33° S) en tres campañas agrícolas sobre un suelo argiudol vértico profundo, utilizando un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las fechas de siembra fueron 19/11/97; 24/11/98 y 21/11/00, utilizándose los cultivares Pioneer 9482, Joketa 46, Tijereta 2046, Don Mario 48, ACA 490, A4100 RG, Pioneer 9492 RG y HM5-41RR, todos clasificados dentro del Grupo de Madurez (GM) IV. Los datos se procesaron por análisis de la variancia y las interacciones G x A se evaluaron según Análisis de Componentes Principales y de Clusters. Debido que las fechas de siembra y los suelos utilizados fueron similares, las diferencias entre años fueron causadas por las variables climáticas, temperatura, lluvias y radiación solar incidente en cada etapa fenológica. Los métodos estadísticos utilizados permitieron separar claramente los tres años climáticos y mostraron diferencias entre cultivares en cada año, a pesar que todos pertenecen al GM IV. Los rendimientos y sus componentes se explicaron en función de las variables climáticas y se identificaron ajustes ambientales en el número y tamaño de las semillas. Los métodos estadísticos aplicados en este trabajo permiten la identificación de los procesos ecofisiológicos del cultivar que determinan el rendimiento en relación con el ambiente. La difusión de esta técnica puede contribuir a incrementos sostenidos del rendimiento del cultivo.

Palabras clave:

Factores climáticos, rendimiento de semillas, componentes del rendimiento, Análisis de Componentes Principales, Análisis de Cluster

STATISTICAL METHODS FOR THE CHARACTERIZATION OF ENVIRONMENTAL AND CULTIVAR RESPONSES IN SOYBEAN.

Summary

Effective identification of superior genotypes for each environment requires the use of analytical techniques which allow the interaction G x E output due to the adaptive differences of each cultivar to be detected. Present study demonstrates that the application of Multivariate Analysis Techniques are effective tools for that purpose. Field experiments were carried out at Zavalla (33 ° S) in three cropping seasons on a deep vertic argiudol soil in a complete block design with three replications. Sowing dates were 19/11/97; 24/11/98 and 21/11/00 and cultivars were Pioneer 9482, Joketa 46, Tijereta 2046, Don Mario 48, ACA 490, A4100 RG, Pioneer 9492 RG and HM5-41RR, all classified as Maturity Group (MG) IV. Analysis of variance was performed and G x E interactions were evaluated with standard Principal Components and Cluster Analysis. As sowing dates and crop site were similar, differences between years were caused by climate conditions: temperature, rainfall and incident solar radiation in each phenological phase. Statistical methods clearly separated the three climatic years, showing differences between cultivars in each year, even though all were MG IV. Seed yields and its components could be explained as a function of climate variables, allowing the identification of environmental adjustments of seed number and size. Statistical methods applied in this paper allow the identification of the ecophysiological processes of the cultivar which determine its yield that are related to the environment. The spread of this technique of analysis may contribute to a sustainable increased yield of the crop.

Key words:

Climate factors, seed yield, yield components, Principal Components Analysis, Cluster Analysis

Introducción

La soja es el principal cultivo agrícola del sur de la provincia de Santa Fe, Argentina. La producción se ha incrementado en la última década debido al aumento en el área sembrada y en los rendimientos (Ghida Daza et al., 1997; Salines et al., 1997). El éxito del cultivo depende de las condiciones climáticas, del suelo y del manejo, entre otras. De estos factores, las prácticas de manejo son las únicas que el hombre puede modificar siendo una de las más relevantes, la elección de cultivares.

En Argentina, se han registrado en las últimas campañas agrícolas importantes cambios tecnológicos. En los últimos años hubo un incremento de las áreas sembradas con los cultivares GM III y IV en desmedro de los GM V, VI y VII (Bodrero et al. 2001). Estos cambios se debieron a una serie de factores concurrentes: variación en la distribución de las precipitaciones, beneficiando a los más precoces; el mejor manejo del suelo a través de la siembra directa, que permite una mayor captación y acumulación de agua en el perfil; la aparición de genotipos resistentes a glifosato; suplementación con nutrientes en forma directa o residual y la elección de cultivares adaptados a diferentes épocas de siembra, entre otras. Experiencias previas también demuestran que los cultivares correspondientes a los GM IV manifestaron alta estabilidad de rendimientos cuando fueron sometidos a diversos ambientes productivos (Rosbaco et al, 1999). El rendimiento de los cultivos es el resultado de la interacción entre los genotipos y el ambiente (clima, suelo y prácticas de manejo). Los genotipos pueden expresar una respuesta diferencial según la calidad del ambiente, así es posible que diferentes cultivares puedan tener rendimientos similares o distintos en un mismo ambiente y también, que un genotipo manifieste rendimientos similares en diversos ambientes.

Un procedimiento comúnmente utilizado para estudiar la relación entre los genotipos y los ambientes es el análisis de regresiones lineales simples del comportamiento de cada cultivar respecto del comportamiento promedio de los cultivares en el ambiente (Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966), sin tomar en cuenta ningún elemento de clima, suelo y/o manejo. Esta metodología,

que asigna un ambiente con iguales características a todos los cultivares fue muy útil y permitió avanzar sustancialmente en el conocimiento del comportamiento de los cultivares, dado que en el cálculo de las pendientes de respuesta de uno de ellos, la heterogeneidad queda representada por la interacción. Pero como bien postula Vargas et. al, 1988, la heterogeneidad de las pendientes sólo explica una pequeña proporción de una interacción compleja: esto se debe a que para algunos cultivares, un determinado factor climático puede incidir en un estadio fenológico distinto que en otros. De esta manera, un mismo ambiente puede tener efectos diferenciales.

