

EFFECTO DE LA VARIABILIDAD SISTEMÁTICA EN EXPERIMENTOS DE FERTILIZACIÓN CON FRÍJOL. PRIMERA SIEMBRA

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo¹

RESUMEN

Se evaluó el impacto que podía tener la variabilidad estructurada de la producción de dos variedades de fríjol, mediante análisis de tendencia espacial y de semivariografía, sobre los resultados de los análisis de varianza realizados en un experimento de fertilización orgánica y con microorganismos, en una primera siembra, en un diseño completamente al azar con siete tratamientos y cuatro replicaciones, ubicado en el Centro de Investigación “La Selva”, de CORPOICA, municipio de Rionegro, Oriente Antioqueño-Colombia.

Se encontró un efecto diferencial, por variedad de fríjol, de la variabilidad estructurada sobre los resultados de los análisis de varianza. En la variedad ICA Viboral, el anava hecho con los datos originales no mostró efectos significativos de los tratamientos sobre la producción pero, al quitar los componentes de tendencia y de variabilidad espaciales, el anava detectó que sí había efecto altamente significativo de los tratamientos sobre la producción. Por el contrario, en la variedad CORPOICA 106 no se presentó efecto significativo de los tratamientos, ni con los datos originales ni con los residuales de los análisis de tendencia y de variabilidad espaciales. Este comportamiento se presentó igual al trabajar con la producción del metro central del surco o con la del surco completo. El efecto específico de cada tratamiento en el análisis de varianza también se distorsiona al ir eliminando componentes espaciales de la variabilidad.

Con lo observado en este estudio cabe recomendar que en los sitios que se van a utilizar para la investigación agropecuaria se hagan estudios detallados de las propiedades del suelo relacionadas con la producción, en los cuales se incluya el conocimiento de su variabilidad espacial, de modo que se puedan hacer interpretaciones adecuadas de los ensayos que en ellos se conduzcan.

Palabras claves: *Variabilidad espacial, análisis de tendencia, análisis de varianza, diseño experimental, producción de fríjol.*

¹ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias. A.A. 3840. Medellín, Colombia. <djaramal@unalmed.edu.co>

ABSTRACT

EFFECT OF SYSTEMATIC VARIABILITY IN FERTILIZATION EXPERIMENTS WITH BEANS. FIRST SOWING.

An evaluation was made of the possible impact of structured variability on the production of two varieties of beans by means of spatial tendency and semi-variography analyses of the results of analyses of variance in an organic fertilization experiment and with microorganisms, in the first sowing, in a completely randomized experimental design with seven treatments and four replications, conducted in the "La Selva" Research Center of CORPOICA, Rionegro municipality, eastern Antioquia-Colombia.

A differential effect based on bean variety was found of the structured variability on the results of the analyses of variance. In the ICA Viboral variety, the ANOVA conducted on the original data did not show significant treatment effects on production, but upon eliminating spatial tendency and variability components, the ANOVA detected that in fact there were highly significant treatment effects on production. To the contrary, the variety CORPOICA 106 showed no significant treatment effects for neither the original data of with the residuals of the spatial tendency and variability analyses. This pattern resulted both when working with central meter production of the furrow or with the entire furrow. The specific effect of each treatment in the analysis of variance also was distorted upon eliminating spatial components of the variability.

Based upon the results of this study, we can recommend that in sites to be used for farm research, detailed studies of soil properties related to production should be made, in which knowledge of its spatial variability is included, so that adequate interpretations of the tests conducted in them may be made.

Key words: *Spatial variability, tendency analysis, analysis of variance, experimental design, bean production.*

INTRODUCCIÓN

Una característica dominante de los suelos es su heterogeneidad, aún en pequeñas áreas que podrían considerarse homogéneas, debido a que en su formación intervienen varios procesos diferentes, controlados, a su vez, por los factores de formación; estas interacciones pueden ser muy variadas dando como consecuencia una alta cantidad de suelos posibles. Esta heterogeneidad induce una variabilidad en sus propiedades que puede llegar a ser de considerable magnitud y que puede afectar grandemente las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas.

La variabilidad depende, aparte del tipo de suelo, de la propiedad que se analice. Hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural, que cuando ha estado sometido a uso. Aquellas propiedades que más se alteran por el manejo del suelo

serán las que presenten la mayor variabilidad (Ovalles, 1992; Paz-González; Vieira y Taboada Castro, 2000).

El uso histórico del suelo tiene grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades. Diferencias en el manejo de los fertilizantes y de los abonos orgánicos, tanto en el tipo como en la forma de aplicarlos, generan diferencias en la variabilidad de los contenidos de nutrientes en el suelo. Efectos similares producen también los cambios en el laboreo (Cambardella *et al.*, 1994; Mallarino, 1996; Cambardella y Karlen, 1999; Paz-González; Vieira y Taboada Castro, 2000).

Ovalles y Comerma (1991) sostienen que en la selección de sitios experimentales es indispensable tener una alta homogeneidad en las propiedades de los suelos relacionadas con lo que se va a investigar. Además, que el conocimiento de la variabilidad del suelo es requisito indispensable para seleccionar tanto el sitio como el diseño experimental y recomiendan las técnicas geoestadísticas como las mejores para determinar el tamaño, la localización y la orientación de las parcelas experimentales.

Upchurch y Edmonds (1992) sostienen que la variabilidad presenta dos componentes fundamentales: uno **Aleatorio** y otro **Sistemático**, teniendo en cuenta la fuente de error que produce la variación. Cuando la variabilidad no puede relacionarse con causas conocidas, se define como **variabilidad aleatoria o debida al azar**; la **variabilidad sistemática** es aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles.

