

EFICIENCIA RELATIVA Y CALIDAD DE LOS EXPERIMENTOS DE FERTILIZACIÓN EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Relative Efficiency and Quality of Fertilization Experiments in Sugar Cane

Juan Ruiz-Ramírez^{1‡}

RESUMEN

En la experimentación agrícola, emplear un diseño experimental sin evaluar su eficiencia relativa con respecto a otro menos complejo se manifiesta como un problema recurrente. Igualmente, es importante conocer la variabilidad que existe en los experimentos en el cultivo de caña de azúcar, aspecto en el que el coeficiente de variación es fundamental como indicador de la calidad del experimento. El objetivo del presente estudio fue evaluar la eficiencia relativa y la calidad de los experimentos en caña de azúcar desarrollados en los estados de Veracruz y Oaxaca, México. La metodología consistió en analizar la información de 12 experimentos de fertilización en el cultivo de caña de azúcar con el diseño de bloques al azar. Con los resultados del análisis de varianza se calculó la eficiencia relativa para evaluar la eficiencia del diseño de bloques al azar con respecto al diseño completamente al azar. Con el coeficiente de variación se valoró la calidad de los experimentos. En el 58% de dichos experimentos, el diseño experimental fue el apropiado. Respecto a la calidad de los mismos, el 25% no tuvo la calidad esperada, por lo que se recomienda identificar los factores que influyeron en estos resultados.

Palabras clave: *eficiencia relativa, coeficiente de variación, caña de azúcar.*

SUMMARY

In agricultural experimentation, a recurrent problem is using an experimental design without evaluating its relative efficiency compared with another less complex. It is equally important to know the variability

in experiments on sugar cane. The basic coefficient of variation was thus used as an indicator to measure experimental quality. The objective of the present study was to evaluate the relative efficiency and the quality of experiments in sugar cane carried out in the States of Veracruz and Oaxaca in Mexico. The methodology consisted of analyzing the data from 12 sugar cane fertilization experiments by randomized complete block design. The relative efficiency was calculated with the results from the analysis of variance in order to evaluate the efficiency of the randomized complete block design compared to a completely randomized design. Our results suggest that in 58% of the above mentioned experiments, the experimental design was appropriate. Twenty-five percent did not attain the expected quality, and it is therefore recommended to identify the factors that influence the results.

Index words: *relative efficiency, coefficient of variation, sugar cane.*

INTRODUCCIÓN

En este artículo se tratan aspectos de la investigación agrícola, del diseño de bloques al azar, de la manera de evaluar la eficiencia del diseño, o bien la recomendación de otro, así como también se introduce el indicador de la calidad de los experimentos a través del cálculo del coeficiente de variación. En consecuencia, es posible que algunos experimentos utilicen el diseño experimental erróneo, generando resultados no confiables y pérdidas económicas importantes por haber sido realizados en varias localidades y ciclos agrícolas, ya que a menudo los experimentos se realizan y repiten en espacio y tiempo para generalizar resultados confiables para un área determinada (Martínez, 1994).

Experimentación Agrícola

La experimentación agrícola implica el establecimiento y la conducción de un experimento, y se define como una secuencia de pasos planeados para

¹ Facultad de Economía, Cuerpo Académico: Economía y Geografía, remediación sustentable. Universidad Veracruzana. Av. Xalapa esquina con Av. M. Ávila Camacho s/n. 91020, Xalapa, Veracruz, México.

[‡] Autor responsable (jruizv@gmail.com)

probar o verificar una hipótesis acerca del efecto de una dosis de fertilización, de una densidad de siembra, de una nueva variedad resistente a plagas o enfermedades, entre otros (Steel y Torrie, 1992). Una parte importante en la planeación de un experimento es la elección del sitio experimental (Cox, 1958), el cual debe ser representativo del área geográfica hacia donde se puedan extrapolar las hipótesis o las recomendaciones de las dosis de fertilización avaladas en los resultados. Asimismo, para elegir el diseño experimental se deben considerar, además del sitio, los objetivos e hipótesis de la investigación.

