

## **T14 - VARIACIONES DEL RENDIMIENTO DE SOJA EN EL SUR DE SANTA FE. FACTORES LIMITANTES DE CLIMA Y SUELO.**

S. Bacigaluppo<sup>(1)</sup>, J. Dardanelli<sup>(2)</sup>, G. Gerster<sup>(1)</sup>, A. Quijano<sup>(4)</sup>, M. Balzarini<sup>(3)</sup>, M. Bodrero<sup>(1)</sup>, J. Andriani<sup>(1)</sup> y J. Enrico<sup>(1)</sup> - <sup>(1)</sup>EEA INTA Oliveros. Ruta 11 km353, 2206 Oliveros. E-mail [sbacigaluppo@correo.inta.gov.ar](mailto:sbacigaluppo@correo.inta.gov.ar) <sup>(2)</sup>EEA INTA Manfredi. <sup>(3)</sup>Fac. Cs. Agropecuarias (UNC)-CONICET. <sup>(4)</sup>Fac. Cs. Agrarias (UNR).

### **INTRODUCCIÓN**

Las variaciones del rendimiento de los cultivos pueden explicarse a partir de efectos de genotipo (G), ambiente (A) y de su interacción (G x A). La importancia relativa de estas fuentes de variación cambia según el origen de los ambientes y genotipos. Comúnmente, el efecto ambiental explica la mayor parte de las variaciones (Yan et al, 2000; Gerster, 2001; Dardanelli et al, 2006). En la región de cultivo de soja del Sur de Santa Fe, las variaciones ambientales se relacionan fundamentalmente con factores que afectan tanto el desarrollo como el crecimiento. El desarrollo está controlado principalmente por el fotoperíodo y la temperatura, mientras que el crecimiento depende tanto de factores climáticos como de suelo. Actualmente, el sistema más difundido en la región es la siembra directa (90 % de la superficie cultivada, RIAP 2006). La adopción de la agricultura continua y las prácticas culturales asociadas, han producido cambios físico-químicos en los suelos que parecieran explicar parte de las variaciones observadas en el rendimiento entre lotes y años.

El objetivo de este trabajo es identificar aquellos factores de suelo y/o clima, posibles de ser usados en modelos de predicción, que mejor explican las variaciones en el rendimiento de cultivos de soja, bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe.

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

Durante las campañas 2001/02, 2002/03 y 2003/04 se condujo una red de ensayos (RED) en 6, 7 y 7 localidades del sur de Santa Fe, respectivamente. En las mismas se evaluaron 17 genotipos de soja sembrados entre el 1/11 y el 5/12 en lotes de productores. Todos los ensayos se implantaron sobre un suelo perteneciente al gran grupo Argiudol y bajo un sistema de siembra directa con un diseño en bloques completamente aleatorizados. Utilizando la información de la RED, se obtuvo, mediante análisis de varianza, la contribución porcentual de los efectos del ambiente, genotipo y su interacción sobre el rendimiento en la región de interés.

Para 3 genotipos: DM 4800 RR (GM IV), A 5520 RG (GM V) y A 6040 RG (GM VI), se determinaron los estadios fenológicos E, R2, R5 y R7 según Fehr & Caviness (1977). En R8, se efectuó un muestreo de éstos en 10 m<sup>2</sup> y se determinó el rendimiento en semilla expresado al 13,5 % de humedad. En cada localidad se registraron además variables de suelo, químicas: contenidos de materia orgánica y fósforo en el horizonte A y físicas: profundidad hasta el horizonte B textural, conductividad hidráulica saturada, presencia de estados masivos delta (bloques sin porosidad estructural) y presencia de pisos subsuperficiales compactados. Además, al inicio del cultivo se determinó el contenido de humedad del suelo hasta los dos metros de profundidad, con sonda de neutrones, calculándose el agua útil inicial (AUI), (Bodrero et al, 2004). A partir de registros climáticos, se obtuvieron para cada localidad, el fotoperíodo, las precipitaciones, la radiación incidente y la temperatura media diaria por subperíodos: **1**: emergencia-floración (E-R2); **2**: floración-inicio de llenado de granos (R2-R5); y **3**: llenado de granos (R5-R7).