Samra *et al.* (1990) fraccionan la variabilidad sistemática en dos componentes: Uno de tendencia y otro de variabilidad espacial; con esta diferenciación, la variabilidad total puede expresarse como:

$$\textit{Variación Total} = \textit{Tendencia} + \textit{Componente Espacialmente Estructurado} + \textit{Azar}$$

La variabilidad espacial se caracteriza porque las propiedades que la presentan adquieren valores diferentes dependiendo de la ubicación y/o del espaciamiento entre las muestras utilizadas para caracterizarlas, es decir, que el valor que toma una variable en un sitio depende de la distancia y/o de la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino.

Si una variable presenta dependencia espacial, durante el muestreo se puede violar el principio de la independencia entre las muestras y los procedimientos de la estadística paramétrica clásica no son adecuados para su estudio.

El conocimiento de la variabilidad espacial del suelo tiene varias aplicaciones como: elaborar mapas de propiedades del suelo por procesos de interpolación, hacer control de calidad de mapas temáticos, definir el tamaño y la ubicación de unidades experimentales, mejorar el muestreo y mejorar la interpretación de resultados de investigación, entre otras.

El problema de la variabilidad se ha tratado de obviar, en la práctica, incrementando el número de muestras utilizadas para estimar los valores promedios que caractericen aquellas

propiedades o recurriendo a los diseños experimentales y a las repeticiones de los tratamientos, acciones que algunas veces no resuelven satisfactoriamente el problema de la desuniformidad del suelo.

Además, como apunta Martínez (1994), se confía en que la aleatorización sea capaz de neutralizar los efectos nocivos de la correlación espacial que se presente entre unidades experimentales vecinas y que puede invalidar los resultados de los análisis de varianza que se realicen con ellas, en caso de que los supuestos en que descansan estos análisis no se cumplan.

Conociendo la variabilidad espacial que se presente en las unidades experimentales se puede hacer una mejor interpretación de los resultados que se obtengan. Puede presentarse el caso en que la interpretación de los resultados cambie drásticamente luego de considerar el efecto de la variabilidad espacial sobre ellos, como lo demostraron Bhatti *et al.* (1991).

Los autores citados en el párrafo anterior diseñaron dos experimentos, uno de respuesta del trigo a la aplicación de P, en un diseño de bloques al azar, en Washington y otro de respuesta del algodón a la fertilización N-P, en un diseño factorial, en Pakistán; a los resultados de producción se les hizo análisis de varianza y de semivarianza, se les removió la correlación espacial que mostraron y se les repitieron los análisis de varianza y semivarianza.

En ambos experimentos hubo dependencia espacial de la producción antes de remover la correlación espacial, la cual desapareció cuando se repitió el análisis de semivarianza luego de remover esta correlación (Bhatti *et al.*, 1991).

En el análisis de varianza, en ambos casos se presentaron diferencias en la significancia de las fuentes de variación, al eliminar la correlación espacial: en el caso del trigo, hubo diferencia significativa entre bloques antes de eliminar la dependencia espacial pero, cuando ésta se eliminó, desapareció la diferencia significativa entre bloques y apareció la diferencia significativa entre tratamientos; un comportamiento similar ocurrió en el ensayo con algodón. (Bhatti *et al.*, 1991).

Saldarriaga (2002) encontró dependencia espacial en la producción de fruta fresca de palma africana en un lote experimental en los Llanos Orientales de Colombia donde se estaban evaluando varios sistemas de adecuación de tierras para ese cultivo. Al hacer los análisis de varianza sin eliminar la variabilidad espacial, para 10 ciclos de cosecha, se presentó diferencia significativa entre adecuaciones en 8 de los 10 ciclos, mientras que eliminando dicha dependencia, sólo se conservó la diferencia significativa entre adecuaciones en uno de los 10 ciclos de producción evaluados.

En los estudios citados se observa cómo la variabilidad espacial del suelo puede alterar los efectos de los tratamientos que se están estudiando, llevando a conclusiones erróneas acerca de la necesidad o no de llevar a cabo alguna práctica de manejo de los cultivos.

Con el presente estudio se pretende establecer el efecto que tiene la variabilidad estructurada de la producción de 2 variedades de fríjol, mediante análisis de tendencia espacial y de semivariografía, sobre los resultados de un análisis de varianza aplicado a un experimento de fertilización orgánica y con microorganismos, en un diseño completamente al azar y en la primera siembra, hecha inmediatamente después de aplicar los tratamientos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. El trabajo se llevó a cabo en un lote experimental del Centro de Investigación “La Selva” de CORPOICA, ubicada en el sector de Llano Grande, municipio de Rionegro, oriente Antioqueño-Colombia. Se accede al Centro, desde Medellín, por una carretera pavimentada de 27 km de longitud, aproximadamente (Figura 1).

El lote se encuentra ubicado en una terraza aluvial baja del río Rionegro, plana, con pendiente menor al 3 %, pobremente drenada. El suelo se ha desarrollado a partir de cenizas volcánicas que están recubriendo un aluvión fino y se clasificó como Typic Endoaquand.

