

## Análisis de estabilidad de variedades y evaluación de correlación de rendimientos de localidades

José R. Sánchez\*; Fernando Ledesma\*; Marcela Escobar\*; Juan Pablo Nemeć\*; Franco Scalora\*; Horacio Gómez\*; Gabriela C. López\*, Gabriel Lizondo\* y Mario Devani\*.

\*Sección Granos, EEAOC. E-mail: granos@eeaoc.org.ar

Los datos que año tras año produce la Red de variedades de soja del noroeste argentino (NOA) posibilitan distintos tipos de análisis de los mismos, como ser el de estabilidad de las variedades a través de un índice ambiental con ajuste lineal (ítem a.). A la vez, como cada campaña difiere de las anteriores, dada la alta variación agroclimática interanual, es menester evaluar estos valores de rendimiento en cada campaña de manera diferente, a fin de entender el comportamiento del cultivo en los distintos puntos de ensayo y generar así alguna tendencia o correlación entre ellos y algún factor en común (ítem b.).

### ► a. Interacción Genotipo-Ambiente: análisis de índice ambiental con ajuste lineal

Mientras que el **genotipo** (G) hace referencia a la composición genética de un individuo (es decir, a la secuencia de nucleótidos del ácido desoxirribonucleico ADN que se transmiten de padres a hijos); el **fenotipo** (F) se refiere a la apariencia o rasgos discernibles, que pueden ser observables a nivel físico, morfológico, anatómico o bioquímico y que dependen de la expresión de ese genotipo en un **ambiente** (A). Siguiendo esta línea, un ambiente puede definirse como el conjunto de circunstancias que rodean a un organismo (Kang, 1997). En este

artículo, el término “ambiente” se considera sinónimo de ‘localidad’, ya que ambos indican una variación espacial que implica una oferta diferencial de recursos bajo las cuales las plantas se desarrollan (involucra años, condiciones edáficas, hídricas, prácticas de manejo, etc.). Por lo tanto, el genotipo de un individuo no determina inequívocamente su fenotipo, siendo este último, producto de la interacción con el ambiente (Romagosa and Fox, 1993).

Esta **interacción genotipo-ambiente** (GxA) debe ser entendida como cambios en el comportamiento relativo de las variedades en función de su posicionamiento en situaciones contrastantes. Conocer dicho comportamiento permite realizar una selección adecuada de la variedad de soja que se sembrará de acuerdo a la disponibilidad de recursos de cada sistema productivo.

### ■ Metodología

El análisis de índice ambiental ofrece la posibilidad de observar, a través de gráficos, cómo se comportan los distintos materiales en respuesta a mejoras en las condiciones ambientales. Para ello, los gráficos se conforman de la siguiente

manera: con los valores promedio de rendimientos kg/ha de las variedades en cada localidad se obtienen los índices ambientales, que se ubican en el eje de las abscisas, ordenados de menor a mayor. Sobre ellos, en el eje de las ordenadas, se localizan los puntos de los valores de rendimiento logrados por cada variedad en cada ambiente (también de manera creciente). De esta forma, para cada localidad se obtiene una nube de puntos que sirven de base para realizar el ajuste lineal de los materiales. Así, la pendiente de la recta obtenida nos indica el comportamiento del genotipo, pudiendo determinar la “estabilidad” (pendiente  $\leq 1$ ) o “adaptabilidad” (pendiente  $> 1$ ) de cada material, en función de la caída de su rendimiento por cada unidad de merma en el potencial productivo (pendiente de la relación lineal entre rendimiento y el nivel de producción de cada ambiente evaluado) (Uhart and Correa, 2001).

En función a lo mencionado anteriormente, es conveniente recordar los conceptos de estabilidad y adaptabilidad: la estabilidad (con un sentido homeostático) hace referencia a la capacidad de un genotipo de mantener un rendimiento constante en diferentes situaciones productivas o, expresado de otra forma, presenta menos sensibilidad a cambios en el ambiente. Mientras que la adaptabilidad implica una mayor respuesta por parte de una variedad a medida que disponemos de una mayor oferta de recursos. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se puede observar al genotipo “A”, de comportamiento estable (pendiente de 0,8), lo que implica que su rendimiento varía en 0,8 kg/ha cuando el ambiente cambia en 1,0 kg/ha. En cambio, el genotipo “B”

adaptable (pendiente de 1,2), varía su rendimiento en 1,2 kg/ha cuando el ambiente cambia en 1,0 kg/ha (Ermacora, 2006).

Siguiendo esta metodología, para cada grupo de madurez (GM) evaluado se confeccionó un gráfico con sus respectivas variedades, la ecuación de la recta de regresión y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de la misma.

Adicionalmente, a modo de resumen, se presenta un gráfico en el que se encuentran las 24 variedades analizadas en la campaña 2021/2022, ordenadas de acuerdo al rendimiento promedio de las mismas (en el eje de las abscisas), y los valores de sus respectivas pendientes (eje de las ordenadas). Una línea vertical atraviesa el gráfico cortando al eje de las “X” en el valor 3232 kg/ha, representando el promedio de todas las variedades en todos los ambientes.

