

# Correlación fenotípica y análisis de sendero para el rendimiento de soja (*Glycine max* (L.) Merrill)

## Phenotypic correlation and path analysis for yield in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill)

Rubén Alfredo Valencia-Ramírez<sup>1\*</sup> y Gustavo Adolfo Ligarreto-Moreno<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>I.A., Dr., Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Corpoica, Director Centro de Investigación La Libertad, Villavicencio-Meta. <sup>2</sup>I.A., Dr., Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. \*Autor para correspondencia: ravalencia@corpoica.org.co; †galigarretom@unal.edu.co

Rec.: 14.12.11 Acept.: 07.12.12

### Resumen

En este trabajo se determinaron correlaciones entre el rendimiento de grano y algunas características agronómicas en soja (*Glycine max* (L.) Merrill) y los efectos directos e indirectos de los componentes de rendimiento sobre la producción. A través del análisis de sendero se identificaron criterios de selección indirecta para alto rendimiento. Para el efecto se empleó un diseño de franjas divididas con cuatro repeticiones y 30 tratamientos en Oxisoles de la Orinoquía colombiana, en siete ambientes, durante 2007 y 2008. Los tratamientos consistieron en la combinación de seis variedades de soja y cinco fuentes de nitrógeno. Los datos unidos por ambientes mostraron una correlación fenotípica positiva entre rendimiento de grano con el número de vainas por planta - VT ( $r = 0.81^{**}$ ), el número de nudos por planta-NN ( $r = 0.67^{**}$ ), y el número de semilla por vaina-GV ( $r = 0.44^*$ ), mientras que fue negativa con peso de grano -PS ( $r = -0.44^*$ ). El análisis de sendero mostró que VT presentó el mayor efecto positivo directo (0.628) sobre el rendimiento, seguido por NN (0.260). También, el número de vainas con tres granos (V3) tuvo alta asociación fenotípica con rendimiento ( $r = 0.84^{**}$ ). Es importante prestar atención a estos componentes de rendimiento VT, NN y V3 como criterios de selección indirecta para el mejoramiento genético del rendimiento de grano en soja.

**Palabras clave:** *Bradyrhizobium japonicum*, caracteres de rendimiento, Colombia, fenotipos, herencia genética, Oxisoles.

### Abstract

This research determinate the correlations between seed yield and characteristics agronomic in soybean and the direct and indirect effects of certain yield components on seed yield although the path coefficients analysis and to identification of indirect selection criteria by height seed yields. Thirty treatments were evaluated in a split strips design with four replications in Oxisoils of the Colombian Orinoquía, in seven environmental during 2007 and 2008. The treatments were conformed by the combination of six soybean varieties and five nitrogen sources. Combined data over the locations indicated that seed yield had significant positive correlation with number of pods per plant -VT ( $r = 0.81^{**}$ ), number of nudos per plant-NN ( $r = 0.67^{**}$ ), number of seed per pod-GV( $r = 0.44^*$ ), and correlation negative with weight of seed-PS( $r = -0.44^*$ ). Path coefficient analysis showed that VT gave the greatest direct positive effect (0.628) on seed yield, followed by NN (0.260). However, the number of pods with three seed (V3) had high association with seed yield ( $r = 0.84^{**}$ ). The greater attention

should be given to these yield components (VT, NN and V3) as indirect selection criterions for genetic improvement of soybean seed yield.

**Key words:** *Bradyrhizobium japonicum*, characters of yield, Colombia, genetic inheritance, Oxisols, phenotypes.

## Introducción

La soya (*Glycine max* (L.) Merrill) es una leguminosa oleaginosa de ciclo corto que crece en regiones tropicales, subtropicales y templadas. Actualmente se siembran cerca de 10,000 ha anuales en las sabanas de la altillanura colombiana, con un potencial en área que supera las 560,000 ha, donde se presentan las mayores ventajas comparativas y competitivas para su producción en Colombia, como fuente de proteína y energía para la cadena avícola-porcícola (Valencia et al., 2006).

La asociación entre los caracteres de interés en el fitomejoramiento se puede evaluar mediante correlaciones fenotípicas, genotípicas y ambientales. La correlación fenotípica se estima directamente de los valores medios fenotípicos de campo, siendo el resultado, por tanto, de causas genéticas y ambientales. La correlación genotípica, en cambio, corresponde a la porción genética de la correlación fenotípica causada por la pleiotropía principalmente, aunque el ligamiento puede ser una causa temporal (Ceballos, 2003). La pleiotropía es la propiedad de un gen para afectar más de una característica en forma positiva o negativa (Falconer, 1986). Una correlación, cualquiera que sea su naturaleza, es el cociente de la covarianza apropiada sobre el producto de las dos desviaciones estándar. Así, la correlación fenotípica entre los caracteres X y Y, según Falconer (1986) es la siguiente:

$$r_{(x,y)} = COV / \delta_{(x)} \cdot \delta_{(y)}$$

donde,  $r_{(x,y)}$  = correlación de x, y; COV = covarianza de x, y;  $\delta_{(x)}$  = desviación de x;  $\delta_{(y)}$  = desviación de y.

Malik et al. (2007) sostienen que el estudio y conocimiento de los efectos directos e indirectos del rendimiento y sus componentes ofrecen las bases para un exitoso programa de mejoramiento genético, tomando como referente las características estrechamente

relacionadas. Este conocimiento de la interrelación entre los caracteres considerados importantes en el proceso de mejoramiento es parte fundamental para la mejora progresiva de la especie, al hacer más efectiva la selección de progenitores y progenies. Según Oz et al. (2009) un programa de mejoramiento podría ser planeado para incrementar la producción de grano si se tiene una buena asociación entre ciertas características agronómicas y la producción. En varios trabajos de investigación se ha demostrado que la correlación de un carácter particular con otros caracteres es de gran importancia para la selección indirecta de genotipos deseables (Sarawgi et al., 1997; Oz et al., 2009).