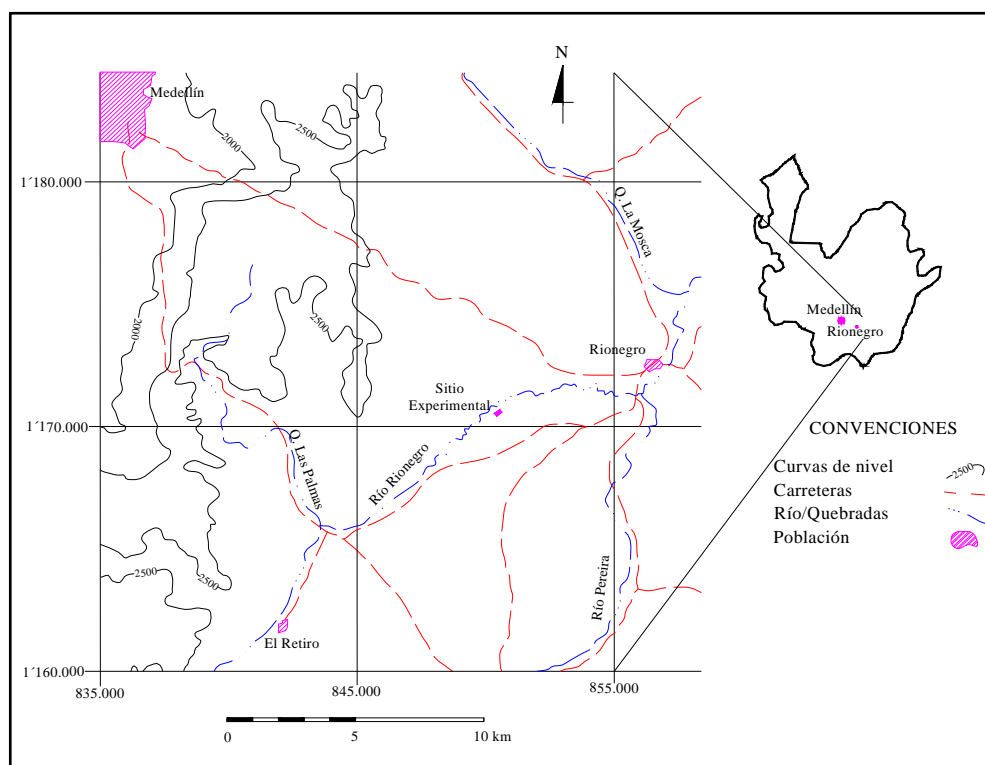


Figura 1. Localización del C. I. “La Selva” – CORPOICA. Rionegro, Oriente Antioqueño-Colombia.

Materiales experimentales. El experimento se hizo con dos variedades de frijoles volubles: Frijol ICA Viboral y Frijol CORPOICA 106. Los materiales fueron sembrados en dos parcelas experimentales contiguas de 16 m x 35 m cada una.

Diseño experimental. Para cada una de las variedades de frijol utilizadas se diseñó un experimento con arreglo completamente al azar de siete tratamientos con cuatro replicaciones. La unidad experimental correspondió a una parcela compuesta por 4 surcos de 5 m de longitud; la distancia de siembra entre surcos fue de 1 m y entre plantas de 25 cm. Con las dos variedades se utilizó el mismo patrón de aleatorización para la distribución de las parcelas en el campo.

Los tratamientos aplicados fueron:

- Tratamiento 1 (T1): Corresponde al testigo comercial del agricultor, en el cual se aplicaron 35 g de 10-30-10 m⁻¹ de surco + 200 g de gallinaza m⁻¹ de surco.
- Tratamiento 2 (T2): 200 g de gallinaza m⁻¹ de surco + 20 g de inóculo de micorrizas por planta.
- Tratamiento 3 (T3): 200 g de gallinaza m⁻¹ de surco + 20 g de inóculo de *Rhizobium* kg⁻¹ de semilla.
- Tratamiento 4 (T4): 200 g de gallinaza m⁻¹ de surco + 50 g de roca fosfórica m⁻¹ de surco.
- Tratamiento 5 (T5): 200 g de gallinaza m⁻¹ de surco + 20 g de inóculo de micorrizas por planta + 20 g de inóculo de *Rhizobium* kg⁻¹ de semilla.
- Tratamiento 6 (T6): 200 g de gallinaza m⁻¹ de surco + 20 g de inóculo de *Rhizobium* kg⁻¹ de semilla + 50 g de roca fosfórica m⁻¹ de surco.
- Tratamiento 7 (T7): 20 g de inóculo de micorrizas por planta + 20 g de inóculo de *Rhizobium* kg⁻¹ de semilla.

En todos los tratamientos se adicionaron 50 g de cal agrícola m⁻¹ de surco y, excepto en el testigo comercial, a los demás se le aplicaron 20 g de KCl m⁻¹ de surco. Para suministrar las micorrizas se utilizó un producto comercial conocido con el nombre de “Glomales de Antioquia”, el cual ofrece una mezcla de inóculos de hongos de los géneros *Acaulospora*, *Glomus* y *Scutelospora*.

Variables evaluadas. Se midió la producción de grano seco de frijol (con 14 % de humedad, aproximadamente), en el metro central de cada surco, el cual se cosechó por separado en cada replicación y en cada tratamiento. Para el estudio de variabilidad espacial,

al punto central de cada surco se le asignaron coordenadas planas (x,y) con base en un origen arbitrario, que georreferenciaron la producción en el respectivo surco cosechado.