### Resultados

Cabe destacar que los resultados que se presentan a continuación corresponden a la situación ambiental y de manejo particular de la campaña 2021/2022 y deben ser considerados como análisis adicionales y complementarios a los de campañas anteriores.

Durante este ciclo agrícola se evaluaron dos variedades pertenecientes al GM V (Figura 2). Ambas presentaron un elevado potencial de rendimiento, destacándose a RA 5715 IPRO (de comportamiento adaptable) en ambientes con mayor disponibilidad

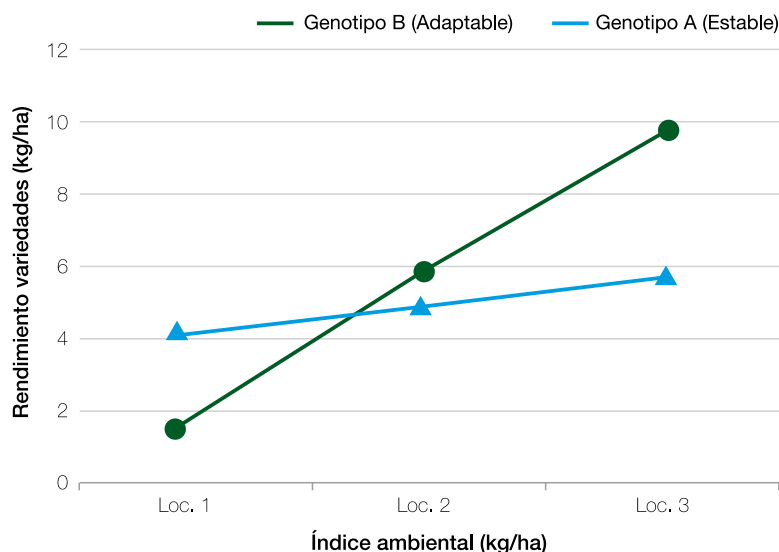
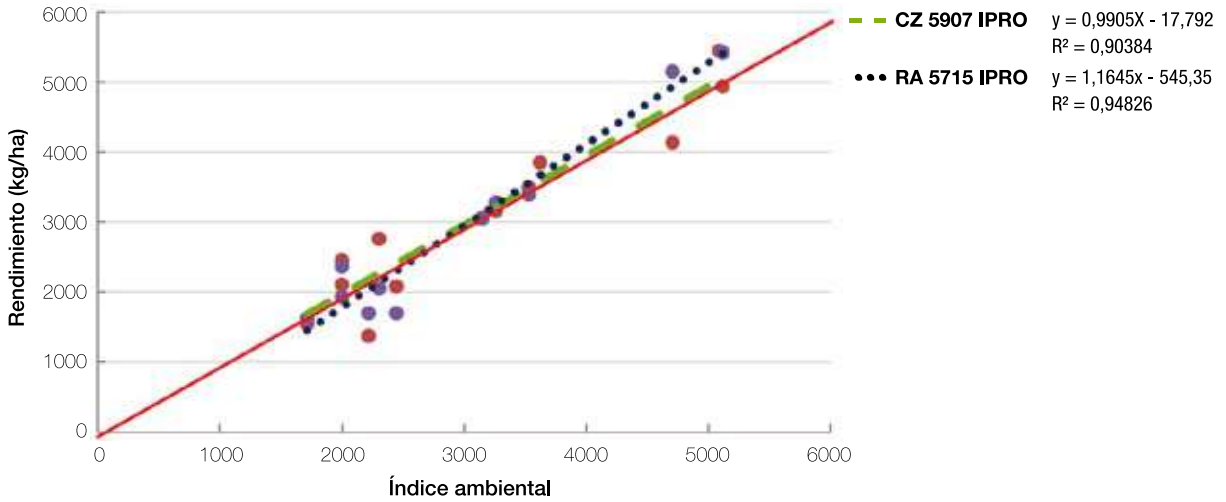


Figura 1. Ejemplo gráfico de ajuste lineal de un genotipo adaptable y uno estable.