Los coeficientes de correlación a pesar de tener utilidad en la cuantificación de la magnitud y dirección de los efectos de factores en la determinación de caracteres complejos, estos coeficientes no indican la exacta importancia que tienen los efectos directos e indirectos que esos caracteres tienen sobre la variable de interés (Abbott et al., 2007). Un coeficiente de correlación alto o bajo entre dos variables se puede deber al efecto de una tercera variable o grupo de variables. Por ello, según Seker y Serin (2004), la correlación entre dos características no predice el éxito de la selección.

Como una alternativa estadística para superar este inconveniente, Wright (1921) desarrolló el análisis de sendero o coeficiente de trayectoria para investigar la ramificación de varios modelos causales en poblaciones genéticas y actualmente es utilizado en diferentes áreas del conocimiento. El método asume que las variables se asocian entre sí mediante relaciones lineales (Roehrig, 1996) y que sus coeficientes son estandarizados, ya que son estimados a partir de los coeficientes de correlación. El análisis permite descomponer las correlaciones entre dos variables en efectos directos e indirectos (Mitchell, 1992) y facilita la identificación de las posibles explicaciones

causales de las correlaciones observadas entre una variable de respuesta endógena o dependiente y una serie de variables predictoras exógenas o independientes. Este método difiere de los modelos de regresión múltiple, ya que permite establecer las relaciones causales entre las variables (Carrascal, 2004; Whittaker et al., 2009).

Los coeficientes de Wright, o coeficientes de sendero, han sido utilizados en soya para diversos tipos de estudios, entre ellos identificar criterios de selección indirecta en siembras tardías (Board et al., 1997), los efectos del ambiente sobre el rendimiento (Board et al., 1999), los componentes de rendimiento en diferentes tipos de siembra en soya (Pandey y Torrie, 1973), el efecto de las densidades de población sobre el rendimiento (Ball et al., 2001), los componentes de rendimiento en híbridos de soya (Taware et al., 1997), la interferencia de malezas sobre el crecimiento de la planta (Jordan, 1992), los componentes de rendimiento entre genotipos (Shukla et al., 1998), la relación de la dehiscencia de vainas con otros caracteres agronómicos (Tiwari y Bhatnagar, 1991), diferencias varietales, componentes de rendimiento, aceite y proteína (Malik et al., 2006a), diversidad genética para mejorar el rendimiento del grano (Malik et al., 2006b). Villalobos et al. (1985) concluyeron que las características que muestran el mayor efecto directo sobre el rendimiento de grano en soya son, a su vez, la causa de la mayor variabilidad.

En concordancia con lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo estimar los coeficientes de correlación entre el rendimiento de grano por hectárea, con sus componentes y otras características agronómicas, y determinar los efectos causales directos e indirectos de las variables evaluadas sobre el rendimien-

to de grano de soya en siete ambientes de la Orinoquía colombiana.

## Materiales y métodos

Los ensayos experimentales de variedades de soya y cepas de *Bradyrhizobium japonicum* se realizaron durante 2007 y 2008, en Oxisoles de la Orinoquía colombiana clasificados como clase IV, en ambientes localizados entre 04° 03' N y 73° 29' W, entre 150 y 336 m.s.n.m. La precipitación acumulada por ciclo de cultivo, la temperatura media y el brillo solar promedio por semestre y año aparecen en el Cuadro 1. El experimento se estableció para determinar la interacción genotipo-cepa x ambiente de la combinación de seis variedades de soya y tres cepas de fijadoras de nitrógeno (*B. japonicum*), un nivel de nitrógeno (150 kg/ha) y una mezcla de cepas, para un total de 30 tratamientos (Vc) (Cuadro 2) con siete ambientes que se utilizó para el análisis de sendero. El diseño empleado fue de franjas divididas con cuatro repeticiones, las parcelas principales fueron las variedades y las subparcelas las cepas de rizobio o la dosis de N. Cada unidad experimental consistió en 16 m<sup>2</sup> conformada por ocho surcos de 5 m de largo, con una parcela útil de cuatro surcos, para un área de 8 m<sup>2</sup>, la separación entre surcos fue de 40 cm y entre plantas 5 cm. La fertilización se realizó con base en el análisis de suelo y los requerimientos del cultivo. Por tratarse de suelos ácidos, se aplicó cal dolomita en dosis requerida para alcanzar 50% de saturación de bases, según la fórmula de Raj et al. (1985).

Las variedades de soya evaluadas fueron: Soyica P-34, Orinoquía-3, Corpoica La Libertad-4, Corpoica Taluma-5, Corpoica Superior-6 y Corpoica Sabana-7, descritas

**Cuadro 1.** Características del clima en el piedemonte y la altillanura de los Llanos Orientales de Colombia. Estaciones meteorológicas La Libertad y Margaritas, 2007 y 2008.

Región	Semestre	Prec. acumulada (mm)	Temp. media (°C)	Hum. relativa (%)	Brillo solar (h/día)
Piedemonte 2007	A	1370	25.3	87	4.5
	B	1122	25.9	86	5.5
Piedemonte 2008	A	1566	25.0	88	4.3
	B	976	25.7	84	6.2
Altillanura 2008	A	1238	26.5	80	4.4
	B	634	26.0	85	6.5

**Cuadro 2.** Relación de tratamientos (Vc), conformados por las combinaciones de variedades de soya y cepas de *B. japonicum*.