Análisis estadísticos. A los datos de producción originales se les hizo un análisis exploratorio inicial para ver su distribución y para detectar posibles problemas con ellos. Luego se realizó un análisis de varianza convencional que incluyó una prueba de comparación de medias de Duncan. A los residuales de este análisis se le confirmaron los supuestos de igualdad de varianza (valor p de Bartlett > 0,05) y normalidad en la distribución (valor p de Shapiro – Wilk > 0,05), como lo recomienda Montgomery (1991). Cuando estos supuestos se cumplían, ahí terminaba el análisis de varianza, pero cuando no, se hacía una transformación de los datos y se repetía el análisis de varianza hasta que se cumplieran tales supuestos. En caso de que no se cumpliera la normalidad se aceptaba que la distribución fuera solamente simétrica.

Terminado el análisis de varianza inicial, se hizo un análisis de tendencia espacial de los valores originales de producción en cada surco, mediante un análisis de regresión múltiple entre ella y los valores de las coordenadas, incluyendo la interacción entre las mismas, con un modelo del estilo **$Producción = a + b(x) + c(y) + d(xy)$** . Si el modelo estudiado resultaba estadísticamente significativo, a los residuales de esta regresión también se les hacía la confirmación de los supuestos. En este caso, para confirmar la igualdad de varianza se efectuó un anava de los residuales de la regresión, donde el factor de variación fue la interacción de las coordenadas. Se formaron 8 grupos de parcelas mediante la partición del lote experimental de la Figura 2 así: por las coordenadas x , se dividió por los valores de 3,5; 7,5; y 11,5 m y por las coordenadas y , en el valor de 12,5 m. El resultado de la prueba de Bartlett que se hace en este Anava se toma como confirmación del supuesto de igualdad de varianza para los residuales de la regresión.

Si con el análisis de tendencia se encontraba un modelo de regresión significativo, se utilizaban sus residuales para realizar el análisis de variabilidad espacial que se hacía a continuación. Si no hay tendencia en los valores de la producción, el análisis de semivariografía se llevaba a cabo con los datos originales o transformados utilizados para el análisis de varianza inicial. Después de este análisis espacial, los supuestos de los residuales también fueron confirmados como se ha expuesto antes.

Como se quiere ver si había efecto de la variabilidad espacial sobre los resultados de los análisis de varianza del experimento, tanto después del análisis de tendencia, como después del análisis de semivariografía, se hicieron los correspondientes análisis de varianza y las comparaciones de las medias respectivas. Después de cada análisis de varianza realizado, se hizo un análisis de los residuales correspondientes para verificar que los supuestos de distribución normal, o por lo menos simétrica, y de igualdad de varianza se cumplían.

Todos los análisis mencionados anteriormente se llevaron a cabo para cada una de las dos variedades de fríjol estudiadas. Los análisis estadísticos se hicieron con ayuda de los programas de computador Statgraphics Plus 5.0 y GS⁺ 3.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción del fríjol ICA Viboral. Los resultados de los análisis exploratorios realizados se presentan en la Figura 2. En la Figura 2a se aprecia que las parcelas en las que se presentaron menores valores en la producción de fríjol, tienden a ubicarse en la parte inferior del gráfico (el tamaño del círculo que representa la producción es proporcional al valor de ella). Lo anterior sugiere que se puede estar presentando una tendencia espacial de la producción, independientemente de los tratamientos que se estudian en el experimento.

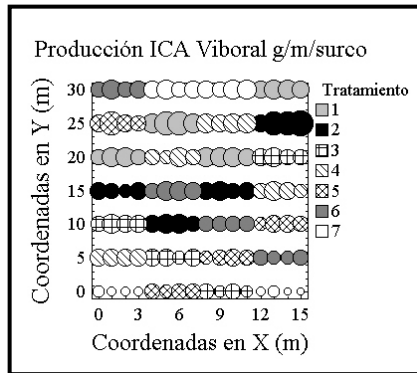
Las tendencias espaciales sugeridas en la Figura 2a se confirman en la gráfica de la Figura 2d. En esta figura puede verse claramente que se presenta una tendencia espacial en la producción, con respecto a las coordenadas en y .

Las gráficas de cajas y bigotes de la Figura 2b muestran que hay bastante similitud en el comportamiento de casi todos los tratamientos. Vale la pena notar que se detectaron algunos valores anómalos en los datos pero no valores extremos u outliers (según la prueba de Grubbs), que hay varios tratamientos que presentan algo de sesgo en la distribución de la producción y que el tratamiento 7 tiene una gran amplitud en los valores de producción, en comparación con el comportamiento de los demás tratamientos.

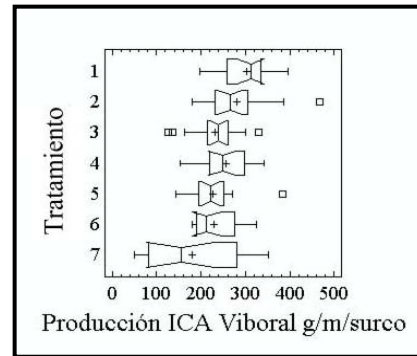
Terminados los análisis exploratorios anteriores se procedió a hacer el análisis de tendencia de la producción, obteniéndose un modelo de regresión significativo con los siguientes estadísticos: valor de $p = 0,0000$, $R^2 = 40,36 \%$ y estadístico de Durbin-Watson = 2,02575; los valores de p para cada uno de los parámetros del modelo fueron: para x : 0,0171, para y : 0,0385 y para xy : 0,0079, todos significativos al 5 %. La ecuación del modelo de regresión fue la siguiente:

$$g \text{ m}^{-1} = 213,402 - 5,27138 x + 2,2277 y + 0,327183 xy$$

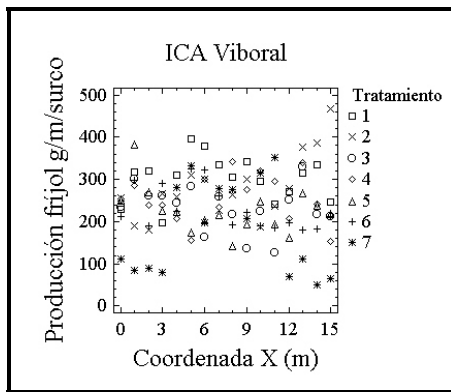
Los residuales del análisis de tendencia cumplieron con todos los supuestos: valor p de Shapiro-Wilk = 0,313338 y valor p de Bartlett en el Anava hecho con los grupos de parcelas (ver materiales y métodos) = 0,234144. Con todos los residuales del análisis de tendencia (112 datos) se hizo un análisis de variabilidad espacial que dio los resultados que se exponen en la Tabla 1.



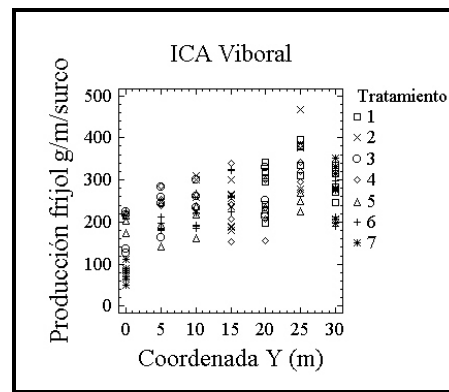
a.



b.



c.



d.

Figura 2. Resultados de algunos de los análisis exploratorios realizados con los datos de producción de frijol ICA Viboral. C. I. “La Selva, CORPOICA. Rionegro, Oriente Antioqueño-Colombia.

Tabla 1. Parámetros del análisis de variabilidad espacial de los residuales de la tendencia de la producción de frijol ICA Viboral en el metro central de surcos de 5 m de longitud (Intervalo lag: 2 m; Lag activo: 14 m).

Modelo	Rango (m)	Nugget	Sill	C/sill (%)	R ² (%)	Rss	Nº de Pares lag 1
Esférico	5,24	1608	3217	50	94,2	72732	105

Una vez culminados los análisis tendientes a detectar la presencia de variación en la producción por causas espaciales, se procedió a hacer los análisis de varianza correspondientes, cuyos resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los análisis de varianza realizados antes y después de eliminar los componentes espaciales de las fuentes de variación del experimento de fertilización de frijol ICA Viboral.

Fuente de variación	Grados de libertad	Con datos originales		Con los residuales de la tendencia		Con los residuales de la semivariografía	
		Suma de cuadrados	Valor de P ^{&}	Suma de cuadrados	Valor de P ^{&}	Suma de cuadrados	Valor de P ^{&}
Tratamiento	6	604814	0,1603 NS	327384	0,0385**	5,92316E6	0,0004***
Residuales	21	1,2146E6		414438		3,025E6	
Total	27	1,81946E6		741822		8,948E6	

& Diferencia entre tratamientos: NS: No significativa al 5 %.

** : Significativa al 5 %.

***: Significativa al 1 %.

En la Tabla 2 puede verse que no hubo efecto significativo de los tratamientos sobre la producción de frijol ICA Viboral, cuando el anava se hizo con los resultados de producción originales. En la misma tabla se observa que después de eliminar todo el componente estructural de los resultados de producción de frijol, es decir, sin tener los componentes de la variabilidad de la tendencia y de la variabilidad espacial en el error experimental sino solamente la variabilidad aleatoria, el efecto de los tratamientos sobre ellos se vuelve altamente significativo: sin remover la variabilidad estructurada del error experimental, ésta se estaba apoderando de buena parte de la variabilidad y no estaba dejando que se expresara el efecto de los tratamientos.

Al hacer la comprobación de los supuestos con los residuales de los anavas realizados, se obtuvo normalidad e igualdad de varianzas en todos ellos: valor p de Shapiro-Wilk de 0,504653, 0.66987 y de 0.592879 y valor p de Bartlett de 0,290586; 0,247288 y de 0,459114, para los análisis de varianza hechos con los datos originales, con los residuales del análisis de tendencia y con los residuales del análisis de semivariografía, respectivamente. Después de los análisis de varianza se hicieron las correspondientes pruebas de comparación de medias por Duncan, las que dieron los resultados que se exponen en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de medias por Duncan de los diferentes análisis de varianza realizados a la producción de fríjol var. ICA Viboral. C. I. “La Selva”, CORPOICA. Rionegro, Oriente Antioqueño - Colombia.

Tratamiento	Con datos originales	Con residuales de la tendencia	Con residuales de la semivariografía
T1	1208,95 a*	52,3749 a	242,193 a
T2	1121,98 a	99,3155 a	-6,559 a
T3	930,06 ab	54,3786 a	419,059 a
T4	1021,99 ab	-0,677 a	173,428 a
T5	906,75 ab	50,1921 a	205,216 a
T6	920,92 ab	-3,09 a	49,1915 a
T7	723,87 b	-252,494 b	-1082,53 b

* Valores con la misma letra en las columnas no presentaron diferencia estadísticamente significativa al 5 %.

En la Tabla 3 puede apreciarse que en todos los casos el tratamiento 7 es el de menor producción promedia y que es el que muestra diferencias significativas con los demás tratamientos cuando se eliminan los componentes espaciales de la variabilidad de la producción. Además, nótese que a pesar de que al eliminar dicha variabilidad espacial no se presentan diferencias significativas entre los tratamientos 1 a 6, su ordenamiento relativo sí cambia en los distintos anavas hechos.