El rendimiento en grano puede descomponerse en varios procesos parciales, denominados componentes del rendimiento: número de semillas por m² de cultivo y el peso unitario de las semillas. Estos componentes del rendimiento pueden ser modificados por el genotipo, el ambiente y el manejo, afectando de esta manera el rendimiento final. El grado de sensibilidad de cada componente a los factores ambientales varía con el estado de desarrollo del cultivo. La soja tiene además la capacidad de compensar, dentro de ciertos límites, reducciones en un componente del rendimiento debidas a factores de estrés, aumentando el componente subsiguiente, una vez desaparecido el mismo. En condiciones de campo, es común la ocurrencia de diferentes grados de estrés, especialmente hídrico y las diferencias de rendimiento entre cultivares puede responder no sólo a diferencias en alguno de sus componentes, sino también a diferencias en su capacidad para compensar. (Morandi, et al. 1991; Andriani y Bodrero, 1995). Por ello, es posible que se alcancen rendimientos similares en diferentes condiciones como consecuencia de alteraciones en diversos procesos. Las metodologías de estudio con regresiones lineales simples no resultan suficientes para incluir estas situaciones. La aplicación de técnicas de análisis multivariado (Johnson y Wichin, 1992) que permiten estudiar la incidencia de múltiples factores sobre el comportamiento de los cultivos, en este caso la interacción genotipo- ambiente (Cossa, 1990) constituyen la base teórica de este trabajo. La aplicación de esta metodología permite caracterizar al ambiente y a los genotipos, posibilitando realizar

agrupamientos de situaciones o características similares, ya sean iguales o distintos genotipos en iguales y distintos ambientes (Gauch, 1992; Vargas et al., 1998; Brancourt-Hulmel, M. et al., 1999; Haussmann et al., 2000; Yan y Hunt, 2001).

Dado que el éxito del cultivo en un lote de producción depende de la respuesta del genotipo a las condiciones ambientales, resulta imprescindible caracterizar a los ambientes productivos y a los genotipos con mayor precisión. La falta de una asociación correcta entre la tecnología adoptada y la oferta ambiental, podría ser una de las causas que explicarían la brecha entre los rendimientos promedio de la región (entre 2500 y 2800 kg/ha) y los potencialmente obtenibles bajo condiciones de secano en ensayos comparativos de rendimientos y en lotes de productores de avanzada (superiores a 5.000 kg/ha). También ésta podría ser una explicación de la pronunciada variabilidad interanual aún en ambientes supuestamente buenos (Bodrero, et al. 2002). Evidentemente, esto indica que existe un amplio margen para el diseño de estrategias productivas conducentes al incremento de la productividad del cultivo y a un mejor aprovechamiento de los recursos del agroecosistema.

Dada la gran variabilidad que presentan los ambientes productivos, determinada por las características intrínsecas de cada sitio, las fechas de siembra, las modalidades en el manejo de los cultivos y campañas agrícolas, el logro de una correcta selección de los genotipos mejor adaptados para cada ambiente requiere de la utilización de métodos de evaluación más precisos. La continua liberación al mercado de nuevos cultivares de soja requiere de una metodología de análisis que permita determinar la capacidad productiva de los mismos cuando se los somete a distintas condiciones ambientales. Este análisis debe tener en cuenta la diferente sensibilidad al fotoperíodo y a la temperatura que los mismos presentan aún cuando pertenezcan a un mismo grupo de madurez (Martignone et al., 1995).

El presente trabajo tuvo como objetivo mostrar que una metodología estadística simple de análisis multivariado permite caracterizar al ambiente productivo y contribuye a analizar y comprender el comportamiento agronómico de cualquiera de los cultivares existentes utilizando genotipos con fenología y fechas de siembra similares en tres campañas diferentes en un mismo sitio experimental.

Materiales y Métodos

Los experimentos se llevaron a cabo en el Campo Experimental "José F. Villarino" de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, en Zavalla, Provincia de Santa Fe, Argentina (33° 01' S - 60°53' O). Durante las campañas 1997/98 (campaña 1), 1998/99 (campaña 2) y 2000/01 (campaña 3) se condujeron los ensayos sobre un suelo argiudol vértico, serie Roldán, con escasa pendiente (0.5%); horizonte superficial de textura franco limosa, con moderado contenido de materia orgánica (2,93%). Se utilizó un sistema de labranza vertical, complementado con rastra de disco (sobre un barbecho prolongado). Las fechas de siembra para cada campaña fueron: 19/11/1997, 24/11/1998 y 21/11/2000.

El diseño experimental en cada ensayo fue de bloques completamente aleatorizados, con

tres repeticiones. El tamaño de las parcelas fue de 2,8 m de ancho por 7 m de largo y las hileras estuvieron distanciadas a 0,7 m. Los cultivares utilizados en las tres campañas fueron: Pioneer 9482, Joketa 46, Tijereta 2046, Don Mario 48, ACA 490 y A4100 RG. Los cultivares Pioneer 9492 y 3 HM5-41 RR fueron agregados en las campañas 1 y 2 y 2 y 3 respectivamente. Los números que siguen a los códigos de los cultivares, corresponden a las campañas analizadas. Se registraron los estadios fenológicos: emergencia (VE); plena floración (R2), inicio del llenado de semillas (R5) y madurez fisiológica (R7), según Fehr y Caviness, 1977. A la cosecha (R8) se determinó la biomasa aérea total (g/m²), el rendimiento (kg/ha) y sus componentes: número de semillas por m² y peso de mil semillas (g). Estos datos se obtuvieron a partir de muestras de 2 m² por repetición.

Tabla 1:

Valores de temperatura media diaria (TMED); lluvias (PREC) y radiación solar incidente acumulada (RAD) en las etapas fenológicas de los cultivares Pioneer 9482 (Pio), Joketa 46 (Jo), Tijereta 2046 (TJ), Don Mario 48 (DM), ACA 490 (ACA), A4100 RG (A), Pioneer 9492 RG (Pi) y HM5-41RR (HM). Índices 1, 2 y 3 corresponden a las campañas 1997/98; 98/99 y 2000/01, respectivamente. Valores promedios, mínimos y máximos de las respectivas campañas y etapas fenológicas.