Diseño Experimental

El diseño de bloques al azar (DBA) es generalmente utilizado en experimentación en el cultivo de caña de azúcar (Ramírez *et al.*, 2002; Salgado *et al.*, 2003; Rodríguez y Romero, 2007), en especial cuando se tiene en el sitio experimental un gradiente de condiciones no controlables (Cochran y Cox, 2001), como en el caso de los fuertes vientos que ocasionan la caída de la flor o el fruto en los cultivos de caña de azúcar y de mango. Otro factor importante es la pendiente del terreno, la cual provoca diferentes grados de erosión del suelo, cuya omisión podría afectar la respuesta a los tratamientos. Asimismo, la identificación del gradiente se realiza de manera subjetiva, esto aunado a que en la investigación agrícola el mismo experimento se repite en varios períodos o ciclos agrícolas, lo cual llevaría a resultados erróneos y pérdidas económicas importantes por haber utilizado un diseño experimental inadecuado.

Una forma de verificar que no existan gradientes en el sitio experimental es a través de la ejecución de un experimento *ex-profeso*, de los llamados “experimentos en blanco”, en los cuales no se aplica tratamiento alguno; igualmente se comprueba que no existan efectos residuales de algún experimento establecido anteriormente en el mismo lugar.

Evaluación del Experimento

Para evaluar si el diseño experimental empleado es el correcto, se sugiere calcular la eficiencia relativa (ER). Para ello se prueba la ER de ese diseño experimental con respecto a uno menos complejo (Steel y Torrie, 1992).

En el cálculo de la ER se utiliza la varianza del experimento, conocida como el cuadrado medio del error,

obtenido mediante el análisis de varianza, donde se registra la variabilidad de factores no controlados, como son la calidad de las semillas y los factores físicos en las unidades experimentales, cuando éstas se establecen en el campo o sitio experimental.

Una manera de verificar la calidad de un experimento es a través del coeficiente de variación (CV), del que se espera no exceda de 20% para experimentos uniformes que se realizan en cultivos tales como maíz, trigo y caña de azúcar (Martínez, 1994); sin embargo, existen otros cultivos con mucha variabilidad reportada principalmente para el rendimiento agrícola, como ocurre con las hortalizas, los árboles frutales y los maderables, donde es normal que el CV exceda el 50% (Martínez, 1994). En experimentos de fertilización en el cultivo de la caña de azúcar, se encontró que el CV varía desde 1.22% (Ramírez *et al.*, 2002) hasta 261% (Segura, 1971, Salgado-García *et al.*, 2000, Salgado *et al.*, 2001, Sánchez *et al.*, 2003).

No obstante, tanto al CV como a la ER se les ha otorgado poca importancia, y los escasos estudios sobre la ER únicamente informan el valor de la probabilidad para probar el efecto significativo de los tratamientos sobre la variable dependiente o de respuesta (Orozco-Romero y Pérez-Zamora, 2006; Cruz-Crespo *et al.*, 2006; Medina *et al.*, 2008) y otros, además registran el CV (Segura, 1971; Salgado-García *et al.*, 2000; Romero-Gómezcaña *et al.*, 2006).

En el caso del cultivo de la caña de azúcar, un problema que se presenta recurrentemente en los experimentos es que, aunque el sitio se observe homogéneo y con ligera pendiente, se utiliza el diseño de bloques al azar, aun cuando no se tiene evidencia importante para establecer bloques. El objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia relativa y la calidad de los experimentos de fertilización en el cultivo de caña de azúcar en los estados de Veracruz y Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo presenta la eficiencia relativa (ER) para probar si el diseño experimental empleado fue el correcto y también se evalúa la calidad de los experimentos a través del coeficiente de variación (CV).

Los 12 experimentos de fertilización seleccionados que evaluaron dosis de fertilización con base en solubles condensados de melaza (CMS) se realizaron en los estados de Veracruz y Oaxaca, México, en los años

2002, 2003 y 2004. Todos ellos sin riego, pero en sitios con una precipitación anual de 1800 mm y una temperatura media de 25 °C. Las variables que se midieron en cada experimento fueron: germinación, altura, diámetro, sacarosa, humedad, reductores, rendimiento en campo e industrial.

El diseño experimental utilizado fue el de bloques al azar, con 4 bloques y 11 tratamientos (Cuadro 1), aunque algunos experimentos sólo tuvieron 4 y 7 de los tratamientos indicados en el Cuadro 1. Para probar la significancia entre dichos tratamientos se realizó un análisis de varianza de la variable rendimiento agrícola, con el programa de computo SAS (SAS, 1996).