Hay otro efecto de la variabilidad espacial sobre los resultados del experimento analizado. En la Tabla 1 se observa que la variabilidad espacial presente es de rango corto ya que el valor de este parámetro es de 5,24 m. Lo anterior quiere decir que las muestras que se tomen para evaluar los tratamientos utilizados deben estar separadas entre sí, como mínimo, 5,24 m para evitar el efecto espacial entre ellas, de modo que se cumpla así el supuesto de independencia, indispensable en el análisis de varianza.

Como al momento de diseñar el experimento no se dejó el espaciamiento necesario entre unidades experimentales, obviamente porque no se conocía, la mejor manera de resolver el problema de la variabilidad espacial es determinarla mediante un análisis de semivariografía y luego hacer el análisis de varianza con los residuales de aquel puesto que éstos ya no tienen dependencia espacial.

De lo anterior se concluye que los análisis de varianza hechos con los datos originales y con los residuales de la tendencia no cumplen el supuesto de independencia entre las muestras y, por lo tanto, sus resultados no son correctos; en cambio, el anava que se hizo con los residuales de la semivariografía sí es correcto porque, aparte de que sus residuales cumplieron todos los supuestos estadísticos, se hizo con datos a los que se les habían eliminado la tendencia y la variabilidad espaciales y, entonces, según él, sí hay efecto altamente significativo de los tratamientos sobre la producción de fríjol seco de la variedad ICA Viboral, en el sitio experimental.

Producción del fríjol CORPOICA 106. En las gráficas de la Figura 3 se presentan los resultados obtenidos con los análisis exploratorios hechos a los datos de producción de fríjol de la variedad CORPOICA 106. En las gráficas de cajas y bigotes (Figura 3b) se puede apreciar que la producción en este ensayo también tuvo rangos de valores amplios y similares entre los diferentes tratamientos; tampoco se presentaron valores outliers (según la prueba de Grubbs) y hubo algo de sesgo en algunos tratamientos, hechos que también se presentaron con la variedad ICA Viboral.

La distribución de los valores de la producción, teniendo en cuenta las coordenadas (Figuras 3c y 3d), no presenta una tendencia espacial obvia en ellos, como sí lo mostraban los datos de la variedad ICA Viboral.

Al hacer el análisis de tendencia, efectivamente se encontró una tendencia espacial relativamente baja (bajo coeficiente de determinación), representada por el siguiente modelo significativo:

$$g \text{ m}^{-1} = 83,1046 + 9,27541 x + 3,28495 y - 0,309149 xy$$

Los principales estadísticos del modelo de regresión encontrado fueron: valor $p = 0,0004$, $R^2 = 13,06 \%$ y estadístico de Durbin – Watson = 1,83108 y los valores de p para cada uno de los parámetros del modelo fueron: para x : 0,0002, para y : 0,0064 y para xy : 0,0232. Los residuales del modelo cumplieron los supuestos de normalidad: valor p de Shapiro – Wilk = 0,204383 y de igualdad de varianzas, según análisis de varianza hecho con grupos de parcelas (ver materiales y métodos): valor p de Bartlett = 0,500158. Con los residuales del análisis de tendencia se llevó a cabo un análisis de semivariografía cuyos resultados se presentan en la Tabla 4. Terminados estos análisis se procedió a hacer los análisis de varianza correspondientes y los resultados obtenidos en éstos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 4. Parámetros del análisis de variabilidad espacial de la producción de fríjol CORPOICA 106 en el metro central de surcos de 5 m de longitud. (Intero lag: 2 m; Lag activo: 7 m).

Modelo	Rango (m)	Nugget	Sill	C/sill (%)	R^2 (%)	Rss	Nº de Pares lag 1
Exponencial	1,92	1436	4157	65,5	99,9	156,9	105