Genotipo – campaña	VE - R2			R2 – R5			R5 – R7		
	TMED	PREC	RAD	TMED	PREC	RAD	TMED	PREC	RAD
Pio – 1	21,5	291,4	651,0	22,2	251,6	563,1	20,7	176,9	609,3
Jo – 1	21,5	315,4	700,6	22,1	221,1	526,5	20,8	165,4	572,3
Pi – 1	21,5	315,4	678,3	22,1	253,6	606,1	20,5	149,8	581,5
TJ - 1	21,5	291,4	651,0	22,4	221,2	548,8	20,7	232,4	596,2
DM – 1	21,6	315,4	666,7	22,5	186,0	449,5	20,7	235,9	707,8
ACA - 1	21,5	315,4	763,7	22,1	269,9	689,1	19,8	142,0	468,8
A - 1	21,6	315,4	666,7	22,5	186,0	449,5	20,8	224,4	690,3
Promedio - 1	21,5	308,5	682,5	22,3	227,1	547,5	20,6	189,5	603,7
Mínimo - 1	21,5	291,4	651,0	22,1	186,0	449,5	19,8	142,0	468,8
Máximo - 1	21,6	315,4	763,7	22,5	269,9	689,1	20,8	235,9	707,8
Pio – 2	21,8	136,3	850,6	21,3	179,1	534,7	23,5	32,3	558,6
Jo – 2	21,8	137,2	864,0	21,4	149,6	508,9	23,3	32,3	573,8
Pi – 2	21,8	137,2	949,7	21,4	159,2	435,9	23,4	32,3	562,5
TJ – 2	21,7	137,2	886,9	21,3	159,2	504,1	23,2	32,3	611,1
DM – 2	21,8	137,2	864,0	21,3	160,1	517,5	23,2	32,3	642,5
ACA – 2	21,8	137,2	949,7	21,5	159,2	512,5	23,1	21,8	617,0
HM – 2	21,8	117,3	833,4	21,5	168,6	533,6	23,4	40,6	578,6
A - 2	21,7	137,2	932,2	21,5	148,7	450,1	23,4	32,3	557,2
Promedio - 2	21,8	134,6	891,3	21,4	160,5	499,7	23,3	32,0	587,7
Mínimo - 2	21,7	117,3	833,4	21,3	148,7	435,9	23,1	21,8	557,2
Máximo - 2	21,8	137,2	949,7	21,5	179,1	534,7	23,5	40,6	642,5
Pio – 3	23,6	124,7	797,5	23,8	249,1	629,0	20,7	135,3	649,3
Jo – 3	23,4	124,7	818,2	23,6	210,1	653,3	20,2	140,3	669,5
TJ - 3	23,6	84,6	760,4	24,0	164,6	626,6	21,5	216,2	668,3
DM – 3	23,6	124,7	797,5	23,8	249,1	629,0	19,9	151,5	714,2
ACA - 3	23,4	124,7	952,0	24,0	210,1	580,7	19,4	144,4	655,7
HM – 3	23,6	124,7	797,5	23,7	249,1	650,3	20,9	127,8	626,7
A – 3	23,6	124,7	797,5	23,8	249,1	629,0	20,3	140,8	682,4
Promedio - 3	23,5	119,0	817,2	23,8	225,9	628,2	20,4	150,9	666,6
Mínimo - 3	23,4	84,6	760,4	23,6	164,6	580,7	19,4	127,8	626,7
Máximo - 3	23,6	124,7	952,0	24,0	249,1	653,3	21,5	216,2	714,2

Los valores de la temperatura media diaria, precipitaciones y radiación solar total acumulada en cada uno de las etapas de desarrollo (Tabla 1) durante el ciclo de los cultivos se obtuvieron a partir de la estación agrometeorológica, cercana a los ensayos.

Para cuantificar las variables climáticas, se dividió el ciclo de los cultivos en tres períodos: VE-R2, que corresponde a la etapa de prefloración; R2-R5, que alude a la etapa reproductiva temprana en la cual se establecen la mayoría de los frutos y la tercer

etapa: R5-R7 que es el período de llenado de las semillas.

Los datos se procesaron estadísticamente según análisis de la variancia. La interacción genotipo ambiente para rendimiento se estimó a través de un análisis de variancia bifactorial. Para caracterizar a los ambientes y a los genotipos se realizó un análisis de componentes principales (CP). Este análisis explica la estructura de las variancias - covariancias a través de unas pocas combinaciones lineales de las variables originales (Johnson y Wichén, 1992). Para ello se crea un conjunto menor de variables artificiales denominadas componentes principales que cumplen determinados requisitos matemáticos. Las mismas se pueden representar por los ejes de coordenadas de gráficos que permiten obtener tanto la representación de la dispersión de las variables originales como la

de los genotipos ("Biplots"). Cada componente es una combinación de las variables originales. La correlación entre cada componente y las variables originales establece cuales de estas variables tienen mayor incidencia en cada componente principal y si su efecto es positivo o negativo. La interpretación de los gráficos bidimensionales o tridimensionales se basa en observar la ubicación relativa en los cuatro cuadrantes de los genotipos y variables en función de los componentes principales. Esto permite identificar asociaciones entre genotipos, variables y genotipos con variables. También se realizó un análisis de cluster, según un método de encadenamiento jerárquico (Johnson y Wichén, 1992), que permite agrupar genotipos sobre la base de similitudes o por medidas de distancia estadística de alguna variable. El resultado es un dendrograma en función de las distancias entre los valores de la variable.

Resultados y Discusión

Caracterización de los ambientes climáticos

Los experimentos se realizaron en tres campañas en similares fechas de siembra y sobre un mismo tipo de suelo, en sitios contiguos. Por lo tanto, no existieron diferencias atribuibles al ambiente edáfico entre las campañas y las diferencias ambientales se debieron a factores climáticos, siendo las más importantes la temperatura media diaria, las precipitaciones y la radiación solar incidente media diaria, según una inspección visual de los datos.

Los cultivares estudiados estaban clasificados dentro del GM IV. A pesar de ello, la duración de las etapas fenológicas dentro de cada campaña, difirió entre los genotipos (Tabla 2) debido a la distinta sensibilidad termofotoperiódica, que son los principales factores que regulan el desarrollo de la soja (Martignone et al., 1995). Estas variaciones en la fenología provocaron en algunos tratamientos, diferencias en las variables ambientales, principalmente en las precipitaciones recibidas y en la radiación solar incidente acumulada en cada etapa fenológica (Tabla 1). Las diferencias de estos dos últimos factores fueron variables entre las etapas fenológicas y campañas. Esto

determinó que los ambientes climáticos fuesen distintos para los cultivares en las tres campañas.

Para caracterizar las tres campañas, se realizó el análisis de componentes principales utilizando las variables climáticas. Las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) explican el 89 % de la variabilidad total y permiten separar a las campañas en tres grupos bien definidos (Tabla 3). La CP3 explica solo un 8% de la variabilidad total (datos no mostrados).