Para calcular la ER con respecto a los 2 diseños experimentales (DBA contra DCA), se estimó el cuadrado medio del error en un diseño completamente al azar, usando la información del DBA (Steel y Torrie, 1992).

$$\hat{CM}_E(DCA) = \frac{f_b CM_{Bloq} + (f_t + f_e) CM_E}{f_b + f_t + f_e} \quad (1)$$

donde:

f_b = grados de libertad de bloques

f_t = grados de libertad de los tratamientos

f_e = grados de libertad del error experimental

CM_{Bloq} = cuadrado medio de bloques

CM_E = cuadrado medio del error experimental

Una vez obtenido el cuadrado medio del error del diseño completamente al azar, el cálculo de la eficiencia relativa está dada por:

$$ER = \frac{(f_1+1)(f_2+3) \hat{CM}_E(DCA)}{(f_2-1)(f_1+3) CM_E(DBA)} \times 100 \quad (2)$$

donde:

$f_1 = f_e$

$f_2 = f_b + f_e$

El criterio que se sigue para determinar que el DBA fue el apropiado, ocurre cuando la ER es mayor al 100%,

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos de fertilización aplicados en los experimentos de caña de azúcar en los estados de Veracruz y Oaxaca, México.

Tratamientos	
1	Testigo absoluto (0-0-0)
2	Fertilizante químico para plantas (13-04-20) 600 kg ha ⁻¹
3	3000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado
4	5000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado
5	7000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado
6	3000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado + P y K 2 meses después
7	5000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado + P y K 2 meses después
8	3000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado + P y K en la siembra
9	5000 L ha ⁻¹ de CMS asperjado + P y K en la siembra
10	3000 L ha ⁻¹ de CMS enterrado
11	5000 L ha ⁻¹ de CMS enterrado

Información proporcionada por el Ing. Manuel Enríquez Poy, Vicepresidente de la Cámara Nacional Azucarera y Alcohólica (CNIAA) 2008. CMS = condensados de melaza.

en caso contrario, el diseño completamente al azar (DCA) fue más eficiente y se requiere analizar nuevamente el experimento con un DCA.

Un indicador de la calidad de los experimentos es el CV, y se utiliza en los cultivos de algodón (Martínez, 1970) y de la caña de azúcar (Martínez, 1994). Está dado por la siguiente expresión:

$$CV = \frac{S(100)}{\bar{X}} = \frac{\sqrt{CM_E}}{\bar{X}} \times 100 \quad (3)$$

En el Cuadro 2 se presenta la clasificación de la calidad aplicada a experimentos de cultivos anuales Martínez (1970) y se utilizó para describir la calidad de los 12 experimentos del cultivo de caña de azúcar analizados. Para ello se elaboró una tabla de frecuencias, útil en la representación de los resultados (McCallum, 1999).

Cuadro 2. Precisión de la calidad de los experimentos en el cultivo anual, según Martínez (1970).

Rango del coeficientes de variación (CV)	Precisión
5 < CV ≤ 10	Muy buena
10 < CV ≤ 15	Buena
15 < CV ≤ 20	Regular
20 < CV ≤ 25	Mala
CV > 25	Muy mala

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de varianza con el diseño de bloques al azar de la variable rendimiento agrícola se realizaron de manera individual para cada experimento y para ejemplificar los resultados, se presenta el análisis correspondiente del experimento del ingenio El Refugio, ejido Acatlán como se muestra en el Cuadro 3, el cual es similar al resultado del SAS (Zamudio y Alvarado, 1996), aunque se presentaron los resultados del modelo de manera tradicional (Montgomery, 1991).

Al calcular la eficiencia relativa del experimento Acatlán, se requiere utilizar la información del análisis de varianza (Cuadro 3) y de esta manera se estimó el cuadrado medio del error del diseño completamente al azar, (Ecuación 1):

$$CM_E(DCA) = \frac{3(182.3582) + (10+30)(30.3988)}{3+10+30} = 41.00$$

Una vez obtenido el cuadrado medio del error del DCA, éste se sustituyó en la expresión de la ER (Ecuación 2) y se obtuvo:

$$ER = \frac{(30+1)(33+3)(41.00)}{(33-1)(30+3)(30.3988)} = 134.1545\%$$

En el experimento Acatlán, el DBA fue más eficiente en 34.16% con respecto al DCA. Para cada experimento se calculó la ER de manera similar como se muestra en el Cuadro 4. En él se observa que en 7 experimentos (58.33%), la ER excede el 100%, por lo que el DBA fue el correcto. Los 5 experimentos restantes se analizaron con el DCA.

