

Metodología para estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo, el número de repeticiones y el tamaño de parcela en investigaciones con frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)

Methodology to estimate the soil heterogeneity coefficient, the number of repetitions and the optimum plot size for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) research

Víctor Manuel Mayor-Durán^{1*}, Matthew Blair², y Jaime Eduardo Muñoz²

¹Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Apartado Aéreo 6713, (CIAT), Cali, Colombia. ²Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, A.A. 237, Palmira, Valle, Colombia.

*Autor correspondencia: v.m.mayor@cgiar.org, vmmayord@unal.edu.co

Rec.: 14.07.11 Acept.: 16.03.12

Resumen

Con el objeto de estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo (b), sin realizar ensayos de uniformidad, se propuso una metodología en la cual se usan datos provenientes de ensayos de rendimiento, aislando el efecto de tratamiento de la variable de respuesta. Para definir aspectos metodológicos y mostrar algunos resultados obtenidos en el manejo estadístico de la información, se utilizaron los datos de un ensayo de rendimiento de frijol común realizado en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) por el Programa de Mejoramiento de Frijol Andino. El coeficiente de heterogeneidad del suelo se estimó a partir de la ley de varianza de Smith (1938) y la ecuación propuesta por Federer (1963) encontrando valores de 0.59 y 0.66, respectivamente. Teniendo como referencia el valor de b estimado a partir de la metodología de Federer (1963) se recurrió a la metodología de Hatheway (1961) para encontrar la mejor combinación de tamaño de parcela, número de repeticiones y diferencia a detectar como porcentaje de la media.

Palabras clave: Análisis estadísticos, experimentación, heterogeneidad del suelo, investigación de campo, ley de varianza, *Phaseolus vulgaris*, rendimiento.

Abstract

With the aim to estimate the coefficient of soil heterogeneity (b) without performing tests of uniformity, we proposed a methodology to use data from yield experiments insulating the treatment effect of the response variable. To identify methodological issues and illustrate the statistical proceeding management, data from one of the yield trials conducted in common bean by the Andean Breeding Program of CIAT were used. The coefficient of soil heterogeneity was estimated using the law of variance of Smith (1938) and the equation proposed by Federer (1963). Values of 0.59 and 0.66 respectively were obtained. Finally, we used the methodology of Hatheway (1961) and the “ b ” value estimated based on Federer (1963) to find the best combination of plot size, number of repetitions and difference to be detected as a mean percentage.

Key words: Experimentation, field research, law of variance, *Phaseolus vulgaris*, soil heterogeneity, statistical analysis, yield.

Introducción

La variabilidad de los suelos debida a cambios de las características físicas, químicas y biológicas no permite homogeneizarlos con fines de experimentación (Escobar, 1982). Esta variabilidad es el factor que más influye en el error experimental, ya que tiene un gran impacto en la producción de cultivos. La ausencia de control adecuado del error experimental afecta la precisión de los resultados de la investigación (Rosello y Gorostiza, 1993). Para caracterizar la tendencia de los lotes experimentales con frecuencia se utilizan los ensayos en blanco, que consisten en la siembra de una variedad o línea pura manejada con prácticas similares con el fin de que las diferencias en rendimiento de cada una de las parcelas sean debidas principalmente a la variabilidad del suelo, utilizando la planta como indicador biológico (Baena *et al.*, 1977; Escobar, 1982). Conocida la heterogeneidad del suelo es posible seleccionar los tamaños de parcela, el número de repeticiones y la diferencia entre promedios de rendimientos de los tratamientos, lo que permite minimizar el error experimental y tener un mayor grado de confiabilidad en los resultados (Escobar, 1982). El objetivo principal de esta investigación fue desarrollar una metodología para estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo, con el fin de garantizar las condiciones experimentales y elaborar un mapa de productividad a partir de datos provenientes de ensayos de rendimiento de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.).