Analizando los coeficientes de correlación entre las variables originales y cada componente principal (Tabla 3), podemos apreciar que en la CP1, todas las correlaciones fueron significativas, excepto las precipitaciones en VE-R2. Las variables climáticas con mayor incidencia en la caracterización del ambiente fueron: temperatura media, lluvias y radiación solar acumulada entre R2-R5 y temperatura media y lluvias entre R5-R7. Este componente mostró que los factores climáticos ocurridos durante la fase reproductiva de los cultivos fueron los que tuvieron más incidencia en la separación de la campaña 2 respecto de la 1 y 3.

Tabla 2:
Duración de las etapas fenológicas de los cultivares estudiados. Abreviaturas según Tabla 1.

Genotipo – campaña	Duración de las etapas fenológicas		
	VE - R2	R2 - R5	R5 - R7
Pio - 1	41	31	44
Jo - 1	44	29	40
Pi - 1	43	34	42
TJ - 1	41	29	43
DM - 1	42	23	49
ACA - 1	47	38	37
A - 1	42	23	47
Pio - 2	43	31	33
Jo - 2	44	29	34
Pi - 2	48	27	34
TJ - 2	45	29	38
DM - 2	44	30	40
ACA - 2	48	30	40
HM - 2	42	30	33
A - 2	47	26	32
Pio - 3	40	33	44
Jo - 3	41	34	45
TJ - 3	38	31	47
DM - 3	40	33	48
ACA - 3	48	31	45
HM - 3	40	34	42
A - 3	40	33	46

Con respecto a la CP2, las variables temperatura media y radiación solar acumulada entre VE-R2 presentaron una correlación positiva, mientras que las lluvias entre VE-R2 mostró una correlación negativa con dicha componente. Las tres fueron significativas, representando la influencia de las variables climáticas sobre los estadios vegetativos (VE-R2), que marca las diferencias entre las campañas 1 y 3.

A los efectos de facilitar la comprensión de la Figura 1, el signo negativo de los coeficientes de correlación correspondientes a la CP1 (Tabla 3), determina que cuanto mayores fueron los valores de estas variables, el resultado de la CP1 fue menor. Cuanto menor es el ángulo entre el vector que representa la variable climática y el vector que representa

Tabla 3:
Coeficientes de correlación entre las variables climáticas y las componentes principales 1 y 2, correspondientes a la caracterización climática de las campañas y porcentaje de la variancia explicada por cada componente. Abreviaturas según Tabla 1.
Tabla 4: Rendimiento, número de semillas por m²; peso de 1000 semillas y biomasa aérea en R8 correspondiente a los cultivares estudiados. Valores promedios, mínimos y máximos de las respectivas campañas. Abreviaturas según Tabla 1.

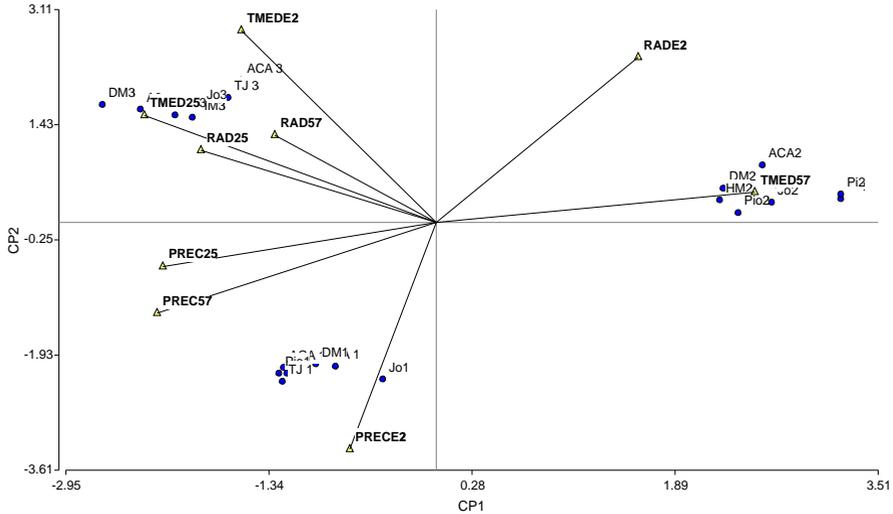
Variable	Coeficientes de Correlación	
	CP1	CP2
TMED VE - R2	-0,58 *	0,81 *
PREC VE - R2	-0,26	-0,95 *
RAD VE - R2	0,60 *	0,69 *
TMED R2 - R5	-0,87 *	0,45
PREC R2 - R5	-0,81 *	-0,18
RAD R2 - R5	-0,70 *	0,30
TMED R5 - R7	0,94 *	0,13
PREC R5 - R7	-0,83 *	-0,38
RAD R5-R7	-0,48 *	0,37
% de la variación explicada	57 %	32 %

los genotipos, mayor es la asociación. Esta Figura muestra que la CP1 separa a los ambientes bajo los cuales se desarrollaron los genotipos, agrupándolos según campañas: los ubicados a la derecha de la figura (semieje positivo de la abscisa) corresponden a los ambientes de los cultivares evaluados en la campaña 2, caracterizada por menores valores de temperatura media diaria, precipitaciones y radiación solar incidente durante R2-R5 y de precipitaciones entre R5-R7 y con valores mayores de temperatura diaria media y de radiación solar incidente durante R5 y R7. Se observó que los cultivares correspondientes a las campañas 1 y 3 se ubicaron a la izquierda del gráfico (semieje negativo de la abscisa) pues se desarrollaron bajo condiciones climáticas opuestas (Tabla 1).

Con un análisis similar, la CP2 separa a los ambientes climáticos en los que estuvieron desarrollándose los cultivares en las campañas 1 y 3: la campaña 1 se caracterizó por mayores valores de precipitaciones y menores valores de temperatura media diaria y de radiación solar incidente durante el período VE-R2 (Figura 1 y Tabla 1). De esta manera se observa que las condiciones

Figura 1:

Biplot correspondiente a la caracterización climática de las campañas. Abreviaturas: Pio = Pioneer 9482, Jo = Joketa 46, TJ = Tijereta 2046, DM = Don Mario 48, ACA = ACA 490, A = A4100 RG, Pi = Pioneer 9492 RG y HM = HM5-41RR. índices 1, 2 y 3 corresponden a las campañas 1997/98; 98/99 y 2000/01, respectivamente. TMED = temperatura media diaria, PREC = lluvias registradas en el período considerado y RAD = Radiación solar incidente acumulada durante la etapa fenológica. ER2; 27 y 57 corresponden a las etapas fenológicas VE-R2; R2-R5 y R5-R7, respectivamente.



climáticas de cada campaña fueron distintas. Además, el grado de dispersión entre los puntos representativos de los ambientes bajo los que se desarrollaron los genotipos en cada campaña, indica la variabilidad entre los ambientes a los que estuvieron sometidos los cultivares. Estas diferencias hacen que, además de las distintas características genéticas, se evidencien comportamientos agronómicos distintos entre genotipos, debidos al ambiente particular que les correspondió.