Nótese que existe escasa bibliografía y no se informa sobre estudios en los que se evalúe la ER en experimentos en el cultivo de caña de azúcar, aunque sí para el cultivo del algodón (Martínez, 1970)

y en la comparación de los diseños de tratamiento de superficie de respuesta en el área de biotecnología (Ascanio *et al.*, 1998).

Los CV para rendimiento se muestran en el Cuadro 4.

Para conocer la precisión de los experimentos se calculó la tabla de frecuencias del CV de los 12 experimentos descritos en el Cuadro 5, en el cual se observó que 75% de los experimentos analizados tuvieron de muy buena a buena precisión, y de mala y muy mala precisión en 16 y 8%, respectivamente. Las dos últimas categorías de clasificación se debieron a que el CV fluctuó entre 20 y 45%, el cual no es tan alto en comparación a los obtenidos en otros experimentos con el mismo cultivo, los cuales llegan a tener un CV hasta de 265% (Salgado *et al.*, 2003). Los CV son un indicador de una elevada variabilidad experimental cuando son > 20% y < al 60% como lo citan en un estudio de fertilización en caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2003).

Los resultados son diferentes a los obtenidos en el cultivo de algodón en el que utilizaron los diseños de cuadro latino y látices para compararlos con el DCA (Martínez, 1970).

El CV para clasificar al experimento de muy buena calidad debe tener valores entre el 5 y 10%. Sin embargo, en el estudio se utilizó un CV menor al 5% como indicador de criterio de aceptación para una buena reproducibilidad del experimento (Luna-Saucedo *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

- El diseño experimental de bloques al azar fue apropiado en aproximadamente la mitad de los experimentos de caña de azúcar analizados. El resto se reanalizaron con el diseño completamente al azar.
- La calidad de los 12 experimentos analizados tuvieron precisión de buena y muy buena, en un 75% de acuerdo a los valores obtenidos del coeficiente de variación.

Cuadro 3. Análisis de varianza del rendimiento del experimento del Ingenio El Refugio, Ejido de Acatlán.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio del error	Valor de F	Probabilidad
Bloques	3	547.0747	182.3582	6.00	0.0025
Tratamientos	10	578.6751	57.8675	1.90	0.0845
Error	30	911.9647	30.3988		
Total corregido	43	2037.7145			

Elaboración propia con base a los resultados obtenidos al analizar los experimentos en el programa SAS.

Cuadro 4. Eficiencia relativa del diseño de bloques al azar respecto al diseño completamente al azar de los experimentos de caña de azúcar.

Nombre del experimento	Número de tratamientos	Rendimiento agrícola	Eficiencia relativa	Coefficiente de variación	$P > F$
		Mg ha ⁻¹		%	
El Mango (Ejido)	4	22.46	149.88	24.13	0.0209
Acatlán (Ejido)	4	50.81	174.16	11.52	0.3703
Ingenio El Refugio. Acatlán (Ejido)	11	62.44	134.15	8.83	0.0845
1° de Mayo	11	45.34	120.35	11.48	0.0001
Guadalupe de Reyes 1, Oaxaca (parcela)	7	76.80	92.35	8.03	0.0001
Guadalupe de Reyes 2, Oaxaca (parcela)	7	51.85	92.03	13.65	0.0001
Ingenio El Refugio Paso Nuevo, Veracruz (parcela)	7	66.89	88.62	13.90	0.0003
Ingenio Motzorongo	7	38.78	87.97	23.08	0.0006
Laguna Chica	11	100.21	92.75	12.34	0.8541
Lázaro Cárdenas	11	98.69	113.20	9.07	0.1755
Palenque	11	69.66	101.42	44.61	0.4763
Paso Nuevo	11	83.57	116.65	12.34	0.2468

Elaboración propia con base a los resultados obtenidos al analizar los experimentos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Ing. Manuel Enríquez Poy, Vicepresidente de la Cámara Nacional Azucarera y Alcohólera (CNIAA), por haber proporcionado los datos experimentales empleados en esta investigación. Así también, al Dr. Raúl Cortés García, Director del Instituto de Investigación Multidisciplinaria de la Universidad Veracruzana, por el financiamiento otorgado para la publicación de este artículo.

LITERATURA CITADA

Ascanio, M., F. Chacín y W. Machado. 1998. Comparación del diseño compuesto central ortogonal (DCCO) y el diseño compuesto central rotatable (DCCR) en la experimentación con cultivo de tejidos vegetales (caso: *Canavalia ensiformis* L.). Rev. Fac. Agron. U.C.V. 24: 105-113.