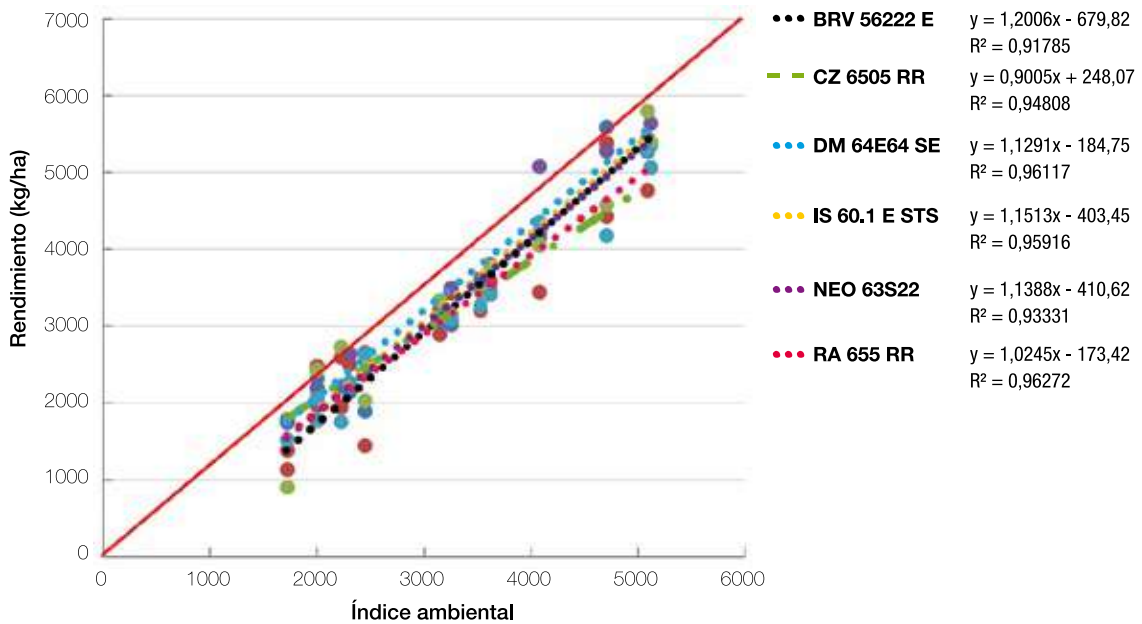
**Figura 2.** Recta 1:1, rendimiento (kg/ha) de variedades y ajuste lineal de materiales de GM V, según índice ambiental en el noroeste argentino durante la campaña 2021/2022.

de recursos; mientras que CZ 5907 IPRO se comportó como estable, con rendimientos levemente superiores en ambientes restrictivos.

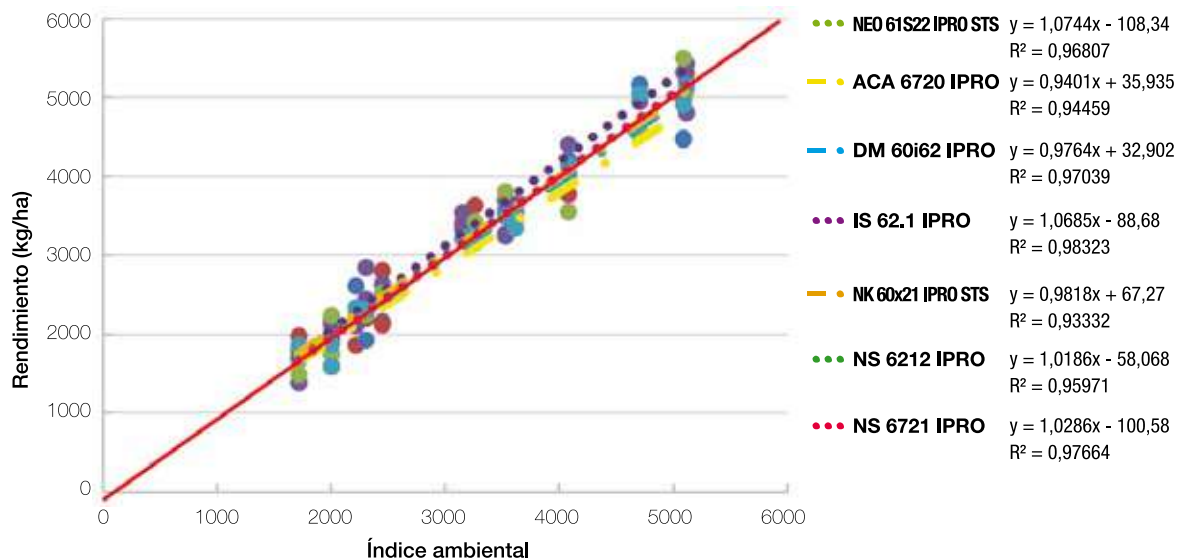
Dado que la mayor oferta varietal corresponde al segmento de madurez VI, para facilitar la visualización de los genotipos se confeccionaron dos gráficos de acuerdo a la tecnología que presentan. De esta forma, en la Figura 3 podemos observar las rectas correspondientes a los seis materiales con tecnología RR1 evaluados en esta campaña, entre los cuales solo uno (CZ 6505) se comportó como estable.

Cabe destacar que en ambientes de alto potencial las variedades que lograron mayores rendimientos fueron: DM 64E64 SE, IS 60.1 E STS, BRV 56222 E y NEO 63S22. Por otro lado, cuando la disponibilidad de recursos es limitada, las variedades que alcanzaron pisos de rendimiento más elevado fueron CZ 6505 y DM 64E64 SE.

En la Figura 4 se observan a los genotipos de grupo VI que poseen tecnología RR2Bt (IPRO). En este caso fueron siete los materiales evaluados, entre los cuales cuatro se comportaron como adaptables (línea



**Figura 3.** Recta 1:1, rendimiento kg/ha de variedades y ajuste lineal de materiales RR1 de GM VI, según índice ambiental en el noroeste argentino durante la campaña 2021/2022.