Materiales y métodos

Localización y suelos

Los aspectos metodológicos y el manejo estadístico de los resultados se tomaron de un ensayo de rendimiento de frijol común realizado en Palmira en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) (03° 31' N, 76° 18' O; a 1001 m.s.n.m.) durante el primer semestre de 2009 (enero - abril). La condición de clima se caracterizó por una temperatura máxima variable entre los 23.8 °C y 33 °C y mínima entre 17.4 °C y 21.3 °C. La precipitación total fue de 270.2 mm distribuidos irregularmente. La evapotranspiración total fue de 408.6 mm, correspondiente a una sequía intermitente (Figura 1). Se realizaron dos riegos suplementarios por gravedad en el primer día y quince días después de la siembra.

El suelo en el sitio experimental es Mollisol Aquic Haplustoll arcillo limoso con un pH de 7.0, 13.2% de M.O., 70.5 mg/kg de P, 0.7, 11.5, 7.2 cmol/kg de K, Ca, Mg, respectivamente, y 22.4 mg/kg de S, con una C.I.C. de 28.4.

Genotipos utilizados

En este ensayo se evaluaron 64 líneas de frijol común de tipo arbustivo y de interés agronómico por ser tolerantes a estrés hídrico. El diseño experimental empleado fue bloques completos al azar con tres repeticiones y un tamaño de parcela de 3.09 m x 0.6 m y dos parcelas por genotipo, es decir, 192 unidades básicas en 3.708 m². La distancia de siembra entre plantas fue de 7 cm para una densidad aproximada de 200.000 plantas/ha.

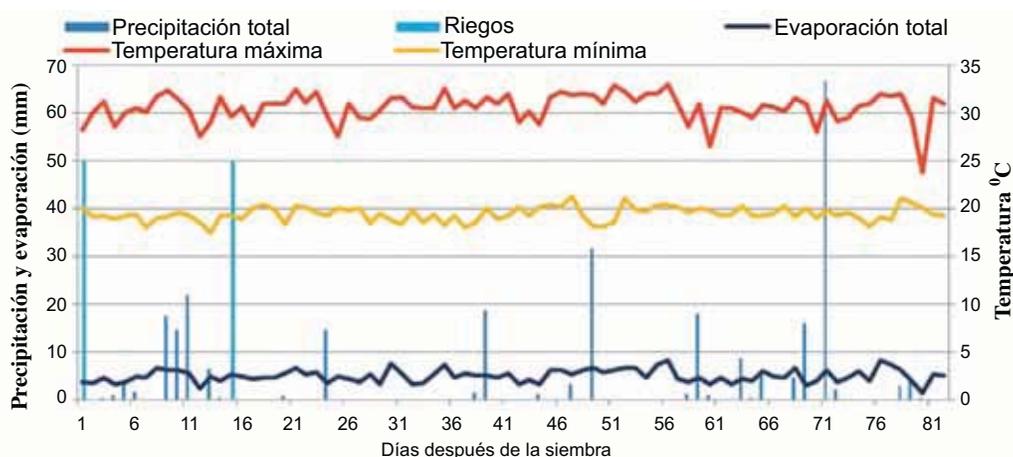


Figura 1. Condiciones climáticas en el sitio experimental durante enero - abril de 2009

Análisis estadísticos de resultados

Teniendo en cuenta que los genotipos evaluados eran diferentes, fue necesario remover el efecto de cada uno de ellos y de esta manera homogeneizar los datos obtenidos, para posteriormente analizarlos como un ensayo de uniformidad. A continuación se presenta un ejemplo basado en el diseño estadístico de bloques completos al azar (Gómez y Gómez, 1984), utilizado para analizar los datos del ensayo. Se parte de la relación siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + \varepsilon_{ij} \quad [1]$$

- donde,
- Y_{ij} = variable respuesta en la j -ésima repetición del i -ésimo tratamiento
- μ = media general.
- G_i = efecto del genotipo i .
- B_j = efecto del bloque j .
- ε_{ij} = error aleatorio.

se debe estimar el efecto del genotipo, que es igual a la diferencia entre el promedio del genotipo y el promedio general:

$$G_i = Y_i - Y \quad [2]$$

Posteriormente se obtiene la variable de respuesta, libre del efecto de genotipo para cada unidad experimental. Con este valor se estima la producción de cada parcela como si se tratara de una variedad uniforme:

$$Y_{ij} - G_i = \mu + B_j + \varepsilon_{ij} \quad [3]$$

Para construir el mapa de contorno de productividad se tomó como valor de referencia la desviación estándar de parcelas unitarias para rendimiento, como criterio de agrupación para parcelas homogéneas, es decir, que cada una de las clases tenía una longitud de intervalo igual a la desviación estándar de las parcelas unitarias, en un rango total comprendido entre 4.20 y 10.08 kg/parcela (Figura 2).