Caracterización de las respuestas de los genotipos

El análisis de la variancia para rendimiento indicó efectos significativos para campañas ($P = 0,0001$), genotipos ($P = 0,05$) y efectos no significativos para la interacción entre los genotipos y los ambientes ($P = 0,22$). Cada uno de estos factores explica el 36; 11 y 13 %, respectivamente, de la variabilidad total.

En la Tabla 4 se presentan los valores de rendimientos, número de semillas por m^2 , peso de mil semillas y biomasa aérea a cosecha. En cuanto a rendimiento, no existieron diferencias entre las campañas 1 y

3, pero en la campaña 2 los valores fueron menores (según Duncan 0,01%). Idénticas conclusiones se pueden obtener respecto de la biomasa a cosecha. En cuanto a los componentes del rendimiento, las tres campañas difirieron en el número de semillas por m^2 y la campaña 3 presentó el menor tamaño de las semillas. Es evidente que el rendimiento en cada campaña se logró de diferente manera, como se explicará más adelante al realizar el análisis de los componentes principales.

En la Figura 2, el dendrograma muestra el agrupamiento de los genotipos de las tres campañas en función de sus rendimientos. Se efectuó el análisis según los métodos de encadenamiento completo, promedio y Ward. A pesar que las distancias estadísticas para cada método fueron diferentes, el agrupamiento fue el mismo. Por esto, se muestra el resultado del encadenamiento completo. Si el corte se efectúa en un tercio de la distancia máxima (1,24) los genotipos se ubican en cuatro grupos: el primer grupo (G1) corresponde a aquellos con rendimientos mayores a 3900 kg/ha, figurando en la campaña 1 Pioneer 9482 y Don Mario 48 y de

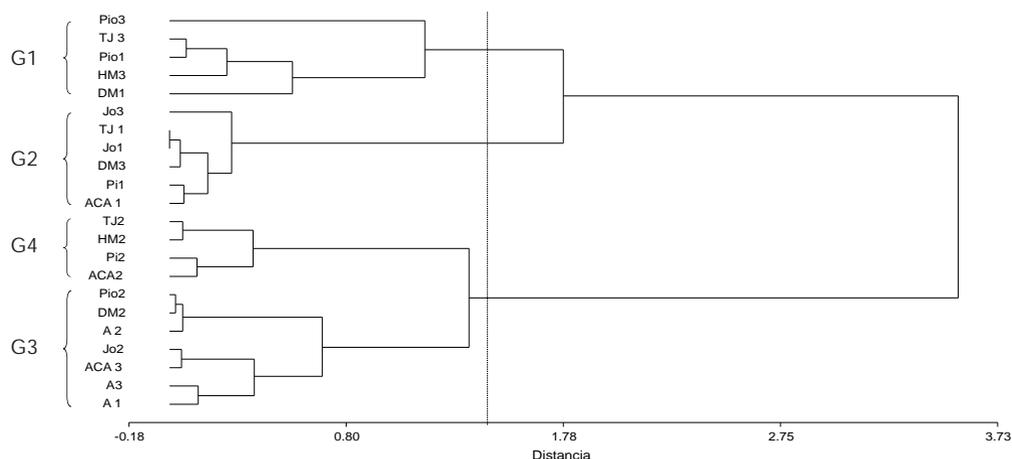
Tabla 4:
Rendimiento, número de semillas por m²; peso de 1000 semillas y biomasa aérea en R8 correspondiente a los cultivares estudiados. Valores promedios, mínimos y máximos de las respectivas campañas. Abreviaturas según Tabla 1.

Genotipo-campaña	Rendimiento (kg/ha)	Nº de semillas/m ²	Peso 1000 semillas (g)	Biomasa en R8 (g/m ²)
Pio - 1	4212	2153	195	9158
Jo - 1	3590	2011	178	7509
Pi - 1	3681	2025	182	9194
TJ - 1	3590	1919	187	8846
DM - 1	3919	2134	185	8736
ACA - 1	3645	1903	192	7711
A - 1	3160	1711	183	6824
Promedio 1	3685	1979	186	8283
Mínimo 1	3160	1711	178	6824
Máximo 1	4212	2153	195	9194
Pio - 2	3033	1547	197	6167
Jo - 2	3333	1888	177	6917
Pi - 2	2783	1523	183	6000
TJ - 2	2650	1367	193	6200
DM - 2	3017	1538	197	7333
ACA - 2	2850	1336	217	6833
HM - 2	2683	1789	150	6083
A - 2	3000	1811	167	6425
Promedio 2	2919	1600	185	6495
Mínimo 2	2650	1336	150	6000
Máximo 2	3333	1888	217	7333
Pio - 3	4529	2681	169	9400
Jo - 3	3740	2494	150	7800
TJ - 3	4170	2381	175	8675
DM - 3	3616	2092	173	7600
ACA - 3	3364	2035	165	7750
HM - 3	4074	2931	139	8025
A - 3	3230	2254	143	6833
Promedio 3	3818	2410	159	8012
Mínimo 3	3230	2035	139	6833
Máximo 3	4529	2931	175	9400

la campaña 3 Pioneer 9482, Tijereta 2046 y HM5-41 RR. El segundo grupo (G2), con rendimientos entre 3500 y 3800 kg/ha involucra, en la campaña 1 a Tijereta 2046, Joketa 46, Pioneer 9492 RG y ACA 490 y de la campaña 3, a Joketa 46 y Don Mario 48. El tercer grupo (G3), con rendimientos entre

3000 y 3400 kg/ha, está compuesto por A 4100 RG de la campaña 1, ACA 490 y A 4100 RG de la campaña 3 y de la campaña 2, Joketa 46, Pioneer 9482, Don Mario 48 y A 4100 RG. Finalmente, el cuarto grupo (G4), con rendimientos menores a 2900 kg/ha está integrado por Tijereta 46, HM5-41RR, Pioneer

Figura 2:
Cluster de agrupamiento de los cultivares en las tres campañas estudiadas según sus rendimientos. Abreviaturas según Figura 1.