Variedad	Cepa	Tratamiento (Vc)	Variedad	Cepa	Tratamiento (Vc)
Soyica P-34	J-01	1	C. Taluma-5	J-98	16
Orinoquía 3	J-01	2	C. Superior-6	J-98	17
C. Libertad-4	J-01	3	C. Sabana-7	J-98	18
C. Taluma-5	J-01	4	C. Sabana-7	J-01 + J-96	19
C. Superior-6	J-01	5	C. Superior-6	J-01 + J-96	20
C. Sabana-7	J-01	6	C. Taluma-5	J-01 + J-96	21
C. Sabana-7	J-96	7	C. Libertad-4	J-01 + J-96	22
C. Superior-6	J-96	8	Orinoquía 3	J-01 + J-96	23
C. Taluma-5	J-96	9	Soyica P-34	J-01 + J-96	24
C. Libertad-4	J-96	10	Soyica P-34	150 Kg ha N	25
Orinoquía 3	J-96	11	Orinoquía 3	150 Kg ha N	26
Soyica P-34	J-96	12	C. Libertad-4	150 Kg ha N	27
Soyica P-34	J-98	13	C. Taluma-5	150 Kg ha N	28
Orinoquía 3	J-98	14	C. Superior-6	150 Kg ha N	29
C. Libertad-4	J-98	15	C. Sabana-7	150 Kg ha N	30

ampliamente por Valencia et al. (2006) y las cepas de *B. japonicum*: ICA J-01 generada por el ICA (Salamanca y Ramírez, 2000), y J-96 y J-98 del Banco de Germoplasma de Corpoica que fueron introducidas del Brasil, la mezcla J-01 + J-96 y un nivel de N (150 kg/ha). El origen y denominación de las cepas brasileras las describen Chen et al. (2000).

Se tomaron al azar cinco plantas por parcela útil, en las cuales se hicieron observaciones sobre las características vegetativas, fenológicas, reproductivas y de producción, entre ellas: días a floración completa (DF), días a madurez (DM), altura de planta en cm (ALM), número de nudos a madurez (NN), inicio de carga o altura de la primera vaina en cm (IC), número de vainas con uno (V1), dos (V2), tres (V3) y cuatro (V4) granos, número de vainas vanas (VV), número de abortos embrionarios (AE), número de granos por vaina (GV), número de vainas totales por planta (VT), peso de 100 granos en g (PS), rendimiento de grano en t/ha (Rend) calculado a partir de la parcela experimental de 8 m<sup>2</sup>, número de nódulos de rizobio por planta (NNR), peso seco de nódulos en mg (PSN), peso seco de raíz en g (PSR) y peso seco de parte aérea en g (PST). La variable rendimiento fue medida a partir de la parcela útil y su valor se ajustó

por diferencial de peso en fresco y seco a 13% de humedad. El aborto embrionario fue establecido como el número de compartimentos sin grano dentro de una vaina.

### Análisis estadístico

Las correlaciones simples (*r*) fueron obtenidas para todas las posibles combinaciones de las características relacionadas con el rendimiento de grano. Las correlaciones genéticas fueron estimadas con el programa Genes (Cruz, 2007) con aplicación de las fórmulas de correlación como la describe Falconer (1986) y estima Ceballos (2003).

$$\text{Correlación fenotípica} = r_{F(xy)} = \text{COV}_{F(xy)} / \delta_{F(x)} \cdot \delta_{F(y)}$$

$$\text{Correlación genética} = r_{G(xy)} = \text{COV}_{G(xy)} / \delta_{G(x)} \cdot \delta_{G(y)}$$

$$\text{Correlación ambiental} = r_{E(xy)} = \text{COV}_{E(xy)} / \delta_{E(x)} \cdot \delta_{E(y)}$$

donde,  $r_{(xy)}$  y  $\text{COV}_{(xy)}$  son las correlaciones y covarianzas fenotípicas (F), genéticas (G) y ambientales (E) entre los caracteres x, y, respectivamente;  $\delta_{(x)}$  y  $\delta_{(y)}$  son las desviaciones estándar fenotípicas (F), genéticas (G) y ambientales (E) de X y Y, respectivamente.

Para establecer la consistencia de las correlaciones fenotípicas promedias generales por efecto de la presencia de interacción VcA

(variedad-cepa x ambiente), se compararon los niveles de significancia ( $P < 0.05$  y  $P < 0.01$ ) y la magnitud de cada variable con los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos por semestre, considerado como factor de alta relevancia en la interacción. Estas correlaciones fueron la base para evaluar la contribución relativa de cada componente en la producción de grano usando el análisis de sendero, técnica estadística multivariada útil en el análisis de las interrelaciones presentes entre las variables.

El análisis de sendero fue aplicado al rendimiento de grano por hectárea (X5) como variable endógena (variable respuesta o dependiente) y las variables componentes del rendimiento: número de nudos por planta (X1), número de granos vaina (X2), vainas totales (X3) y peso de 100 granos (X4) como variables exógenas (variables predictoras o independientes). La estimación de efectos se realizó con el modelo propuesto por Ball et al. (2001). Para fraccionar esta correlación en efectos directos e indirectos se utilizó el software R, versión 2.7.0 (2008).

Los coeficientes de sendero fueron representados por  $p_{15}$ ,  $p_{25}$ ,  $p_{35}$  y  $p_{45}$  que corresponden a los efectos directos sobre el rendimiento de grano desde el número de nudos por planta (NN), número de granos vaina (GV), número de vainas totales por planta (VT) y peso de 100 granos (PS), respectivamente (Figura 1).

Los efectos indirectos estimados de un componente (por ej., X1) a través de un segundo componente (X2), corresponden al producto del coeficiente directo del segundo componente y a la correlación entre los dos componentes (Dewey y Lu, 1959). La fórmula estructural de los efectos directos e indirectos de X1, se define como:

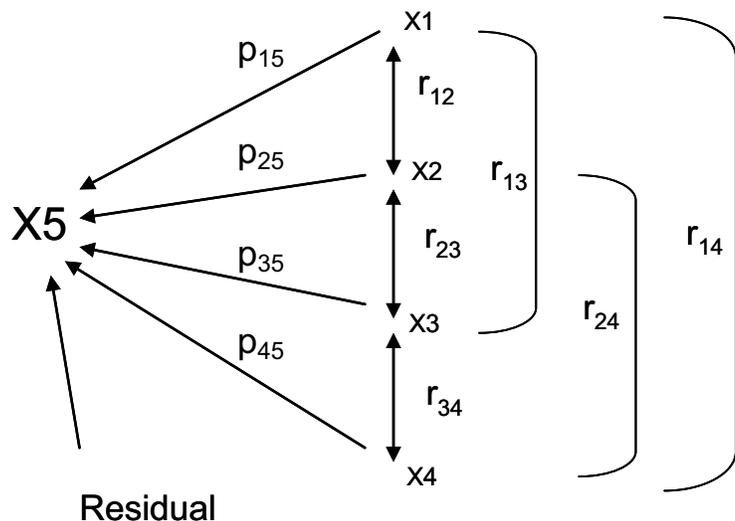
$$P_{15} + P_{25}r_{x1x2} + P_{35}r_{x1x3} + P_{45}r_{x1x4} = r_{x1x5}$$