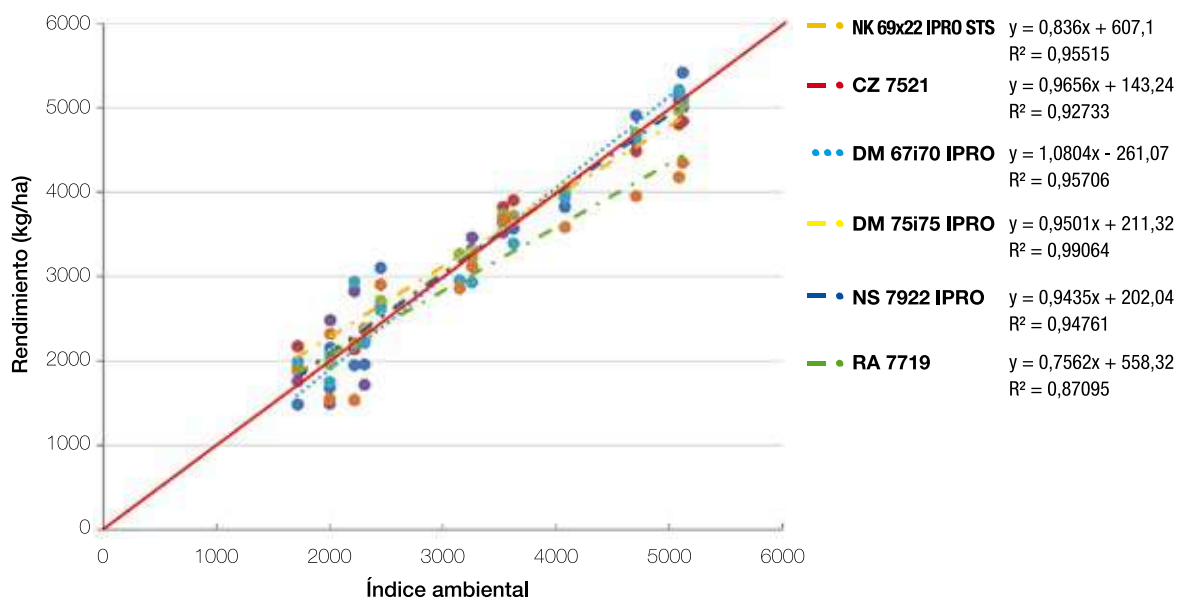
**Figura 4.** Recta 1:1, rendimiento kg/ha de variedades y ajuste lineal de materiales RR2Bt de GM VI, según índice ambiental en el noroeste argentino durante la campaña 2021/2022.

punteada) y tres como estables (línea de trazos). IS 62.1 es el material que alcanzó mayores rendimientos en ambientes de alto potencial; mientras que en los de bajo potencial todos los genotipos de este grupo presentaron un comportamiento similar, con rendimientos levemente superiores para NK 60x21 IPRO STS.

Fueron seis las variedades de GM VII analizadas esta campaña (Figura 5), la mayoría de comportamiento estable (línea de trazos). Solo DM 67i70 IPRO se comportó como adaptable y fue, por un lado, el

material destacado en ambientes de mayor calidad; y por otro, el de menores rendimientos a medida que disminuyeron los recursos. En esta situación productiva NK 69x22 IPRO STS fue el genotipo que logró obtener los mejores resultados de rendimiento.

En la Figura 6 se presentan los resultados de los tres genotipos de GM VIII. En este caso solo Tukuy RR tuvo comportamiento adaptable destacándose junto a ACA 7890 IPRO (estable) en localidades de alto potencial. Por otro lado, 80x20 fue el genotipo con mejor comportamiento en ambientes restrictivos,



**Figura 5.** Recta 1:1, rendimiento (kg/ha) de variedades y ajuste lineal de materiales de GM VII, según índice ambiental en el noroeste argentino durante la campaña 2021/2022.