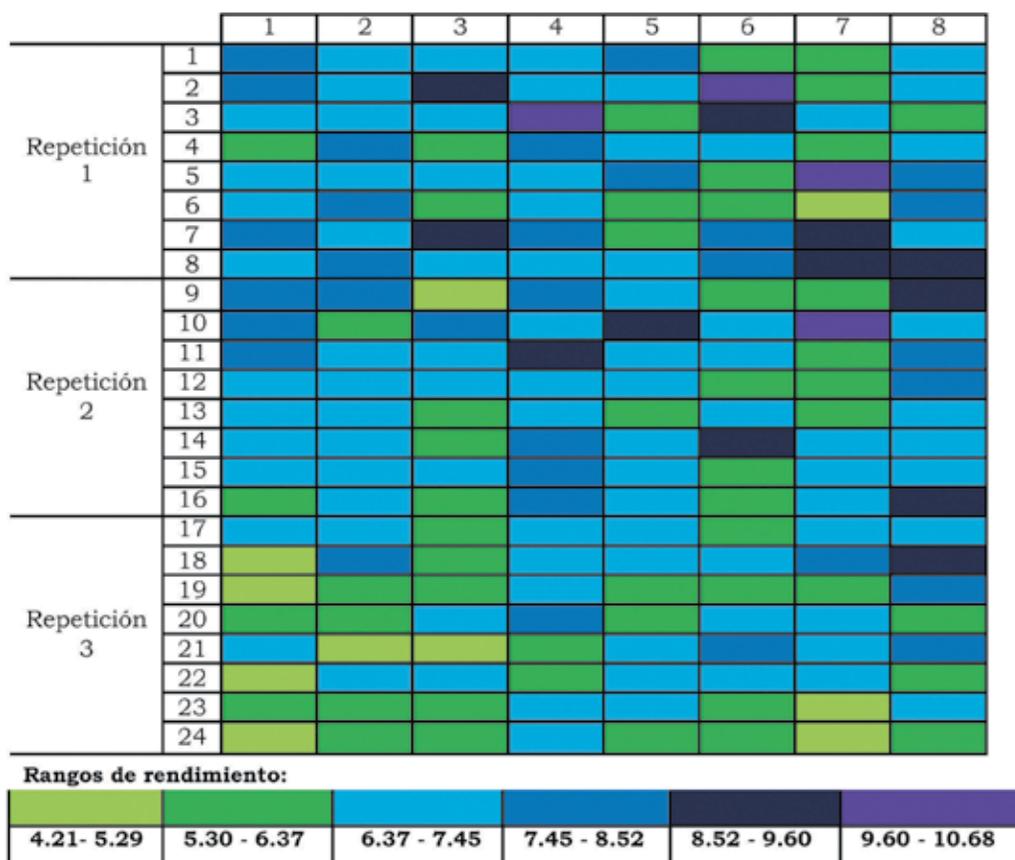


Figura 2. Mapa de contorno de productividad para el rendimiento (kg/parcela) de 192 parcelas de 3.708 m² cada una en el lote-O₂ del CIAT.

Con el fin de estimar el índice de heterogeneidad del suelo (b) se diseñaron diferentes arreglos en tamaño y forma, mediante la suma de rendimientos de parcelas unitarias adyacentes. Para cada arreglo se calcularon la media aritmética, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación y la varianza por área unitaria, expresada en la ecuación siguiente:

$$Vx_i = \frac{S^2x}{X^2} \quad [4]$$

donde S^2x = varianza entre parcelas de X unidades básicas, y X = número de unidades básicas que componen la parcela.