9492 RG y ACA 490, todos de la campaña 2.

En el dendrograma (Figura 2) se aprecia que, excepto en el grupo cuatro, los genotipos no se agrupan según las características climáticas de cada campaña. Así en los grupos 1 y 2 se alternaron la mayoría de los genotipos de las campañas 1 y 3 y en el grupo tercero hay genotipos de las tres campañas. Por ejemplo, podemos apreciar que en Pioneer 9482, cuando las condiciones ambientales fueron favorables (campañas 1 y 3), sus rendimientos fueron los mayores y semejantes, pero bajo condiciones climáticas más desfavorables (campaña 2), su rendimiento superó los 3000 kg/ha (Tablas 1 y 4). En el caso de Don Mario 48, bajo las condiciones de la campaña 2 tuvo rendimientos similares a Pioneer 9482, pero en las campañas 1 y 3 su rendimiento fue menor. En A 4100 RG, con rendimientos que oscilaron entre 3000 y 3230 en las tres campañas estudiadas, no respondió a las mejores condiciones climáticas. Si bien el análisis de la variancia no arrojó interacción significativa entre cultivares y ambientes, existieron respuestas diferentes de los cultivares frente a distintas condiciones climáticas.

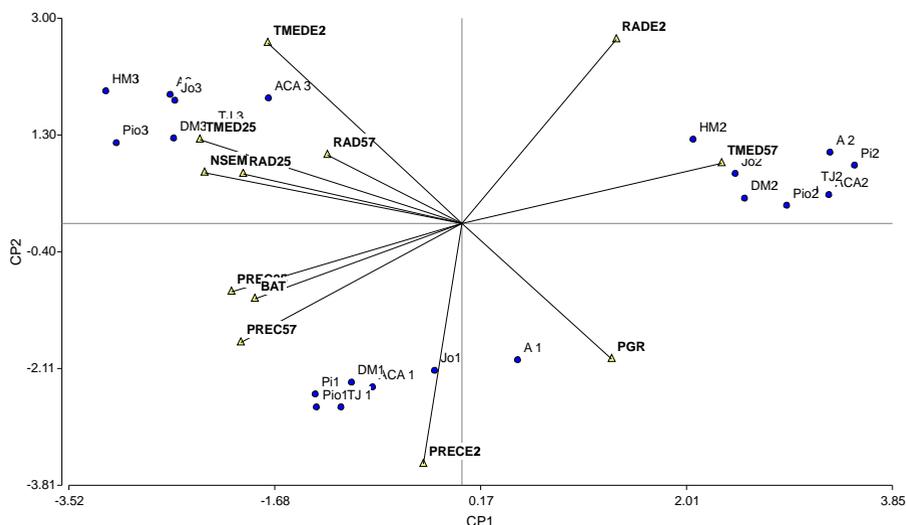
A los efectos de explicar la respuesta de los cultivares en las tres campañas analizadas, se realizó el análisis de componentes principales utilizando las variables climáticas, el número

de semillas por m², el peso de mil semillas y la biomasa seca aérea en R8. En este análisis, las dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) explicaron el 79 % de la variabilidad total (Tabla 5) y permitieron

Tabla 5:
Coeficientes de correlación entre el número de semillas por m² (NSEM); peso de 1000 semillas (PGR), biomasa aérea en R8 (BAT) y las variables climáticas respecto de las componentes principales 1 y 2, correspondientes a la caracterización de los genotipos y porcentaje de la variancia explicada por cada componente. Abreviaturas según Tabla 1.

Variable	Coeficientes de Correlación	
	CP1	CP2
SEM	-0,88 *	0,21
PGR	0,51 *	-0,54 *
BAT	-0,71 *	-0,30
TMED VE - R2	-0,67 *	0,72 *
PREC VE - R2	-0,14	-0,96 *
RAD VE - R2	0,53 *	0,74 *
TMED R2 - R5	-0,90 *	0,34
PREC R2 - R5	-0,79 *	-0,27
RAD R2 - R5	-0,75 *	0,20
TMED R5 - R7	0,89 *	0,24
PREC R5 - R7	-0,76 *	-0,47 *
RAD R5 - R7	-0,46 *	0,27
% de la variancia explicada	49 %	25 %

Figura 3:
Biplot correspondiente a la caracterización de los cultivares según sus rendimientos, número de semillas por m² (NSEM); peso de 1000 semillas (PGR); Biomasa en R8 (BAT). Abreviaturas según Figura 1.



separar a los genotipos en tres grupos bien definidos, concordantes con las características climáticas de las campañas (Figura 3).

Analizando los coeficientes de correlación entre las variables originales y cada componente principal (Tabla 5), se puede apreciar que en la CP1, los atributos de los genotipos que estuvieron más asociados con ella fueron el número de semillas por m² y la biomasa aérea en R8. Estas correlaciones fueron altamente significativas, $P < 0,0001$ ($r = 0,85$ y $0,86$, respectivamente). Estas variables se ubicaron en los cuadrantes de la izquierda de la Figura 3, concordantes con los mayores rendimientos. Las variables climáticas, con correlaciones significativas y asociadas con estas características fueron la temperatura media durante VE-R2, la temperatura media, las lluvias y la radiación solar durante R2 - R5, y las lluvias durante R5-R7. Lo opuesto sucedió con la radiación solar acumulada durante VE-R2 y la temperatura media durante R5-R7, que se ubicaron en los cuadrantes de la derecha. El análisis referido para esta componente demuestra que los factores climáticos ocurridos principalmente durante la etapa reproductiva temprana tuvieron mayor incidencia en el número de semillas por m² y en la acumulación de biomasa aérea. Con respecto a la CP2, que

explica las diferencias entre las campañas 1 y 3, las variables climáticas que caracterizaron a la campaña 3 fueron mayor temperatura media y radiación solar y menor volumen de lluvias durante VE-R2 que las ocurridas en la campaña 1, resultando en un mayor número de semillas por m².