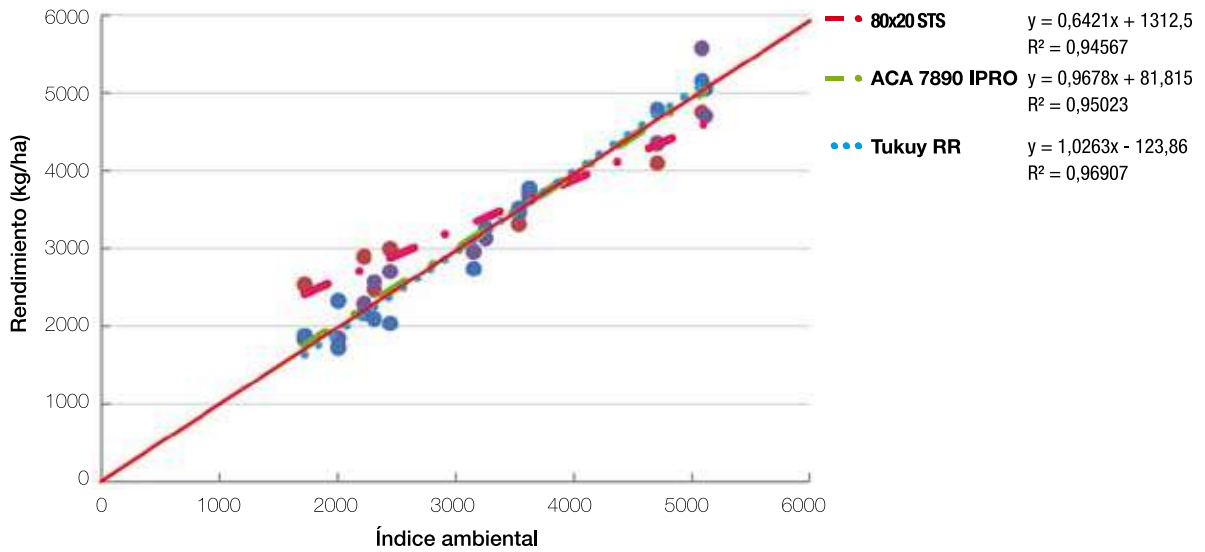


Figura 6. Recta 1:1, rendimiento (kg/ha) de variedades y ajuste lineal de materiales de GM VIII, según índice ambiental en el noroeste argentino durante la campaña 2021/2022.

superando marcadamente a sus competidores del mismo segmento de maduración.

Finalmente, en la Figura 7 se presenta el resumen de las 24 variedades analizadas durante la campaña 2021/2022, ordenadas en función de su rendimiento promedio en las 14 localidades evaluadas. En el gráfico puede observarse una línea horizontal que corresponde al valor de pendiente=1 y clasifica los materiales en estables o adaptables; y una línea

vertical que representa el promedio de todas las variedades en todos los ambientes. De esta forma, los genotipos que se encuentran en el cuadrante superior derecho se comportan como adaptables de alto potencial, mientras que los del cuadrante inferior derecho, como estables de alto potencial. En el primer grupo se destacan DM 64E64, IS 62.1 IPRO STS e IS 60x21 E STS, y en el segundo grupo NK 60x21 IPRO STS (GM VI), NK 80x20 IPRO STS (GM VIII) y NK 69X22 IPRO STS.

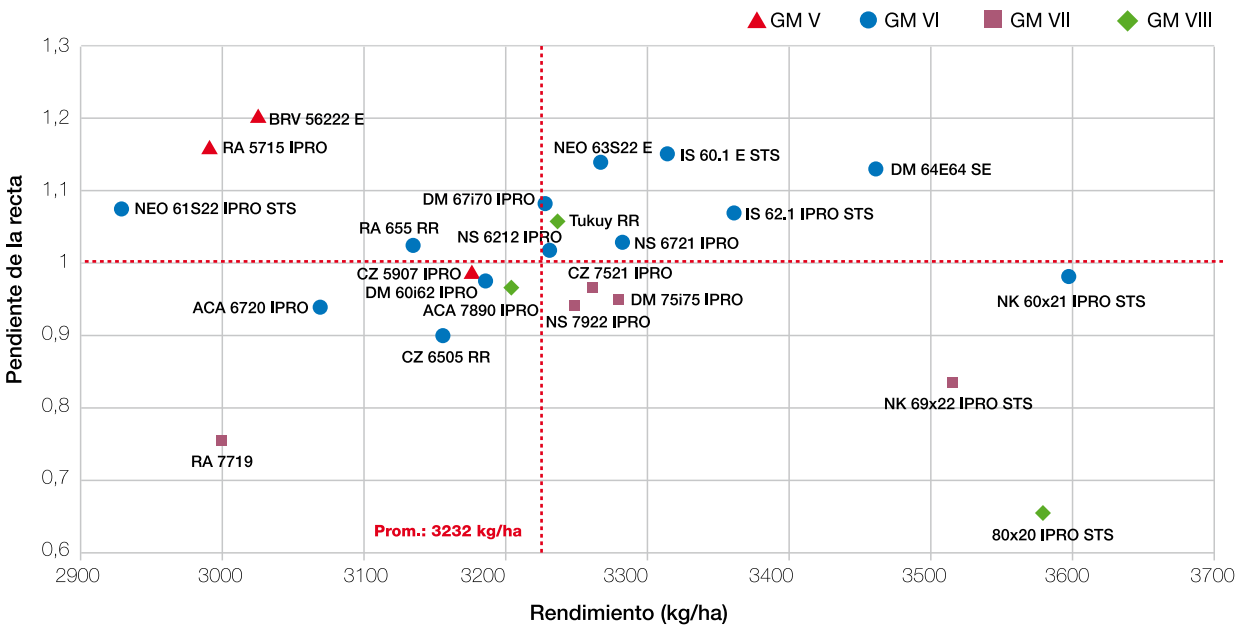


Figura 7. Rendimiento promedio (kg/ha) y valor de la pendiente de la recta de 24 variedades de GM V, VI, VII y VIII, evaluadas en 14 localidades de la Red de Macroparcelas del NOA durante la campaña 2021/2022.