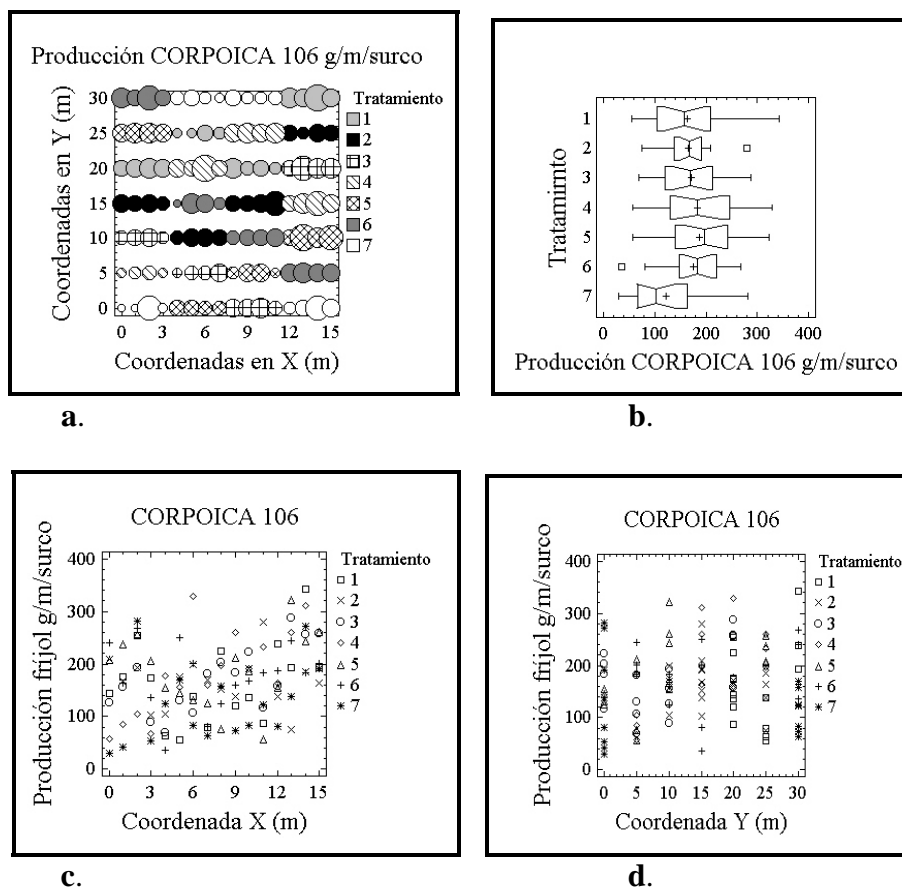


FIGURA 3. Resultados de los análisis exploratorios realizados con los datos de producción de frijol CORPOICA 106. C. I. “La Selva, CORPOICA. Rionegro, Oriente Antioqueño-Colombia.

Tabla 5. Resultados de los análisis de varianza realizados antes y después de eliminar los componentes espaciales de las fuentes de variación del experimento de fertilización de frijol CORPOICA 106.

Fuente de variación	Grados de libertad	Con datos originales		Con los residuales de la tendencia		Con los residuales de la semivariografía	
		Suma de cuadrados	Valor de P ^{&}	Suma de cuadrados	Valor de P ^{&}	Suma de cuadrados	Valor de p ^{&}
Tratamiento	6	177335	0,6403 NS	194032	0,3227 NS	36714	0,2647 NS
Residuales	21	865779		544222		92475	
Total	27	1,043E6		738254		129189	

&: Diferencia entre tratamientos.

NS: Diferencia entre tratamientos no significativa al 5 %.

En el análisis hecho con los datos originales, como sucedió con la variedad ICA Viboral, tampoco se encontró efecto estadísticamente significativo de los tratamientos sobre la producción pero, contrario a lo ocurrido con aquella variedad, en los análisis de varianza hechos con los residuales de los análisis de tendencia y de semivariografía, tampoco se presentó diferencia significativa entre tratamientos al 5 %, es decir, el mayor componente de la variabilidad de la producción en esta variedad fue aleatorio. Este resultado era de esperarse debido a la débil tendencia que se encontró y al rango tan corto (1,92 m) de variabilidad espacial que sugiere una fuerte variabilidad aleatoria en la producción.

Las respectivas comparaciones entre medias de los anavas hechos se presentan en la Tabla 6 en la que se observa también, como con la variedad ICA Viboral, que el tratamiento 7 es el de menor producción y que al eliminar partes de la variabilidad espacial, el ordenamiento de los tratamientos por producción varía.

Tabla 6. Comparación de medias por Duncan de los diferentes análisis de varianza realizados a la producción de fríjol var. CORPOICA 106. C. I. “La Selva”, CORPOICA. Rionegro, Oriente Antioqueño - Colombia.

Tratamiento	Con datos originales	Con residuales de la tendencia	Con residuales de la semivariografía
T1	654,63	-32,3943	13,68
T2	659,77	7,9209	3,864
T3	683,86	54,8178	-16,657
T4	737,07	85,2188	2,80625
T5	748,53	74,4616	21,3117
T6	705,36	-12,7641	-14,8633
T7	491,40	-177,26	-95,1192

No se presentó diferencia significativa al 5 % entre tratamientos en ninguno de los tres casos analizados.

Cuando se hizo la comprobación de los supuestos con los residuales de los anavas realizados, se obtuvo normalidad e igualdad de varianzas en todos ellos: valor p de Shapiro-Wilk de 0,843888, 0,900956 y de 0,653253 y valor p de Bartlett de 0,448501, 0,499039 y de 0,644659, para los análisis de varianza hechos con los datos originales, con los residuales del análisis de tendencia y con los residuales del análisis de semivariografía, respectivamente.

COMENTARIO FINAL

En este trabajo llama la atención el hecho de que, a pesar de que se aprecia una alta homogeneidad topográfica y de suelos en toda la terraza sobre la que se ubicaron los experimentos analizados y de que ellos se sembraron uno contiguo al otro, se haya obtenido una respuesta diferencial tan marcada en el comportamiento de los componentes

estructurados de la variabilidad entre los dos lotes experimentales. La aparente homogeneidad morfológica en el paisaje y en los suelos no fue garantía suficiente de homogeneidad en los factores involucrados en la producción vegetal, en este ensayo.

Lo anterior puede sugerir que hay una diferencia importante entre las variedades estudiadas frente a la respuesta que dan a la manera como se distribuyen, en el campo, algunos de los factores que controlan su producción. Es difícil pensar en que, al interior del lote experimental, se den diferencias tan grandes en la distribución de dichos factores de producción y que el efecto de ellas se haya concentrado sólo en una parte del terreno, sabiendo que se trata de un campo experimental utilizado intensivamente en investigación agropecuaria durante varios decenios.

El comportamiento observado en este trabajo pone de manifiesto, como lo recomiendan Ovalles y Comerma (1991), Martínez (1994), Cassel; Wendroth y Nielsen (2000) y Cerri *et al.* (2004), entre otros, la importancia que tiene el conocer la variabilidad espacial de todas aquellas propiedades del suelo que se relacionan con la producción en aquellos sitios que van a ser utilizados como campos experimentales, de manera que se pueda hacer un diseño experimental adecuado, una distribución y ubicación óptimas de las parcelas y unidades experimentales y una adecuada interpretación de los resultados que se produzcan en ellos.