Cuando en el eje de las abscisas se coloca el tamaño de parcela (X_i) y en el eje de ordenadas las varianzas por área unitaria (Vx_i), se observa la relación existente entre ambas variables, denominada ley de varianza Smith (Smith, 1938).

$$Vx_i = \frac{V_l}{X_i^b} \quad [5]$$

donde

V_l = varianza del rendimiento entre parcelas unitarias.

Vx_i = varianza del rendimiento entre unidades secundarias, expresada por unidad de área.

X_i = área de las parcelas secundarias en los diferentes arreglos.

b = coeficiente de heterogeneidad del suelo.

Esta expresión puede ser linealizada en términos de logaritmos. La pendiente fue propuesta por Smith desde 1938 como una medida o índice de la heterogeneidad del suelo.

$$\log Vx_i = \log V_l - b \log X_i \quad [6]$$

En algunos casos, el coeficiente de heterogeneidad (b) calculado por la fórmula de Smith puede ser mayor que 1, lo que impide interpretar correctamente los resultados, ya que al ser b un indicativo de la correlación de la variabilidad entre parcelas y su tamaño, se desearía que oscilara entre 0 y 1; por esta razón Federer (1963) recomienda estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo ponderando los logaritmos de las varianzas por los grados de libertad asociados de cada arreglo. Valores de cero corresponden a la

total homogeneidad en el suelo y cuanto más cercanos a la unidad, mayor será su grado de heterogeneidad.

$$b = \frac{\frac{\sum(W_i Q_i P_i) - \sum(W_i Q_i) \frac{\sum(W_i P_i)}{\sum W_i}}{\sum W_i P_i^2 - \frac{\sum(W_i P_i)^2}{\sum W_i}}}{\sum W_i} \quad [7]$$

donde

Q_i = logaritmo de la varianza del rendimiento por unidad de área.

P_i = logaritmo del número de unidades básicas en cada tamaño de parcela.

W_i = grados de libertad asociados con la varianza dada (número de parcelas de tamaño $X_i - 1$).

A partir del coeficiente de heterogeneidad del suelo se estimó el tamaño óptimo de parcela; posteriormente se construyó un gráfico en el cual se puede determinar el número de repeticiones y valores de la diferencia a detectar entre promedios de tratamiento, utilizando la metodología de Hatheway (1961) condensada en la expresión siguiente:

$$X^b = \frac{2(t_1 + t_2)^2 * CV^2}{r * d^2} \quad [8]$$

donde

X = tamaño óptimo de parcela útil.

b = coeficiente de heterogeneidad del suelo (ponderado).

r = número de repeticiones.

d = diferencia que se desea detectar entre dos tratamientos, expresada como porcentaje de la media (+).

t_1 = valor de 't' en la Tabla para un nivel de α dado y $(r-1)(t-1)$ grados de libertad, siendo t = número de tratamientos.

t_2 = valor de 't' en la Tabla para $(r-1)(t-1)$ grados de libertad en un nivel.

α = $2(1 - p)$, donde p es la probabilidad estimada por el experimentador de obtener un resultado significativo.

CV = coeficiente de variación entre parcelas unitarias.

Los valores de t_1 y t_2 dependen de los niveles de probabilidad y los grados de libertad del error experimental, los cuales elige el investigador dependiendo del experimento. Para el cálculo normalmente los investigadores

asumen un nivel de significancia de 5%, la esperanza de detectar diferencias significativas en ocho de cada diez experimentos ($P = 0.8$) y ensayos con más de 14 grados de libertad en la estimación del error experimental. Bajo estos supuestos el valor de $(t_1 + t_2)^2$ se aproxima a 9, lo cual convierte la expresión en:

$$X^b = \frac{18 * CV^2}{r * d^2} \quad [9]$$

En los análisis realizados para definir el tamaño óptimo de parcela y número de repeticiones se tomaron las unidades experimentales como valor X_i . Cada unidad experimental correspondió a 3.708 m². Para desarrollar la metodología de Hatheway (1961) se utilizaron las variables siguientes (Ec. 9): r = variando desde 3 hasta 8; d = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40; b = estimado con metodología de Federer (1963); $2(t_1+t_2)^2 = 18$; CV = coeficiente de variación entre parcelas unitarias; X = tamaño de parcela en unidades.