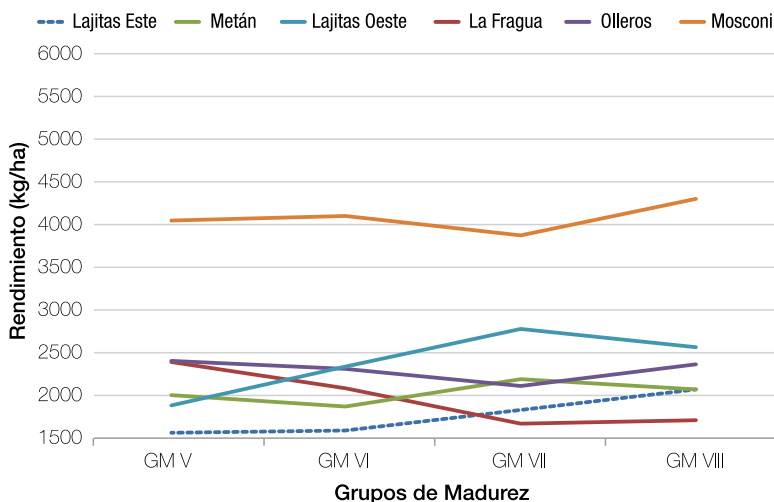
► **b. Evaluación de correlación de parámetros con respecto a los rendimientos de las localidades de la Red**

La presente campaña sojera presentó una marcada variabilidad de rendimientos a lo largo de los ensayos de la Red de soja del NOA, desde valores por debajo de los 2000 kg/ha hasta superiores a 4500 kg/ha. Se continuó entonces el análisis de los resultados de las macroparcels, separando las localidades del centro y norte de Salta (Figura 8) de las de Tucumán y zonas de influencia (ZI) (Figura 9), promediando los rendimientos de las variedades de cada GM.

Se observa en la Figura 8 que las localidades del centro y norte de Salta y del norte de Santiago

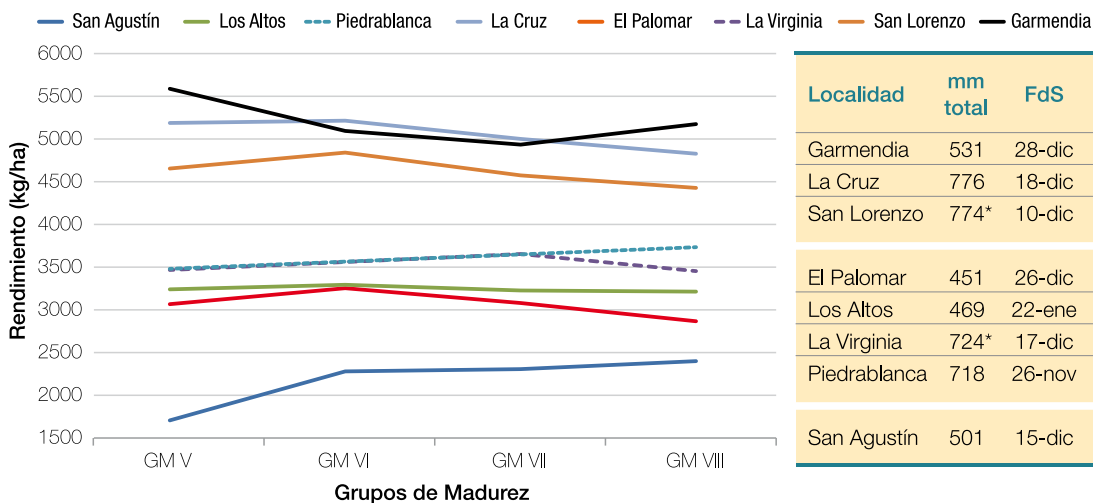
del Estero lograron rindes inferiores a la media de la región (2700 kg/ha), con valores bajos de precipitaciones acumulados para el ciclo agrícola (menores a 480 mm). La excepción en esta provincia fue el ensayo de General Mosconi, cuyos rendimientos promedio rondaron los 4000 kg/ha, con una alta acumulación de mm en la campaña (852 mm). Se debe destacar que, si bien la fecha de siembra típica en Salta es durante el mes de enero, el grueso de los ensayos fue sembrado a fines de ese mes luego de la ola de calor ocurrida.

En Tucumán y ZI las localidades se agruparon en tres conjuntos según los rendimientos promedio (Figura 9):



Localidad	Mes total	FdS	Antecesor
Mosconi	852	26-ene	trigo-soja
Lajitas Oeste	256	23-ene	maíz
Olleros	478	23-ene	maíz
Metán	290	30-ene	maíz
Lajitas Este	467	4-ene	soja
La Fragua	357	28-dic	maíz pastoreado

**Figura 8.** Rendimientos promedio de GM de los ensayos de la provincia de Salta de la Red de soja del NOA, para la campaña 2021/2022. **mm total:** precipitaciones acumuladas en mm durante el ciclo de cultivo. **FdS:** fecha de siembra.