El análisis de las CP (Figura 3) pone en evidencia que en las campañas 1 y 3 los cultivos estuvieron expuestos a condiciones más favorables de precipitaciones, temperatura y radiación solar incidente durante la etapa de formación de las vainas y, en consecuencia de semillas, (R2-R5) lo que se tradujo en altos valores de semillas por m². En estos experimentos no se midió la tasa de crecimiento de cultivo. Sin embargo, los valores de biomasa alcanzados indican que las tasas de crecimiento de cultivo en las campañas 1 y 3 fueron mayores. Existe profusa bibliografía, la cual describe experimentos realizados bajo distintas condiciones de cultivo (por ejemplo, Egli y Zhen-wen, 1991; Board et al., 1995; Vega et al., 2001; Andrade et al., 2000), en las que se demuestra que altas tasas de crecimiento de cultivo durante el periodo reproductivo temprano determinan un mayor establecimiento de destinos (frutos y semillas). Por otra parte, como en esta etapa

se completa el crecimiento vegetativo, también se produjo una mayor acumulación de materia seca en el cultivo. La magnitud de biomasa total está asociada con el rendimiento, pero el índice de cosecha, es relativamente estable (Bodrero et al, 1997). En el mismo sentido, Kumudini et al. (2001) determinaron que la mayor producción de biomasa durante las etapas reproductivas contribuyó en un 78 % al incremento de los rendimientos y que el incremento del índice de cosecha sólo lo hizo en un 22 %. Una adecuada disponibilidad hídrica durante el llenado de las semillas, R5-R7, hubiera permitido mayores tasas fotosintéticas y un mayor período de llenado de las semillas (Tabla 2) que contribuyesen a un adecuado llenado de las semillas (Andrade et al, 2000). Esta idea es coincidente con la propuesta por Board et al. (1995) quienes concluyeron que la tasa de crecimiento de cultivo entre R1 y R7 afecta el rendimiento, alterando el número de vainas y que el período R1-R6 es el más sensible ante una disminución de dicha tasa.

Si bien los rendimientos promedios de las campañas 1 y 3 fueron similares (Tabla 4), se detectaron diferencias en el comportamiento de los componentes del rendimiento. Durante la campaña 3, los cultivares presentaron un mayor número de semillas por m², lo cual fue probablemente debido a una mayor radiación solar recibida durante las etapas vegetativa y reproductiva temprana (Tabla 1). La Figura 3 muestra que en la campaña 3 los cultivares produjeron mayor número de semillas por m² y que estuvieron bajo mayores niveles de radiación solar incidente. La baja asociación entre la precipitación durante VE-R2 y el número de semillas por m² en la campaña 3 puede explicarse por una probable alta acumulación de agua en el perfil a la siembra, de modo que los cultivos pudieron aprovechar los mayores niveles de radiación. Al tratarse de siembras en el mes de noviembre con un largo período de barbecho, la disponibilidad

hídrica no habría sido crítica. Más aún, esta afirmación es coincidente con la opinión de Calviño y Sadras (1999) quienes postulan que es improbable que se generen deficiencias hídricas en etapas tempranas del desarrollo del cultivo en suelos profundos y con altas precipitaciones y baja demanda evaporativa en los meses de octubre y noviembre. Por ello, se lograron altos valores de acumulación de biomasa. Luego, durante el período de establecimiento y llenado de las semillas, altos niveles de radiación solar incidente habrían provocado mayor tasa de crecimiento de cultivo, conduciendo a los mayores valores de número de semillas por m². El menor peso de mil semillas en la campaña 3 fue consecuencia de un mayor número de destinos establecidos (Tabla 4).

En cuanto a la campaña 2, la CP1 demuestra que los genotipos "ubicados" en los cuadrantes derechos, tuvieron los menores rendimientos, como consecuencia de un bajo número de semillas por m² y de biomasa aérea que los "ubicados" en los cuadrantes opuestos (Figura 3). Las causas fundamentales de esta situación fueron las menores precipitaciones y una menor radiación solar incidente en los períodos reproductivos. En este sentido, nótese la ubicación opuesta a los genotipos de los vectores correspondientes a las lluvias y radiación solar incidente en los períodos R2-R5 y R5-R7. En esta campaña, el menor número de semillas por m² fue compensado parcialmente por el mayor tamaño de las mismas. Períodos de estrés durante R5.5 y R6 suelen causar grandes pérdidas de rendimiento por reducciones en el número de vainas por planta y de semillas por vaina los que causan una disminución en el número de semillas por m², y en menor medida en el tamaño de las mismas (Bodrero, et al, 1997). Si bien, los efectos sobre el tamaño de las semillas se evidencia en estadios posteriores, entre R6 y R6.5, en esta campaña no se produjeron diferencias.

Conclusiones

Esta metodología simple y fácilmente realizable con software habitualmente disponible en distintas instituciones públicas y privadas permite el análisis de experimentos en varios ambientes, por ejemplo, de distintas campañas o sitios experimentales, y contribuyen a explicar las respuestas debidas a características ambientales y genéticas particulares. La utilización de técnicas de análisis multivariado, que incluyen análisis de clusters y de componentes principales, permiten agrupar a los genotipos según sus modelos de respuesta frente a las condiciones ambientales. También se pueden agrupar los ambientes en función de la forma que inciden sobre el comportamiento de los cultivares. De

esta manera, al comprender más claramente las relaciones existentes entre los cultivares y las características de los ambientes, se logran identificar los genotipos superiores para cada uno de ellos). La metodología propuesta se considera superior a la utilizada en general hasta el presente, dado que permitiría progresar más rápidamente en la identificación de la respuesta de los cultivares al ambiente y contribuiría a un aumento sostenido de los rendimientos, dado que esta técnica permite asociar las respuestas con las bases ecofisiológicas de los genotipos y, eventualmente, definir características específicas (De la Vega et al, 2002).

Bibliografía

ANDRADE, F.H.; AGUIRREZÁBAL, L.A.N. y RIZZALLI, R.H. 2000. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade, F.H. y Sadras, V.O. (Eds.) Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. EEA INTA Balcarce Fac. Ciencias Agrarias UNMP. p. 61 - 96.

ANDRIANI, J. y BODRERO, M.L. 1995. Respuesta de cultivares de soja a la disponibilidad hídrica. Compendio de Trabajos 1er Congreso Nac. de Soja y 2da Reunión Nac. de Oleaginosos, Pergamino, Bs As. Tomo I Cap. II p. 81 - 87.