A lo mencionado anteriormente podría agregarse que dicho conocimiento espacial debería ser monitoreado periódicamente, con el fin de conocer también su evolución temporal y poder tomar los correctivos y hacer los ajustes necesarios, oportunamente.

En estaciones experimentales que ya llevan cierto tiempo de funcionamiento y/o que han tenido una actividad experimental intensa y en las que no se tenga la información espacial recomendada, sería deseable que al momento de hacer la cosecha de los ensayos se programara una recolección controlada espacialmente, es decir, georreferenciada en algunos puntos, de manera que se pueda hacer la evaluación de la variabilidad espacial, por lo menos de la producción, siguiendo una metodología como la que se ha presentado en este trabajo que permita hacer los ajustes necesarios a la interpretación de los resultados que se obtengan en los diseños experimentales utilizados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los análisis que se han llevado a cabo permiten afirmar que, en el experimento evaluado, no toda la variabilidad que se acumula en el error experimental es aleatoria sino que hay un componente estructural en ella que, por lo menos en un caso, fue considerable y que, si no se elimina para hacer el análisis de varianza, distorsiona los resultados de éste.

El efecto producido por dicha variabilidad estructurada fue diferencial con respecto a las variedades de fríjol utilizadas para el experimento, hasta el punto que en un caso, al eliminar el efecto espacial en la variabilidad total del ensayo, desapareció el efecto significativo de los tratamientos de fertilización estudiados, mientras que en el otro, por el

contrario, al eliminar el efecto espacial, surgió el efecto que tuvieron aquellos en la producción.

El impacto del componente espacial de la variabilidad no sólo se manifiesta en el enmascaramiento del efecto de los tratamientos sobre la producción sino que, además, distorsiona la magnitud del mismo: después de eliminar por partes dicha variabilidad y hacer la comparación de promedios, luego de llevar a cabo el anava respectivo, se obtuvo un ordenamiento diferente de los tratamientos, variando así su importancia dentro del experimento.

Se recomienda que en los sitios destinados a hacer investigación para el sector agropecuario se establezcan, en detalle, las propiedades edáficas que se relacionan directamente con los factores de producción que se quieren evaluar, incluyendo el estudio de su variabilidad espacial, y que esta variabilidad se evalúe periódicamente, a medida que aumenta el tiempo de uso de los suelos en investigación, para detectar oportunamente los cambios que se vayan produciendo en ella y poder así, tomar los correctivos que permitan interpretar adecuadamente los resultados experimentales que se obtengan en ellos.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a los Ingenieros Agrónomos Álvaro Tamayo Vélez y Luis Germán Peláez Valencia, Investigadores de Corpoica del Centro Experimental “La Selva” (Rionegro, Oriente Antioqueño-Colombia), por permitir evaluar los resultados de sus experimentos. Al profesor Kenneth Roy Cabrera Torres por su colaboración en la aclaración de algunos puntos del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

BHATTI, A. U. *et al.* Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. *En: Journal of the American Society of Soil Science.* Vol. 55 (1991); p. 1523-1528.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *En: Journal of the American Society of Soil Science.* Vol. 58 (1994); p. 1501-1511.

CAMBARDELLA, C. A and KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. *En: Precision Agriculture.* Vol. 1 (1999); p. 5-14.

CASSEL, D. K.; WENDROTH, O. and NIELSEN, D. R. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: Opportunities arising from spatial dependence. *En: Agronomy Journal.* Vol. 92 (2000); p. 706-714.

CERRI, C. E. P. *et al.* Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *En: Geoderma.* Vol. 123 (2004) ; p. 51-68.

MALLARINO, A. P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *En: Journal of the American Society of Soil Science*. Vol. 60 (1996); p. 1473-1481.

MARTÍNEZ, R. Control de la correlación espacial en experimentos de campo en el sector agrícola. *En: Agronomía Colombiana*. Vol. 11, No. 1 (1994); p. 83-89.

MONTGOMERY, D. C. Diseño y análisis de experimentos. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 1991. 589 p.

OVALLES, F. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. Maracay: FONAIAP-CENIAP- Instituto de Investigaciones Agrícolas Generales, 1992. 44 p.

OVALLES, F. y COMERMA, J. Metodología para la selección y caracterización de sitios experimentales agropecuarios. Maracay: FONAIAP-CENIAP, 1991 44 p. (Serie B; no. 18).

PAZ-GONZÁLEZ, A.; VIEIRA, S. R and TABOADA CASTRO, Ma. T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. *En: Geoderma*. Vol. 97 (2000); p. 273-292.

SALDARRIAGA L., M. M. Efecto de la variabilidad espacial en los resultados del análisis de varianza de la producción de palma joven (*Elaeis guineensis* Jacq.). Medellín, 2002. 66 p. Trabajo de grado (Ingeniería Agronómica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias.

SAMRA, J. S. *et al.* Spatial dependence of soil sodicity and tree growth in a Natric Haplustalf. *En: Journal of the American Society of Soil Science*. Vol. 54 (1990); p. 1228-1233.

UPCHURCH, D. R. and EDMONDS, W. J. Statistical procedures for specific objectives. In: *Spatial variabilities of soils and landforms*. 2 ed. Madison: SSSA. 1992. p. 49-71. (SSSA Special Publication; no. 28)