Gómez y Gómez (1984) proponen estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo utilizando ensayos en bloques completos al azar (BCA), parcelas divididas y parcelas subdivididas. Para el diseño BCA se estima la varianza de los tamaños de parcela —del bloque y la de la unidad d experimental— y para el diseño de parcelas subdivididas se estiman la varianza del bloque, la parcela principal, la subparcela y la subsubparcela. Por tanto, sólo se tienen entre dos (BCA) y cuatro (parcelas subdivididas) puntos para estimar el coeficiente de heterogeneidad del suelo. En la metodología propuesta en este estudio se utilizan 30 puntos para estimar este coeficiente, aunque pueden ser más, si se consideran otros arreglos de parcela para obtener una mayor exactitud en la estimación del coeficiente de heterogeneidad del suelo.

Resultados y discusión

En este estudio se presentaron seis clases o categorías de parcelas homogéneas comprendidas entre 4.20 y 10.08 kg/parcela (Figura 2), con una longitud de intervalo igual a la desviación estándar de parcelas unitarias (1.08). En dicha Figura se observa el mapa de contorno para rendimiento y muestra

claramente una gran variación en términos de productividad de los diferentes sitios del lote experimental. Se puede apreciar que no existe un gradiente definido dentro del lote, indicando el alto grado de heterogeneidad del suelo. Existe algún grado de tendencia en las parcelas vecinas ya que en la mayoría de los casos presentan una producción similar.

Desde el punto de vista práctico, el conocimiento de los mapas de productividad ayuda a prevenir errores en experimentos futuros, en los cuales la baja o alta productividad de un genotipo puede ser resultante de la posición de la parcela dentro del lote. Un mapa de productividad permite excluir ciertas áreas y tener en cuenta la tendencia de la fertilidad para formar estratos o bloques en los experimentos, mejorando la precisión (Escobar *et al.*, 2006).

El coeficiente de heterogeneidad del suelo fue estimado mediante la ley de varianza de Smith (1938) (Figura 3) y la ecuación propuesta por Federer (1963) (Ec. 7), obteniendo valores de 0.59 y 0.66, respectivamente, los cuales son altos (Escobar, 1982). Estos valores son similares; sin embargo, el método de Federer es más confiable por ser un coeficiente ponderado, por tanto, se eligió como valor referencia para hallar el tamaño óptimo de parcela, el número de repeticiones y la diferencia a detectar de la media.

En investigaciones anteriores, Davis *et al.* (1981), Escobar (1982) y Escobar *et al.* (2006) encontraron coeficientes de heterogeneidad del suelo, entre paréntesis, en lotes del CIAT cultivados con arroz (0.64), yuca (0.87), frijol voluble (0.87) y frijol arbustivo (0.75), lo que indica una alta heterogeneidad del suelo. El valor obtenido en este estudio (0.66) es similar a los anteriores, lo cual indica la efectividad del método propuesto en esta investigación.

El coeficiente de variación fluctuó entre 6.38 y 15.78; el valor más alto correspondió al arreglo de parcelas unitarias (1 x 1) y el más bajo el de arreglo 5 x 4 (Cuadro 1). El hecho de que el arreglo más bajo no se presentara con el mayor número de parcelas involucradas (8 x 8), indica que los análisis fueron hasta cierto punto efectivos, ya que se pudo encontrar gran cantidad de la variación posible dentro de los arreglos realizados.

METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE HETEROGENEIDAD DEL SUELO, NÚMERO DE REPETICIONES Y TAMAÑO DE PARCELA EN INVESTIGACIONES CON FRIJOL (*PHASEOLUS VULGARIS* L.)