Localidad	mm total	FdS	Antecesor
Garmendia	531	28-dic	pisingallo
La Cruz	776	18-dic	maíz
San Lorenzo	774*	10-dic	maíz
El Palomar	451	26-dic	maíz
Los Altos	469	22-ene	trigo-soja
La Virginia	724*	17-dic	maíz
Piedrablanca	718	26-nov	maíz
San Agustín	501	15-dic	maíz

**Figura 9.** Rendimientos promedio de GM de los ensayos de la provincia de Tucumán y ZI de la Red del NOA, para la campaña 2021/2022. **mm total:** precipitaciones acumuladas en mm durante el ciclo de cultivo. **FdS:** fecha de siembra. \*: datos de localidad cercana

- El superior, con valores de entre 4500 y 5500 kg/ha, cuenta con tres localidades cuyos milímetros acumulados fueron de buenos a muy buenos (531 a 776 mm) y fecha de siembra de estación.
- El grupo intermedio presentó rendimientos promedio de entre los 3000 y 3700 kg/ha, con un amplio rango de precipitaciones acumuladas y de fechas de siembra (fines de noviembre hasta fines de enero).
- Con los rendimientos más bajos (por debajo de los 2500 kg/ha) encontramos una sola localidad, con un valor intermedio de mm acumulados y fecha de siembra óptima.

En estos análisis no se encontró una relación clara entre los datos de las localidades y la disparidad de sus rendimientos, como tampoco con los cultivos antecesores, ya que si bien fueron en su mayoría maíz, aquellos con soja como predecesor también presentaron alta variabilidad en sus rindes.

El siguiente factor a relacionar con los rindes promedio fue el de fecha de siembra. Comparándolo

en un gráfico de doble entrada (Figura 10), no se observó tendencia o agrupamiento alguno, descartándose entonces que la fecha de siembra de los ensayos haya condicionado o favorecido los rindes.

Finalmente, se analizaron los milímetros totales de precipitaciones ocurridas dentro del ciclo agrícola para cada localidad, con respecto a sus rindes promedio. Al ubicar las localidades en orden ascendente según sus rindes promedio y con sus respectivas suma de milímetros de precipitaciones (Figura 11), se observa que aquellos ensayos con mejores rindes en general

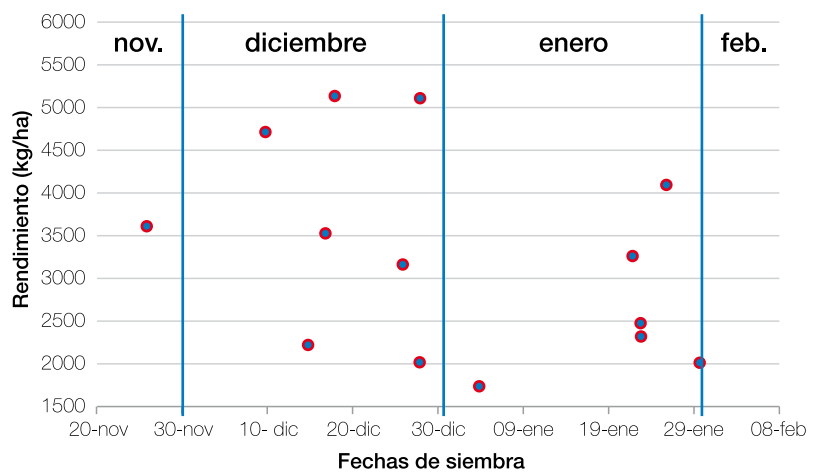


Figura 10. Fechas de siembra y promedios de rendimientos de macroparcels de soja de la Red del NOA, durante la campaña 2021/2022.