BOARD, J.E.; WIER, A.T. y BOETHEL, D.J. 1995. Source strength influence on soybean yield formation during early and late reproductive development. *Crop Sci.* 35: 1104 - 1110.

BODRERO, M.L.; ANDRIANI, J.; BACIGALUPPO, S.; CAPURRO, J.; FELIZIA, J.C.; GELIN, A.; GENTILI, O.; GONZÁLEZ, M.C.; MASSARO, R.; PAGANI, R.; PRIETO, G.; REGIS, C. y TRENTINO, N. 2001. Evaluación de cultivares de soja grupos de madurez III, IV, V y VI en siembras de primera época en diferentes ambientes del sur de Santa Fe. Campaña 2000/2001. *Soja* 18: 51 - 57, EEA Oliveros INTA, Oliveros.

BODRERO, M.; ANDRIANI, J.; BACIGALUPPO, S. GESTER, G.; QUIJANO, A.; MARTIGNONE, R. y VAN LACKE, A. 2002. Factores limitantes del rendimiento y determinantes de su variabilidad en el cultivo de soja, campaña 2001/02. *Soja* 21: 16 - 25, EEA Oliveros INTA, Oliveros.

BODRERO, M.L.; MORANDI, E.N.; MARTIGNONE, R.A.; BAIGORRI, H.E.J.; ANDRADE, F.H.; MEIRA, S. y GUEVARA, E. 1997. Ecofisiología del cultivo. En: Giorda, L.M y Baigorri, H.E.J. (eds.) El cultivo de la soja en Argentina. INTA C.R. Córdoba, San Juan. p 30 - 50.

BRANCOURT-HULMEL, M.; LECOMTE, C. y MEYNARD, J.M. 1999. A diagnosis of yield limiting factors on probe genotypes for characterizing environments in winter wheat trials. *Crop Sci.* 39: 1798 - 1808.

CALVIÑO, P.A y SADRAS, V.O. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Res.* 63: 237 - 246.

CROSSA, J. 1990. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55 - 85.

DE LA VEGA, J.A.; CHAPMAN, S.C. y HALL, A.J. 2001. Genotype by environment interaction and indirect selection for yield in sunflower. I. Two-mode pattern analysis of oil and biomass yield across environments in Argentina. *Field Crops Res.* 72:17 - 38.

DE LA VEGA, J.A. HALL, A.J. y KRONENBERG, P.M. 2002. Investigating the physiological bases of predictable and unpredictable genotype by environment interactions using three - mode pattern analysis. *Field Crops Res.* 78:165 - 183.

- EBERHART, S.A. y RUSSELL, W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36 - 40.
- EGLI, D.B. y ZHEN-WEN, Y. 1991. Crop growth rate and seeds per unit area in soybean. *Crop Sci.* 31:439 - 442.
- FEHR, W.R. y CAVINESS, C.E. 1977. Stages of soybean development. *Iowa Agric. Exp. Sta. Spec. Rep.* 80.
- FINLAY, K.W. y WILKINSON, G.N. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust. J. Agric. Res.* 14:742 - 754.
- GAUCH, Jr., H.G., 1992. Statistical analysis of regional yield trials: AMMI analysis of factorial designs. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 279 pp.
- GHIDA DAZA, C.; PERETTI, M.; MUÑOZ, R. y URQUIZA, B. 1997. Producción, economía y comercialización. En: Giorda, L.M y Baigorri, H.E.J. (eds.) El cultivo de la soja en Argentina. INTA C.R. Córdoba, San Juan. p 385 - 394.
- HAUSSMANN, B.I.G.; OBILANA, A.B.; AYIECHO, P.O.; BLUM, A.; SCHIPPRACK, W. y GEIGER, H.H. 2000. Yield and yield stability of four population types of grain sorghum in a semi-arid area of Kenya. *Crop Sci.* 40: 319 - 329.
- JOHNSON, R.A. y WICHEN, D.W. 1992. Applied multivariate statistical analysis. Prentice-Hall International, Inc. New Jersey, USA. 642 pp.
- KUMUDINI, S.; HUME, D.J. y CHU, G. 2001. Genetic improvement in short season soybeans: I. dry matter accumulation, partitioning, and leaf area duration. *Crop Sci.* 41:391 - 398.
- MARTIGNONE, R.A.; BODRERO, M.L.; MORANDI, E.N. y QUIJANO, A. 1995. Siembra tardía en soja: Influencia sobre la fenología y el rendimiento. Compendio de trabajos presentados 1er Congreso Nacional de Soja y 2da Reunión Nac. de Oleaginosos, Pergamino. Tomo I, Cap. II p. 254 - 261.
- MORANDI, E.N., BODRERO, M.L.; MARTIGNONE, R.A. y QUIJANO, A. 1991. Respuesta de distintos genotipos de soja a la época de siembra y a la disponibilidad hídrica. *Evolución: Primera Reunión Nacional de Oleaginosos*, pp. 89 - 95.
- ROSBACO, I.; ROMAGNOLI, M.; BISARO, V. y PEDROL, H. 1999. Estabilidad de los rendimientos en cultivares de soja de Grupo de Maduración IV durante las campañas agrícolas 1996/99, en Zavalla, Santa Fe. *Revista Agrovisión Profesional* 6 (28):10 - 11.
- SALINES, L.A.; SOLDINI, D.O.; LORENZO, N.; FUENTES, F.H.; SPONTÓN, F.V.; GILLIN, E.; WEILENMANN DE TAU, M.E.; SUÁREZ, J.C. y ZELARRAYÁN, E. 1997. Mejoramiento. En: Giorda, L.M y Baigorri, H.E.J. (eds.) El cultivo de la soja en Argentina. INTA C.R. Córdoba, San Juan. p 53 - 86.
- VARGAS, M.; CROSSA, J.; SAYRE, K.; REYNOLDS, M.; RAMÍREZ, M.E. y TALBOT, M. 1998. Interpreting genotype x environment interaction in wheat by partial least squares regression. *Crop Sci.* 38: 679 - 689.
- VEGA, C.R.C.; ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O.; UHART, S.A. y VALENTINUZ, O.R. 2001. Seed number as a fraction of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Sci.* 41: 748 - 754.
- YAN, W. y HUNT, L.A. 2001. Interpretation of genotype x environment interaction for winter wheat yield in Ohio. *Crop Sci.* 41: 19 - 25.