## Resultados y discusión

En el Cuadro 3 se incluyen los coeficientes de correlación entre los caracteres evaluados en la combinación de todos los ambientes y por semestre. Se observa una positiva y significativa relación entre el rendimiento de grano con el número de vainas con tres granos (V3), número de vainas por planta o vainas totales (VT) y número de granos por vaina (GV), altura de planta (ALM), número de nudos por planta (NN), número de nódulos de rizobio por planta (NNR), peso seco de nódulos (PSN), peso seco de raíz (PSR) y peso seco de parte aérea (PST); y negativa y significativa con el peso del grano (PS).

En el primer semestre las variables V2 y VV, y en el segundo la variable AE, presentaron significancia estadística, en contraste con los coeficientes del análisis combinado para soya. De igual manera, en el segundo semestre las variables GV, PS, NNR y PSN no presentaron diferencias significativas.

**Figura 1.** Diagrama de sendero para soya con efectos directos e indirectos de las variables independientes sobre la variable dependiente.



**Cuadro 3.** Coeficientes de correlación fenotípica del rendimiento de grano/ha con las variables agronómicas evaluadas, combinado por ambientes y por semestre, en Oxisoles de la Orinoquía colombiana.

Variable	Coef. (r) combinado	Coef. (r) semestre A	Coef. (r) semestre B	Variable	Coef. (r) combinado	Coef. (r) semestre A	Coef. (r) semestre B
DF	-0.07	-0.01	-0.01	GV	0.44*	0.53**	0.18
DM	0.01	0.01	0.02	VV	-0.33	-0.44*	0.23
ALM	0.63**	0.61**	0.56**	AE	0.28	0.28	0.46**
NN	0.67**	0.64**	0.52**	VT	0.81**	0.79**	0.63**
IC	0.11	0.26	0.08	PS	-0.44**	-0.21	-0.18
V1	0.18	0.18	-0.08	NNR	0.70	0.76	0.27
V2	0.19	0.46**	0.18	PSN	0.63	0.70	0.13
V3	0.84**	0.84**	0.53**	PSR	0.38	0.30	0.51
V4	0.02	0.00	0.07	PST	0.65	0.68	0.733

La correlación es significativa (\*) al nivel P < 0.05 y altamente significativa (\*\*) al nivel P < 0.01.

Estos resultados muestran el evidente efecto diferencial de los semestres sobre el comportamiento de algunas variables agronómicas de la planta.

**Análisis de sendero**

El análisis de sendero de efectos directos e indirectos de los caracteres agronómicos respecto al rendimiento de grano de los tratamientos Vc (variedades x cepas-N), combinado por localidades, se presenta en el Cuadro 4. El mayor efecto directo se obtuvo con número de nudos (NN), con un coeficiente (r) de 0.806 y un aporte del 53.1%, seguido por días de madurez (DM) con -0.378 y 36.2%, respectivamente. La menor contribución se logró con altura de planta y peso seco de raíz. Arshad et al. (2006) encontraron resultados

similares para días a maduración con efectos directos negativos sobre el rendimiento. La selección sobre la base de las características con aportes negativos, puede representar pérdidas en términos de rendimiento de grano. Por esta razón, la selección en un programa de mejoramiento de soya hacia la obtención de variedades precoces debe ser tratada con cautela. Este efecto de maduración sobre el rendimiento de grano se observa con claridad en germoplasma de soya introducido de otras latitudes, que cuando se siembra en el trópico, por ser un cultivo de ciclo corto, florece y madura de manera prematura.

El número de nódulos (NNR), peso seco de nódulos (PSN) y peso seco de parte aérea (PST), tuvieron efectos directos positivos sobre el rendimiento y efectos indirectos

**Cuadro 4.** Coeficientes de sendero y participación (%) con efectos directos e indirectos de los caracteres agronómicos sobre el rendimiento de grano de Vc (variedades de soya combinadas con cepas de *B. japonicum*), en oxisoles de la Orinoquía colombiana.

Carácter	DF	%	DM	%	ALM	%	NN	%	NNR	%	PSN	%	PSR	%	PST	%
Días a floración (DF)	<b>-0.131<sup>†</sup></b>	<b>28.1</b>	0.027	2.6	0.008	0.50	0.020	1.3	-0.026	2.9	-0.010	1.3	-0.020	1.8	0.005	0.5
Días a madurez (DM)	0.079	16.9	<b>-0.378</b>	<b>36.8</b>	-0.216	14.80	-0.208	13.7	0.023	2.5	0.026	3.3	-0.182	16.7	-0.057	5.6
Altura de planta (ALM)	0.004	0.9	-0.037	3.6	<b>-0.066</b>	<b>4.50</b>	-0.063	4.2	-0.014	1.5	-0.009	1.1	-0.045	4.1	-0.036	3.5
Número de nudos (NN)	-0.121	25.9	0.443	43.1	0.774	53.00	<b>0.806</b>	<b>53.1</b>	0.242	26.7	0.161	20.5	0.500	45.8	0.371	36.5
Número de nódulos (NNR)	0.049	10.5	-0.015	1.5	0.054	3.70	0.074	4.9	<b>0.246</b>	<b>27.1</b>	0.222	28.2	0.025	2.3	0.074	7.3
Peso seco de nódulos (PSN)	0.017	3.6	-0.015	1.5	0.028	1.90	0.043	2.8	0.194	21.4	<b>0.216</b>	<b>27.5</b>	-0.004	0.4	0.054	5.3
Peso seco de raíz (PSR)	-0.004	0.9	-0.012	1.2	-0.018	1.20	-0.016	1.1	-0.003	0.3	0.001	0.1	<b>-0.026</b>	<b>2.4</b>	-0.017	1.7
Peso seco de parte aérea(PST)	-0.013	2.8	0.049	4.8	0.181	12.40	0.151	9.9	0.099	10.9	0.082	10.4	0.211	19.3	<b>0.329</b>	<b>32.4</b>
Correlación total	<b>-0.070</b>		<b>0.010</b>		<b>0.630</b>		<b>0.670</b>		<b>0.700</b>		<b>0.630</b>		<b>0.380</b>		<b>0.650</b>	