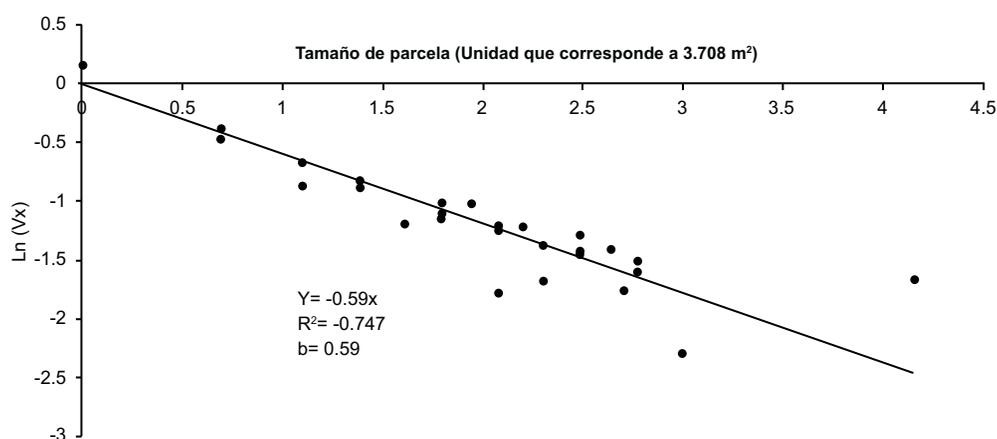


Figura 3. Regresión lineal del logaritmo de la varianza del rendimiento (V_x) en función del logaritmo del tamaño de parcela (x).

Cuadro 1. Estadísticos obtenidos en ensayo de rendimiento de frijol común realizado en el lote-O2 del CIAT.

Arreglo (no.)	Arreglo	H	V	X_i	G.L.	Prom. (kg)	S^2	S	CV	V_x (Ec. 4)
1	1 x 1	1	1	1	191	6.84	1.16	1.08	15.78	1.16
2	1 x 2	1	2	2	95	13.69	2.49	1.58	11.52	0.62
3	1 x 3	1	3	3	47	20.35	3.78	1.94	9.55	0.42
4	1 x 4	1	4	4	47	27.37	6.69	2.59	9.45	0.42
5	1 x 5	1	5	5	23	33.89	7.57	2.75	8.12	0.30
6	1 x 6	1	6	6	23	40.70	11.37	3.37	8.29	0.32
7	1 x 7	1	7	7	23	47.43	17.63	4.20	8.85	0.36
8	1 x 8	1	8	8	23	54.74	18.69	4.32	7.90	0.29
9	2 x 1	2	1	2	95	13.69	2.72	1.65	12.05	0.68
10	2 x 2	2	2	4	47	27.37	6.55	2.56	9.35	0.41
11	2 x 3	2	3	6	23	40.41	11.84	3.44	8.52	0.33
12	2 x 4	2	4	8	23	40.70	10.78	3.28	8.07	0.17
13	2 x 5	2	5	10	11	67.78	25.22	5.02	7.41	0.25
14	2 x 6	2	6	12	11	81.41	33.40	5.78	7.10	0.23
15	2 x 7	2	7	14	11	94.86	47.79	6.91	7.29	0.24
16	2 x 8	2	8	16	11	109.49	56.94	7.55	6.89	0.22
17	3 x 1	3	1	3	63	20.53	4.60	2.14	10.44	0.51
18	3 x 2	3	2	6	31	41.06	12.93	3.60	8.76	0.36
19	3 x 3	3	3	9	15	61.06	23.93	4.89	8.01	0.30
20	3 x 4	3	4	12	15	82.12	34.79	5.90	7.18	0.24
21	4 x 1	4	1	4	47	27.37	7.05	2.66	9.70	0.44
22	4 x 2	4	2	8	23	54.74	19.14	4.37	7.99	0.30
23	4 x 3	4	3	12	11	81.41	39.92	6.32	7.76	0.28
24	4 x 4	4	4	16	11	109.49	51.54	7.18	6.56	0.20
25	5 x 1	5	1	5	31	34.92	7.54	2.75	7.86	0.30
26	5 x 2	5	2	10	15	69.83	18.69	4.32	6.19	0.19
27	5 x 3	5	3	15	7	103.79	38.49	6.20	5.98	0.17
28	5 x 4	5	4	20	7	139.66	40.53	6.37	4.56	0.10
29	8 x 1	8	1	8	23	54.74	18.31	4.28	7.82	0.29
30	8 x 8	8	8	64	2	437.96	779.59	27.92	6.38	0.19

H = Número de Filas, V = Número de Columnas, X_i = Tamaño de parcela (unidades experimentales), G.L = Grados de Libertad, S^2 = Varianza entre parcelas de X unidades de tamaño, CV = Coeficiente de variación, V_x = Varianza de la producción por área unitaria (S^2/X^2).