Cada combinación de campaña, localidad y genotipo (para los 3 genotipos mencionados), fue identificada como un ambiente, para ajustar modelos de regresión lineal múltiple del rendimiento en función de variables de clima y suelo. La finalidad de la modelación, fue clasificar a los distintos factores en función de la magnitud de sus correlaciones directas con el rendimiento (por ejemplo, correlaciones después de descontar el efecto de otros factores concomitantes). Los residuos parciales de un único modelo para todos los datos, indicaron la conveniencia de utilizar al menos dos modelos para explicar la variación ambiental del rendimiento en la región. Para la selección de variables se utilizó el procedimiento backward. El error cuadrático medio de predicción fue

utilizado como medida de la capacidad predictiva de los modelos ajustados (InfoStat 2004).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la varianza para el rendimiento (datos de la RED), mostró que el efecto del ambiente explicó un 63, 65 y 83% de la variación del rendimiento en las campañas 2001/02, 2002/03 y 2003/04, respectivamente. El ambiente fue netamente el factor principal de variación de los rendimientos, no obstante la interacción GxA resultó también significativa. Las variaciones entre los genotipos fueron significativas en dos de las tres campañas; en la campaña 2003/2004, la variación total fue explicada exclusivamente por efecto del ambiente y de la interacción (Tabla 1). La caracterización de las variables de clima y suelo que se utilizaron para evaluar diferentes modelos para la relación rendimiento-clima-suelo, se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 1.** Efectos (en porcentaje) del ambiente, genotipo e interacción sobre la variación en rendimientos de soja, bajo siembra directa, en el Sur de Santa Fe.

Campaña	Ambiente	Genotipo	Genotipo x Ambiente
2001/02	63	19	18
2002/03	65	16	18
2003/04	83	0	17

**Tabla 2.** Variables climáticas y de suelo en la región de cultivo de soja en el Sur de Santa Fe.

Variable Climáticas	Abreviatura	Unidad	Media	Mínimo	Máximo
Radiación incidente acumulada en el subperiodo 1	Ra1	Mjoule/m <sup>2</sup>	929	560	1390
Radiación incidente acumulada en el subperiodo 2	Ra2	Mjoule/m <sup>2</sup>	658	431	1033
Radiación incidente acumulada en el subperiodo 3	Ra3	Mjoule/m <sup>2</sup>	528	332	706
Temperatura media diaria, promedio del subperiodo 1	Tm1	°C	23	22	25
Temperatura media diaria, promedio del subperiodo 2	Tm2	°C	24	23	26
Temperatura media diaria, promedio del subperiodo 3	Tm3	°C	23	20	26
Fotoperíodo diario, promedio del subperiodo 1	Fot1	Hs de luz	15	14	15
Fotoperíodo diario, promedio del subperiodo 2	Fot2	Hs de luz	15	14	15
Fotoperíodo diario, promedio del subperiodo 3	Fot3	Hs de luz	13	13	14
Precipitaciones acumuladas en el subperiodo 1	Pr1	mm	207	57	421
Precipitaciones acumuladas en los subperiodos 2 y 3	Pr2+3	mm	286	66	532

**Tabla 2.** Variables climáticas y de suelo en la región de cultivo de soja en el Sur de Santa Fe, (continuación).

VARIABLES DE SUELO	ABREVIATURA	UNIDAD	MEDIA	MÍNIMO	MÁXIMO
Humedad inicial del suelo hasta 2 m de profundidad	AUI	mm	263	200	380
Contenido de materia orgánica en el horizonte A	MO	%	3.02	2.23	3.65
Profundidad hasta el horizonte B textural	PrB2t	cm	25.90	14.67	33.33
% de estados masivos delta en el perfil del suelo	%Mdel	%	20.19	0.00	54.00
Presencia de pisos subsuperficiales compactos.	%pisos	%	48.61	19.00	93.00
Conductividad hidráulica saturada	Chid	cm/seg	0.00070	0.00030	0.00150