†Números con negrilla corresponden a los efectos directos y el resto son efectos indirectos.

notorios sobre el rendimiento vía número de nudos por planta (NN). En general, el mayor efecto indirecto de las variables agronómicas evaluadas se presentó con número de nudos por planta (NN). Esta característica por ser consistente entre semestres, en el combinado por localidades y por correlacionar significativamente con rendimiento de grano ( $r = 0.67$ ;  $P < 0.0001$ ) y un aporte directo superior a 50% de la correlación total, fue incluida en el análisis de sendero como variable exógena para valorar el aporte de los componentes de rendimiento sobre la producción de grano.

### Rendimiento de grano por hectárea vs. componentes de rendimiento.

Para el análisis de sendero de los componentes de rendimiento se seleccionaron aquellas

variables exógenas relacionadas directamente con la variable endógena (rendimiento de grano/ha) como: número de vainas por planta (VT), número promedio de granos por vaina (GV), peso de grano (PS) y la variable número de nudos (NN).

Los coeficientes de sendero del análisis combinado y de los promedios por semestre aparecen en el Cuadro 5, donde se puede observar que el efecto total o 'r' es el resultado de la adición del efecto directo con el indirecto. En el análisis de sendero conjunto de los efectos combinados y por semestre, el mayor aporte en efectos directos fue para número de vainas por planta (VT) con coeficientes que estuvieron entre 0.628 y 0.836, con una participación de la correlación total entre 61.3 y 77.5 %. Estos resultados coinciden con los de

**Cuadro 5.** Efectos directos e indirectos de los componentes de rendimiento sobre el rendimiento de grano de soya en tratamientos Vc (variedades x cepas), en Oxisoles de la Orinoquía colombiana.

Efectos	Combinado		Sem. A		Sem. B	
	Coefic.	%	Coefic.	%	Coefic.	%
<b>Número de nudos (NN)</b>						
Efectos directos	0.260	38.8	0.524	44.5	0.340	46.0
Efectos indirectos	—	—	—	—	—	—
-por número de granos (GV)	0.001	0.1	-0.248	21.1	-0.033	4.4
-por vainas totales(VT)	0.345	51.5	0.385	32.7	0.289	39.1
-por peso granos (PS)	0.064	9.6	-0.021	1.7	-0.077	10.4
<b>Correlación total fenotípica</b>	<b>0.67</b>		<b>0.64</b>		<b>0.52</b>	
<b>Número de granos por vaina (GV)</b>						
Efectos directos	0.002	0.3	-0.381	28.5	-0.069	21.7
Efectos indirectos						
-por número de nudos (NN)	0.156	32.7	0.340	25.4	0.160	50.2
-por vainas totales(VT)	0.301	63.1	0.594	44.4	0.032	9.9
-por peso granos (PS)	-0.019	3.9	-0.023	1.7	0.058	18.1
<b>Correlación total fenotípica</b>	<b>0.44</b>		<b>0.53</b>		<b>0.18</b>	
<b>Número de vainas totales (VT)</b>						
Efectos directos	0.628	77.5	0.836	61.3	0.526	66.1
Efectos indirectos						
-por número de nudos (NN)	0.143	17.6	0.241	17.7	0.187	23.5
-por número de granos (GV)	0.001	0.1	-0.271	19.8	-0.004	0.5
-por peso granos (PS)	0.039	4.8	-0.016	1.2	-0.079	9.9
<b>Correlación total fenotípica</b>	<b>0.81</b>		<b>0.79</b>		<b>0.63</b>	
<b>Peso de 100 granos (PS)</b>						
Efectos directos	-0.133	30.3	0.059	9.4	0.193	34.1
Efectos indirectos						
-por número de nudos (NN)	-0.125	28.3	-0.183	29.3	-0.136	24.1
-por número de granos (GV)	0.000	0.0	0.149	23.8	-0.021	3.7
-por vainas totales(VT)	-0.182	41.3	-0.234	37.5	-0.216	38.2
<b>Correlación total fenotípica</b>	<b>-0.44</b>		<b>-0.21</b>		<b>-0.18</b>	
<b>R<sup>2</sup></b>	<b>0.75</b>		<b>0.79</b>		<b>0.47</b>	

Rajanna et al. (2000), quienes concluyeron que el número de vainas es un importante componente del rendimiento del cultivo de la soya. En relación con número de vainas por planta (VT), las investigaciones en cultivo de soya de Oz et al. (2009) concluyeron que la asociación positiva ( $r = 0.458$ ,  $P < 0.01$ ) con rendimiento de grano fue estable a través de años y localidades y que el número de vainas por planta ocurrió desde el efecto directo en un 50.4%. Para Board et al. (1997) el número de vainas por nudo reproductivo fue el mejor criterio de selección indirecto para rendimiento de grano.