Con los valores obtenidos mediante la ecuación 9 se generaron los datos que aparecen en el Cuadro 2 y en la Figura 4. El ensayo de rendimiento tuvo como características un tamaño de parcela de 3.708 m² y tres repeticiones. De acuerdo con la Figura 5 con estas características es posible detectar diferencias de 38% del promedio, aproximadamente. Después del análisis de comparación de medias, se obtuvo una media general de 1848.5 kg/ha y un valor de DMS = 546.3 que corresponde,

aproximadamente, al 30% de la diferencia detectada del promedio. Se observa que el valor obtenido a partir de la metodología Hatheway (1961) es similar al obtenido con los datos del ensayo de rendimiento comprobando, una vez más, la efectividad de la metodología planteada en este estudio para la estimación del coeficiente de heterogeneidad del suelo, el número de repeticiones y la diferencia a detectar del promedio.

Cuadro 2. Tamaños de parcela (m²) calculados para diferente número de tratamientos y repeticiones a detectar (expresadas como porcentaje de la media) b = 0.66, C1= 15.78, α = 5%, P = 80%.

Diferencia a detectar (%)	Repeticiones					
	3	4	5	6	7	8
5	1838.44	1188.12	846.84	642.17	508.23	415.01
10	224.31	144.97	103.33	78.35	62.01	50.64
12	128.99	83.36	59.42	45.06	35.66	29.12
14	80.79	52.21	37.22	28.22	22.33	18.24
16	53.87	34.82	24.82	18.82	14.89	12.16
18	37.68	24.35	17.36	13.16	10.42	8.51
20	27.37	17.69	12.61	9.56	7.57	6.18
25	13.90	8.99	6.40	4.86	3.84	3.14
30	8.00	5.17	3.68	2.79	2.21	1.80
35	5.01	3.24	2.31	1.75	1.38	1.13
40	3.34	2.16	1.54	1.17	0.92	0.75

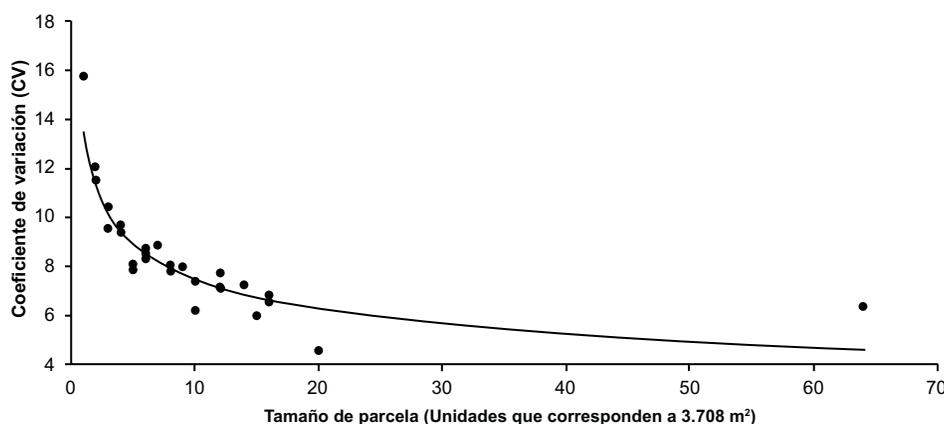


Figura 4. Relación entre el coeficiente de variación (CV) del rendimiento y la unidad de parcela.