El análisis de los residuos parciales de un único modelo entre rendimiento y las variables de suelo y clima, indicó que la relación rendimiento-precipitación es dependiente del nivel de precipitaciones acumuladas en el periodo reproductivo (Pr2+3). Se observaron dos comportamientos diferenciados según esta precipitación fuese menor o mayor a 180 mm. Para Pr2+3 menores a 180 mm se visualizó una relación lineal positiva entre rendimiento y precipitación acumulada, que se desvanece cuando los valores de Pr2+3 superan los 180 mm. Por tal razón, se ajustaron dos modelos de regresión independientes, uno utilizando los ambientes con Pr2+3 de hasta 180 mm y otro con aquellos donde Pr2+3 había superado este valor.

Para ambientes de precipitaciones  $\leq 180$  mm en el periodo reproductivo, el mejor modelo de regresión múltiple obtenido ( $R^2 = 0.82$ ) incluyó sólo dos variables: Pr2+3 y %masivos delta, sugiriendo que la variación en la aptitud de estos ambientes, se puede predecir (con un error de predicción de **30 gr/m<sup>2</sup>**) a partir de los niveles de estas dos variables (Modelo1):

$$\text{Modelo 1: Rendimiento} = 196,59 - 1,23*\%Mdel + 1,20*Pr2+3$$

Ambientes con mayores precipitaciones en el periodo reproductivo y con menor presencia de bloques masivos delta, fueron los que produjeron los mayores rendimientos bajo este rango de precipitaciones de moderadas a escasas. El segundo modelo, (Modelo 2) ( $R^2 = 0.60$ ), obtenido a partir de ambientes con Pr2+3 mayores a 180 mm, sugiere que la aptitud del ambiente puede ser predicha (con un error de predicción de **45 gr/m<sup>2</sup>**) por la radiación incidente acumulada en el subperiodo R5-R7, el contenido de materia orgánica del suelo y la presencia de estados masivos delta en el perfil del suelo:

$$\text{Modelo 2: Rendimiento} = - 678,23 + 45,87*MO - 1,39*\%Mdel + 3,07*Ra3 - 0,0025*Ra3^2$$

Ambientes con mayor Ra3, mayor % MO y menor presencia de estados masivos delta en el perfil del suelo, fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando las precipitaciones en el periodo reproductivo fueron de moderadas a abundantes. Es importante destacar que un modelo alternativo (Modelo 3) ( $R^2 = 0.60$ ), que incorpora la variable conductividad hidráulica saturada en lugar de %Mdel mostró un ajuste sólo ligeramente menor (**48 gr/m<sup>2</sup>** de error de predicción) al Modelo 2.

$$\text{Modelo 3: Rendimiento} = -669,82 + 34,77*MO + 101625,87*Chid + 2,82*Ra3 - 0,0023*Ra3^2$$

El Modelo 3, sugiere que ambientes con mayor Ra3, mayor % MO y alta velocidad de infiltración de agua (conductividad hidráulica saturada) producirán mayores rindes cuando las precipitaciones en el periodo reproductivo sean de moderadas a abundantes. Ambos modelos indican que cuando los ambientes son más favorables en relación a la disponibilidad hídrica, algunas propiedades físicas del suelo (que implicarían indirectamente mayor disponibilidad de agua a través de mejor infiltración), junto con la oferta de radiación (que puede traducirse en mayor producción de materia seca), son suficientes para explicar la variabilidad en los rendimientos.

En las Tablas 3 y 4, se muestran valores promedio de rendimientos para grupos de ambientes clasificados según la "aptitud" sugerida por las variables identificadas como de

mayor peso. Los ambientes fueron agrupados según los siguientes valores umbrales para cada variable: 23% para %Mdel, 3.09% para MO, 540 MJoule/m<sup>2</sup> para Ra3 y 150 mm para Pr 2+3 (valores obtenidos a partir de gráficos de residuos parciales). Las variables fueron clasificadas como “Mayor” o “Menor” según el caso estudiado mostrase valores superiores o inferiores al umbral determinado para cada una.