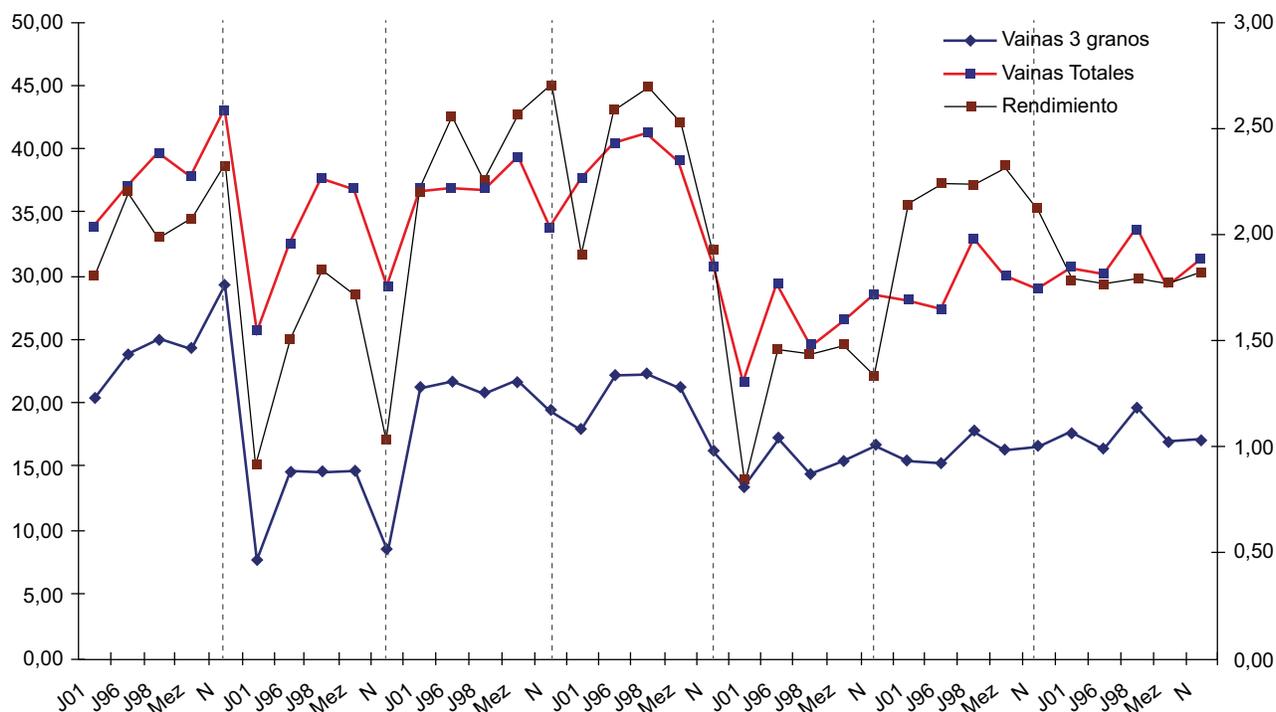
En segundo lugar, se ubicó el número de nudos a madurez (NN), con efectos directos de 0.260 a 0.524 y aportes entre 38.8 y 44.5%; el grado de asociación entre el rendimiento y NN fue explicado por un efecto indirecto de VT en 51.5% (Cuadro 5). Este resultado es comparable con los de Bizeti et al. (2004) quienes encontraron que el número de nudos correlacionó significativamente con rendimiento de grano, siendo el de mayor efecto directo sobre rendimiento, por tanto, para estos investigadores NN podría ser de gran ayuda para la selección indirecta de genotipos, sin desconocer que el número de vainas totales por planta (VT) aportan los granos para alto rendimiento porque puede haber plantas con menor NN pero con mayor número de vainas por nudo.

En el Cuadro 5 se observa que VT y NN presentan tanto los mayores efectos directos como aportes en efectos indirectos, por lo que constituyen dos variables útiles como predictores del rendimiento de grano de variedades de soya en Oxisoles de la Orinoquía. Por estar estas variables altamente correlacionadas y por considerar que VT es una variable importante y fácil de medir en soya, debe ser la primera alternativa para realizar procesos de selección en el mejoramiento del rendimiento. En general, los mayores valores promedio de VT y NN se obtuvieron con las cepas J-96 y J-98 y los menores con J-01, factor que se debe considerar en una buena interacción cepa variedad y alto rendimiento. Con las dos mejores cepas, las variedades, C. Libertad 4 y Soyica P-34, presentaron los valores promedio más bajos para las características citadas y para número de vainas de tres granos (V3)

(Valencia y Ligarreto, 2010). Estos resultados son consistentes, ya que la variedad Soyica P-34 tiene baja adaptación a suelos con problemas de aluminio, como los Oxisoles, y es sensible al síndrome de tallo verde (STV) que afecta en forma negativa y severa la cantidad y la calidad de los granos y se presenta con frecuencia en el piedemonte durante el primer semestre, en la variedad Corpoica La Libertad-4. Esta variedad, a pesar de tener buena adaptación, muestra alta susceptibilidad a *C. sojina*, además ambas variedades presentaron baja calidad de grano por los excesos de agua durante el primer semestre (Valencia et al., 2006; Valencia y Ligarreto, 2010).

El número de granos por vaina (GV) es una característica útil para mejorar el rendimiento sólo por su efecto indirecto vía número de vainas totales (VT) ya que está correlacionado con el rendimiento en un 63.1% siendo, en este caso, el efecto directo de 0.3%. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Ball et al. (2001) y Oz et al. (2009) quienes a través del análisis de sendero encontraron que el número de granos por vaina tuvo un efecto directo positivo sobre el rendimiento de grano. En este estudio no se halló correlación entre el rendimiento de grano con vainas de uno (V1), dos (V2) o cuatro (V4) granos, pero fue altamente significativa con vainas de tres (V3) granos. Esta variable presentó consistencia a través de localidades y combinación de variedades con cepas, con una alta asociación con el número de vainas por planta (VT) y rendimiento de grano/ha (Figura 2), lo que permite deducir que V3 y VT son muy importantes, altamente predictivas del rendimiento de grano y de gran utilidad como criterios de selección en el programa de mejoramiento en estudio.