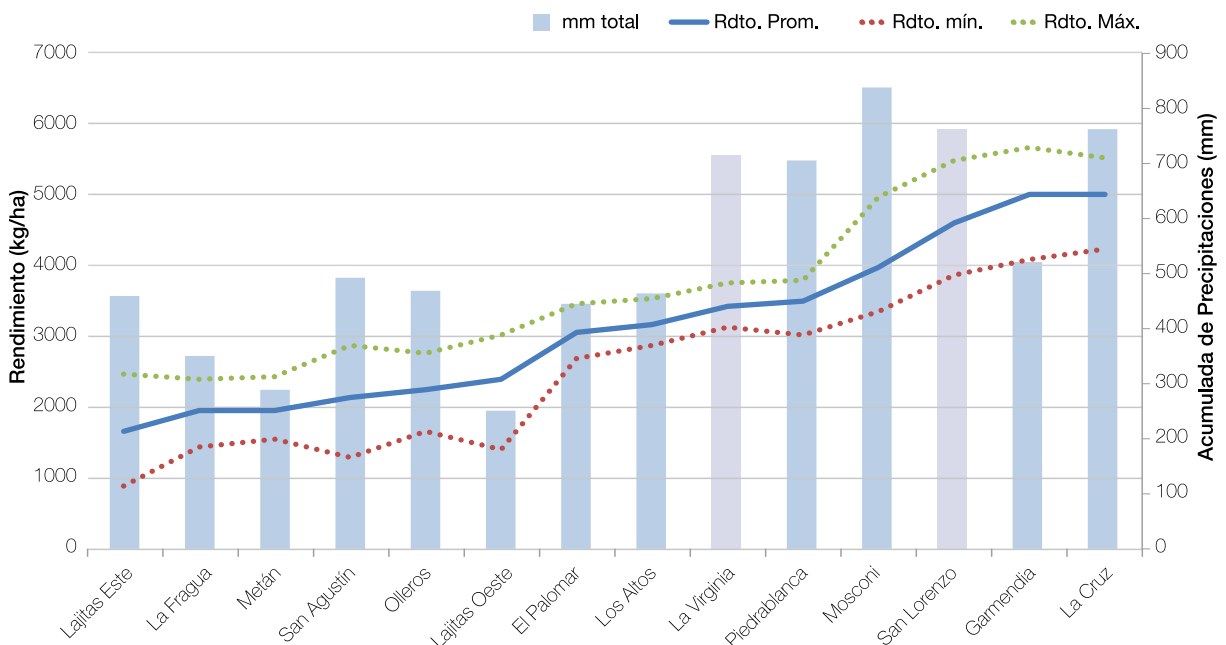


Figura 11. Rendimientos promedio, máximos y mínimos de cada localidad de la Red de soja del NOA, y sus milímetros de precipitaciones acumuladas durante la campaña 2021/2022.

son los de mayores mm acumulados (por encima de los 700 mm). Solo se observa un ensayo (Garmendia) que logró altos rendimientos con una acumulación intermedia de mm, mientras todos los ensayos restantes presentaron rindes intermedios a bajos y sus acumulados no superaron los 500 mm durante el ciclo agrícola.

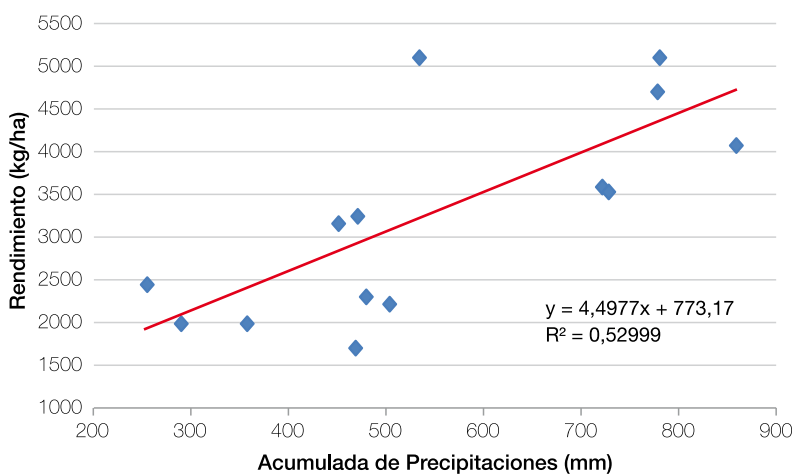
Con los mismos datos se elaboró un gráfico de doble entrada para identificar posibles patrones o tendencias entre rindes y mm (Figura 12), siendo más visibles en este caso los dos grupos de localidades, separados por sus precipitaciones acumuladas (mm<500 y mm>700) y rendimientos (rendimiento umbral: 3400 kg/ha). Se mantiene además la localidad citada en el párrafo previo como excepción, sin ubicarse en ninguno de dichos agrupamientos. A partir de estos puntos se calculó la recta de regresión, obteniéndose una pendiente que indica

que por cada mm precipitado durante la campaña, el cultivo aumentaría 4,5 kg/ha de rendimiento. Incluso, se volvió a calcular la recta pero sin tomar el dato extremo de la localidad excepción (datos no mostrados), obteniéndose igual tasa de incremento pero con una marcada mejora en el R<sup>2</sup>, (R<sup>2</sup>=0,6914), indicando una mayor solidez estadística en la obtención de dicha tasa.

### ■ Consideraciones finales

**E**l análisis de estabilidad de variedades nos permitió identificar que la mayoría de los materiales adaptables de alto potencial corresponden a genotipos de GM VI, destacándose DM 64E64, IS 62.1 IPRO STS e IS 60x21 E STS. Entre los materiales estables, si bien la mayoría pertenecen al GM VII, se destacaron NK 60x21 IPRO STS (GM VI), NK 80x20 IPRO STS (GM VIII) y NK 69X22 IPRO STS.

A través de los análisis de correlación, se encontró para la campaña 2021/2022 una correlación entre la notoria dispersión de los rendimientos de las macroparcelas de soja de la Red del NOA (de 1800 a 5500 kg/ha) y los mm de lluvia acumulados durante el ciclo agrícola en cada localidad ensayada. Sin embargo, no hubo relación en este caso entre los rindes con las fechas de siembra o con los cultivos que antecedieron a los ensayos.



**Figura 12.** Rendimientos promedio de las localidades de la Red de soja del NOA, los milímetros de precipitaciones acumuladas durante la campaña 2021/2022 y su recta de regresión.

### ▼ Bibliografía citada

**Ermacora, M. 2006.** Cómo elegir un híbrido de maíz. Revista CREA 36 (309): 56-64.

**Kang, M. S.. 1997.** Using Genotype-by-Environment Interaction for Crop

Cultivar Development. Adv. Agron. 62, 199–252. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60569-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60569-6).

**Romagosa, I. and P. N. Fox. 1993.** Genotype x environment interaction

and adaptation.

**Uhart, S.A. and R. O. Correa. 2001.** Criterios para la elección del híbrido (primera parte). AgroDecisiones 6 (31): 16-19.