**Tabla 3.** Rendimiento promedio para ambientes con Pr2+3 menores a 180 mm.

Pr 2+3	%Mdel	Rendimiento (kg/ha)	% de rinde máximo
Mayor	Menor	3925	100
Mayor	Mayor	3662	93
Menor	Mayor	2646	67

**Tabla 4.** Rendimiento promedio para ambientes con Pr2+3 mayores a 180 mm.

Ra3	MO	%Mdel	Rendimiento (kg/ha)	% de rinde máximo
Mayor	Mayor	Menor	3961	100
		Mayor	3879	98
Menor	Mayor	Menor	3651	92
		Mayor	2538	64
Mayor	Menor	Menor	3238	82
		Mayor	3235	82
Menor	Menor	Menor	2725	69
		Mayor	2573	65

## CONCLUSIÓN

Las variaciones en el rendimiento de los diferentes ambientes para el cultivo de soja bajo siembra directa en el Sur de Santa Fe, pueden ser caracterizadas mediante pocas variables de clima y suelo. El valor de 180 mm de precipitaciones acumuladas durante el período reproductivo, separó situaciones de diferente comportamiento. Para precipitaciones menores a 180 mm, la cantidad acumulada de éstas conjuntamente con la presencia de estados masivos delta en el suelo, determinan las variaciones del rendimiento. Los ambientes de menor aptitud (Menor Pr 2+3 y Mayor % Mdel) sufrieron una merma de rendimiento del 33% respecto a los de mejor aptitud productiva. Para precipitaciones mayores a 180 mm, las variaciones en rendimiento, se explican por diferencias en la radiación acumulada en el llenado de granos, y por factores de suelo, como la presencia de estados masivos delta o la conductividad hidráulica saturada y el contenido de materia orgánica. Los ambientes de menor aptitud (Menor Ra3, Menor MO y Mayor %Mdel) sufrieron mermas del rendimiento de hasta el 35% respecto a los de mejor aptitud productiva.

Si bien el contenido de humedad inicial del suelo es una importante variable agronómica a tener en cuenta, no quedó incluida en ninguno de los Modelos obtenidos. Esto probablemente se deba a que, para todos los casos observados en estos ensayos, los valores de AUI fueron moderadamente altos y de baja variación entre ellos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bodrero M, Andriani J, Bacigaluppo S, Gerster G, Quijano A, Enrico J, Martignone R. 2004. Caracterización de ambientes para la producción de soja en sistemas de siembra directa en el Sur de Santa Fe. Para Mejorar la Producción N° 27, pág. 8-16. EEA INTA Oliveros.
- Dardanelli J.; Balzarini, M.; Martínez M.J.; Cuniberti, M.; Resnik, S.; Ramunda, S.F.; Herrero, R.; Baigorri, H. 2006. Soybean Maturity Groups ,Environments and their Interaction define Mega-environments for Seed Composition in Argentina. Crop Science, in press.
- Fehr, W.R y Caviness, C.E. 1977. Stages of soybean development, Ames, IA. Iowa State University. Special Report 80. 11 p.
- Gerster Guillermo. 2001. Incidencia del estado estructural del suelo sobre el rendimiento del cultivo de soja. Para Mejorar la Producción N° 18, pág 39-42. EEA INTA Oliveros.
- InfoStat 2004. Universidad Nacional de Córdoba. Estadística y Diseño FCA [www.infostat.com.ar](http://www.infostat.com.ar).
- RIAP. Red de Información Agroeconómica para la Región Pampeana, INTA. 2006. <http://riap.inta.gov.ar>
- Yan, W.; Hunt, L.A.; Sheng, Q. y Szlavnic, Z. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. Crop Sci. 40: 597-605.