En relación con el peso de 100 granos (PS), la correlación fue negativa en todos los casos con rendimiento de grano/ha; sus efectos directos, aun cuando algunos negativos, fueron poco relevantes para afectar la variable endógena. Los efectos directos estuvieron entre -0.133 y 0.193, considerados como valores muy bajos de interrelación. Estos resultado coinciden con los de Taware et al. (1997), Shukla et al. (1998) y Board et al. (1999) quienes igualmente no encontra-



**Figura 2.** Comportamiento del número de vainas con tres granos (V3), con vainas totales (VT) y rendimiento de grano de soya, a través de ambientes y cepas de *B. japonicum*-N.

ron relaciones significativas entre peso de grano y rendimiento. En contraste, Malik et al. (2007) en soya hallaron con el análisis de sendero que el peso de granos tiene un efecto directo negativo sobre el rendimiento. Estas diferencias en resultados pueden ser atribuidas a la influencia de factores ambientales e interacciones en esta variable tan compleja, y su expresión depende de factores como la variedad, las condiciones edafo-climáticas predominantes y la presencia de factores bióticos como patógenos e insectos plaga.

Las correlaciones genotípicas y fenotípicas de los componentes de rendimiento se presentan en el Cuadro 6. En general, las correlaciones genotípicas fueron superiores a sus respectivas fenotípicas, lo que puede ser un indicativo de una mayor contribución de factores genéticos sobre la asociación; sin embargo, varios coeficientes fenotípicos con menor magnitud resultaron estadísticamente significativos, a diferencia de los coeficientes genotípicos, lo que sugiere un alto efecto ambiental sobre los caracteres estudiados. Al comparar las correlaciones genéticas y fenotípicas entre cepas para los componentes de rendimiento y teniendo en cuenta la variable

V3, es evidente que las mejores correlaciones fenotípicas para rendimiento de grano entre cepas se lograron con VT, V3 y NN, y las menores asociaciones con GV y PS. Las correlaciones genéticas fueron menores para GV, mientras que el resto de variables fueron similares. En general, PS presentó asociación negativa con las variables de interés V3, NN y VT, lo que confirma la escasa importancia del peso de la semilla en procesos de selección. Esta característica no contribuye al mejoramiento del rendimiento de grano en soya en Oxisoles de la Orinoquia. Los valores de correlación superiores a 1.0 se pueden atribuir a errores de muestreo y factores de interacción GA.

Por todo lo anterior, es importante que el fitomejorador tenga un conocimiento profundo de las interrelaciones entre caracteres y sus interacciones con el entorno para desarrollar un exitoso programa de mejoramiento progresivo de la especie. Ariyo (1995) sostiene que un mejor criterio de selección es considerar de manera simultánea las variables que se asocian significativamente con rendimiento, en lo posible combinando caracteres vegetativos y reproductivos.

**Cuadro 6.** Correlaciones genotípicas y fenotípicas (diagonales superior e inferior, respectivamente), de los componentes de rendimiento de soja para cepas de *B. japonicum* J-96, J-98 y J-01.

	NN	V3	GV	VT	PS	Rend.
<b>Cepa J-96</b>						
NN	1	0.893**	0.626	0.918**	-0.255	0.909**
V3	0.847*	1	0.631	1.005**	-0.606	0.923**
GV	0.602	0.599	1	0.848*	0.619	0.634
VT	0.823*	0.980**	0.728*	1	-0.447	0.954**
PS	-0.240	-0.440	0.478	-0.311	1	-0.616
Rend	0.853*	0.868*	0.583	0.870*	-0.395	1
<b>Cepa J-98</b>						
NN	1	1.028**	0.546	1.000**	-0.432	1.146**
V3	0.906*	1	0.241	1.000**	-1.129	1.092**
GV	0.504	0.258	1	1.000**	0.611	0.114
VT	0.567	0.835*	0.116	1	1.000**	1.000**
PS	-0.369	-0.747	0.471	-0.658	1	1.000**
Rend	0.802*	0.743	0.017	0.314	-0.691	1
<b>Cepa J-01</b>						
NN	1	0.832*	0.694	0.777	-0.730	1.338*
V3	0.782*	1	0.589	0.962**	-1.075	1.851*
GV	0.628	0.582	1	0.870*	-0.120	0.627
VT	0.711*	0.938**	0.779*	1	-1.114	1.777*
PS	-0.643	-0.938**	-0.113	-0.868**	1	1.000**
Rend.	0.610	0.870**	0.323	0.797**	-0.522	1

### Conclusiones

- El análisis de sendero es una herramienta estadística útil para la identificación de caracteres interrelacionados como alternativa de selección indirecta del rendimiento de grano en soja para la Orinoquía colombiana.
- El número de vainas por planta (VT) y de vainas con tres granos (V3) son características fenotípicas altamente útiles como criterios de selección para maximizar el rendimiento de grano de nuevas variedades de soja en Oxisoles de la Orinoquía colombiana.
- Las cepas de *B. japonicum* J-96 y J-98 son nuevas opciones de fijación biológica de nitrógeno, debido a su gran aporte directo en el rendimiento de grano, e indirecto vía número y peso de nódulos de rizobio.

### Referencias

Abbott, L.; Pistorale, S.; y Filippini, O. 2007. Análisis de coeficientes de sendero para el rendimiento de semillas en *Bromus catharticus*. Cien. Inv. Agr. 34(2):141 - 149.

Ariyo, O. 1995. Correlations and path-coefficients analysis of components of seed yield in soybeans. African crop Sci. J. 3(1):29 - 33.

Arshad, M.; Ali, N.; y Ghafoor, A. 2006. Character correlation and path coefficient in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. Pak. J. Bot. 38(1):121 - 130.

Ball, R.; McNew, R.; Vories, E.; Keisling, T.; y Purcell, L. 2001. Path analyses of population density effects on short-season soybean yield. Agron. J. 93:187 - 195.

Bizeti, H. S.; Carvalho, C. G.; Souza, J. R.; y Destro, D. 2004. Path analysis under multicollinearity in soybean. Brazilian Archives of Biology and Technology 47(5):669 - 676.

Board, J.; Kang, M.; y Harville, B. 1997. Path analyses identify indirect selection criteria for yield of late-planted soybean. Crop Sci. 37:879 - 884.