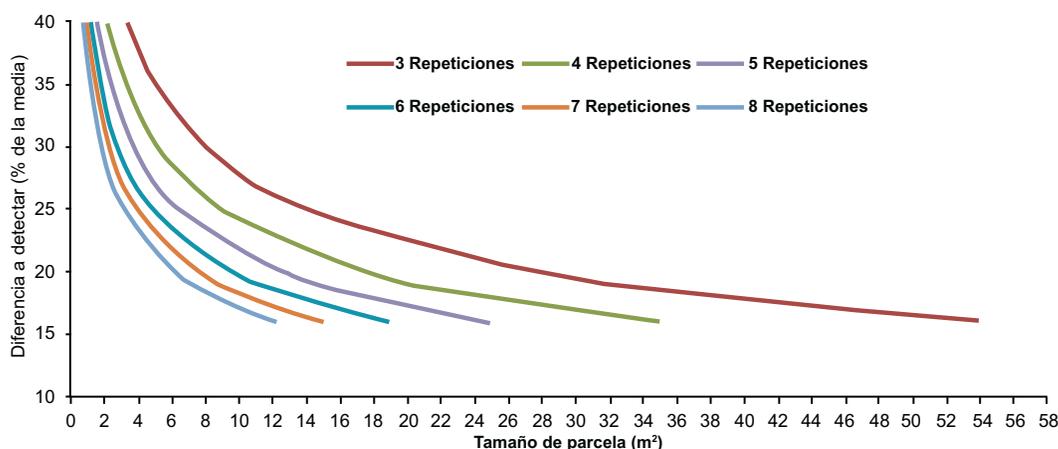


Figura 5. Relación entre tamaño de parcela, número de repeticiones y diferencia verdadera a detectar en un experimento de frijol.

Conclusiones

- El lote en el cual se realizó el ensayo de rendimiento no presentó un gradiente ni una tendencia definidos, pero sí un alto grado de heterogeneidad.
- Para la estimación del coeficiente de heterogeneidad del suelo es de mayor confiabilidad el método propuesto por Federer (1963), ya que es un coeficiente de regresión ponderado. El lote del estudio presentó un índice de heterogeneidad del suelo de 0.66.
- Mediante la metodología de Hatheway (1961) se puede obtener información de gran importancia para futuros experimentos que se realicen en el lote del estudio, ya que será posible reducir los efectos de la heterogeneidad del suelo, escogiendo un tamaño de parcela, número de repeticiones y diseño experimental apropiados.
- La metodología propuesta en esta investigación resultó efectiva, lo cual es una gran ayuda para centros de investigación que deseen conocer las condiciones de sus lotes, sin tener que realizar un ensayo de uniformidad.
- Cabe señalar que los datos obtenidos a partir de esta investigación fueron de gran importancia en el mejoramiento de frijol común andino para sequía.

Referencias

- Baena, D.; Amézquita M. C.; Rodríguez, P. M.; Voysest, O.; y Takegami, F. 1977. Estudio de la heterogeneidad del suelo, del tamaño y forma de parcela y el número de repeticiones óptimos en ensayos de uniformidad en frijol. XXIII Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales.
- Davis, J. H.; Amézquita, M. C.; y Muñoz, J. E. 1981. Border effects and optimum plot sizes for climbing beans (*Phaseolus vulgaris*) and maize in association and monoculture. *Expl. Agric.* 17:127 - 135.
- Escobar, J. A. 1982. La heterogeneidad del suelo y los ensayos de uniformidad. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Cali - Colombia.
- Escobar G., J. A.; Amézquita, M. C.; Muñoz, J. E.; y García, J. A. 2006. Manual de capacitación en biometría para la experimentación en frijol. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 133p.
- Federer, W. T. 1963. *Experimental design*. Nueva York. MacMillan. 544 p.
- Gómez, K. A y Gómez, A. A. 1984. *Statistical procedures for agricultural research*. 2nd Edition. International Rice Research Institute. Filipinas. Pp. 479 - 503.
- Hatheway, W. H. 1961. Convenient plot size. *Agron. J.* 53: 279 - 280.
- Rosello, E. y Fernández, G. M. 1993. Guía técnica para ensayos de variedades en campo. Estudio FAO producción y protección vegetal 75.
- Smith, H. F. 1938. An empirical law describing heterogeneity in the yield of agriculture crops. *J. Agric. Sci.* 28: 1 - 23.