Board, J.; Kang, M.; y Harville, B. 1999. Path analyses of the yield formation process for late-planted soybean. Agron J. 91:128 - 135.

Carrascal, L. M. 2004. Path analysis. Depto. Biodiversidad y Biología Evolutiva. Museo Nacional De Ciencias Naturales. Madrid, España. Disponible en: <http://www.161.111.161.171/estadística2004/pathanalysis.pdf> [Fecha revisión: Febrero de 2010]

- Ceballos, H. 2003. Genética cuantitativa y fitomejoramiento. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 524 p.
- Chen, L. S.; Figueredo, A.; Pedrosa, F. O.; y Hungria, M. 2000. Genetic characterization of soybean rhizobia in Paraguay. *Appl. Environ. Microb.* 66(11):5099 - 5103.
- Cruz, C. D. 2007. Programa GENES versão windows - Análises estatística, biométrica, multivariada e diversidade genética de dados quantitativos e moleculares. Editora UFV, Universidade Federal de Viçosa (Brasil). Disponible en: [www.ufv.br/dbg/genes/genes.htm](http://www.ufv.br/dbg/genes/genes.htm) [Fecha revisión: Febrero de 2009]
- Dewey, D.R.; y Lu, K.H. 1959. A correlation and path coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production. *Agron. J.* 51:515 - 518.
- Falconer, D. 1986. Introducción a la genética cuantitativa. Edt. Continental. México. 383 p.
- Jordan, N. 1992. Differential interference between soybean (*Glycine max*) varieties and common cocklebur (*Xanthium strumarium*): A path analysis. *Weed Sci.* 40(4):614 - 620.
- Malik, M.; Qureshi, A.; Ashraf, M.; y Ghafoor, A. 2006a. Genetic variability of the main yield related characters in soybean. *Int. J. Agric. Biol.* 8(6):815 - 819.
- Malik, M.; Qureshi, A.; y Ghafoor, A. 2006b. Utilization of diverse germplasm for soybean yield improvement. *Asian J. Plant Sci.* 5(4):663 - 667.
- Malik, M.; Ashraf, M.; Qureshi, A.; y Ghafoor, A. 2007. Assessment of genetic variability, correlation and path analysis for yield and its components in soybean. *Pakistan J. Bot.* 39:405 - 413.
- Mitchell, R. 1992. Testing evolutionary and ecological hypotheses using path analysis and structural equation modeling. *Funct. Ecol.* (6):123 - 129.
- Oz, M.; Karasu, A.; Goksoy, A.; y Turan, Z. 2009. Interrelationships of agronomical characteristics in soybean (*Glycine max*) grown in different environments. *Int. J. Agric. Biol.* 11:85 - 88.
- Pandey, J. y Torrie, J. 1973. Path coefficient analysis of seed yield components in soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.). *Crop Sci.* 13:505 - 507.
- R programming for Bioinformatics. version 2.7.0. 2008. The R Foundation for Statistical Computing ISBN 3-900051-07-0.
- Raij, B.; da Silva, N.; Bataglia, O.; Quaggio, J.; Hiroce, R.; Cantarella, H.; Belinazzi, R. Jr.; Dechen, A.; y Trani, P. 1985. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. *Bol. Tec.* 100. Campinas, SP, Brasil. 241 p.
- Rajanna, M.; Viswanatha, S.; Kulkarni, R.; y Ramesh, S. 2000. Correlation and path analysis in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill). *Crop Res. Hisar.* 20(2):244 - 247.
- Roehrig, S. 1996. Probabilistic inference and path analysis. *Decision Support Systems* 16:55 - 66.
- Salamanca, C. y Ramírez, M. 2000. ICA J 01 biofertilizante para soya. Inoculante de rizobio para los Llanos Orientales. Plegable divulgativo N° 16 Corpoica-Ministerio de agricultura. FOCC. Villavicencio, Colombia.
- Sarawgi, A.; Rastogi, N.; y Soni, D. 1997. Correlation and path analysis in rice accessions from Madhya Pradesh. *Field Crops Res.* 52:161 - 167.
- Seker, H. y Serin, Y. 2004. Explanation of the relationships between seed yield and some morphological traits in smooth brome grass (*Bromus inermis*-Leyss.) by path analysis. *Europ. J. Agron.* 21:1 - 6.
- Shukla, S.; Singh, K.; y Pushpendra. 1998. Correlation and path coefficient analysis of yield and its components in soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Soybean Gen. Newsl.* 25:67 - 70.
- Taware, S.; Halvankar, G.; Raut, V.; y Patil, V. 1997. Variability, correlation and path analysis in soybean hybrids. *Soybean Gen. Newsl.* 24:96 - 98.
- Tiwari, S. P. y Bhatnagar, P. S. 1991. Pod shattering as related to other agronomic attributes in soybean. *Trop. Agric. (Trinidad)* 68(1):102 - 103.
- Valencia, R.; Carmen, H.; Vargas, H.; y Arrieta, G. 2006. Variedades mejoradas de soya para zonas productoras actuales y potenciales de Colombia. Innovación y cambio tecnológico-Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica) 4(2-3):7 - 15.
- Valencia, R. y Ligarreto-M, G. 2010. Análisis de la interacción soya-cepa (*Bradyrhizobium japonicum*) x ambiente, en oasisoles de la Orinoquía colombiana. *Agron. Col.* 28(3):361 - 372.
- Villalobos, E.; Barrantes, R.; y Echandi, R. 1985. Asociación de algunas características cuantitativas con el rendimiento de la soya (*Glycine max*) en el trópico mediante dos técnicas de regresión. *Agron. Costarr.* 9(1):65 - 70.
- Whittaker, A.; Vazzana, C.; Vecchio, V.; y Benedettelli, S. 2009. Evaluation of direct and indirect effects of flavonoids, mineral elements and dry weight on antiradical scavenging activity in leaf material of field-grown *Trifolium pratense* cultivars using Path Analysis. *Field Crops Res.* 113(1):1 - 11.
- Wright, S. 1921. Correlation and causation. *J. Agric. Res.* 20:557 - 585.