Cochran, W. G. y G. M. Cox. 2001. Experimentación agrícola. Diseños experimentales. Editorial Trillas. México, D.F.

Cox, D. R. 1958. Planning of experiments. John Wiley and Sons. New York, NY, USA.

Cruz-Crespo, E., L. Arévalo-Galarza, R. Cano-Medrano y E. A. Gaytán-Acuña. 2006. Soluciones pulso en la calidad postcosecha de lisianthus (*Eustoma grandiflorum* Raf.) cv. Echo Blue. Agric. Téc. Méx. 32: 191-200.

Luna-Saucedo, B. E., A. C. Rodríguez R., O. Quevedo A. y L. Cabrera R. 2007. Determinación de metales pesados en un suplemento nutricional de origen natural con propiedades antioxidantes. Lat. Am. J. Pharm. 26: 760-764.

Martínez G., A. 1994. Experimentación agrícola. Métodos Estadísticos. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Martínez R., O. 1970. Eficiencia de los diseños experimentales usados en algodón. Agron. Trop. 20: 81-95.

McCallum, B. 1999. A carnival of stats. Science 284: 1291-1292.

Medina, P., S. Mejía, R. Martínez y L. Sánchez. 2008. Efecto de la suplementación con ensilaje de millo adicionado con urea-melaza-azufre, semilla de algodón y harina de pescado sobre la producción de leche en vacas doble propósito durante la época seca en el Valle del Sinú. Rev. Corpoica Cienc. Tec. Agrop. 9: 81-87.

Montgomery, D. C. 1991. Diseños y análisis de experimentos. Ibero América. México, D.F.

Cuadro 5. Precisión de la calidad de los experimentos del cultivo de caña de azúcar de los estados de Veracruz y Oaxaca, México.

Precisión del experimento	Intervalo de clase	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia acumulada	Porcentaje acumulado
Muy buena	$5 < CV \leq 10$	3	25.0	3	25.0
Buena	$10 < CV \leq 15$	6	50.0	9	75.0
Regular	$15 < CV \leq 20$	0	0.0	9	75.0
Mala	$20 < CV \leq 25$	2	16.6	11	91.6
Muy mala	$25 < CV \leq 45$	1	8.4	12	100.0

Elaboración propia con base a los resultados obtenidos al analizar los experimentos; CV = coeficiente de variación.

- Orozco-Romero, J. y O. Pérez-Zamora. 2006. Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en plátano (*Musa* AAA Simmonds) cv. Gran Enano. *Agrociencia* 40: 149-162.
- Ramírez, J. L., Y. López, K. Nieves y P. L. Fonseca. 2002. Caracterización química de cinco variedades de caña de azúcar y la selección de las más promisorias para ser utilizadas en la alimentación de rumiantes. *Med. Vet.* 19: 125-129.
- Rodríguez, S. y J. Romero. 2007. Efecto de biofertilizante y estrés por hidromorfía en vitroplantas de caña de azúcar, variedad c120-78. *Temas Agrarios* 12: 14-20.
- Romero-Gómezcaña, N. R., P. Sánchez-García, J. Rodríguez-Alcázar y C. Saucedo-Veloz. 2006. Aplicación foliar de calcio y su relación con la calidad en frutos de mango cv. Haden. *Agric. Téc. Méx.* 32: 5-15.
- Salgado G., S., R. Núñez E., J. J. Peña C., J. D. Etchevers B., D. J. Palma L. y R. M. Soto. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de fertilización. *Terra* 19: 155-162.
- Salgado, S., R. Núñez, J. Peña, J. Etchevers, D. Palma y R. M. Soto. 2003. Manejo de la fertilización en el rendimiento, calidad del jugo y actividad de invertasas en caña de azúcar. *Interciencia* 28: 576-580.
- Salgado-García, S., R. Núñez-Escobar, J. J. Peña-Cabriales, J. D. Etchevers-Barra, D. J. Palma-López y R. M. Soto-Hernández. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Sánchez H., R., D. J. Palma L., J. J. Obrador O. y U. López N. 2003. Efecto de los rastrojos sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo vertisol y rendimientos de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en Tabasco, México. *Interciencia* 28: 404-407.
- SAS Institute. 1996. SAS/QC Software. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Segura L., G. 1971. Acción de nutrientes en caña de azúcar en suelos de la serie rodeo. *Agron. Trop.* 21: 449-464.
- Steel, R. G. y J. H. Torrie. 1992. *Bioestadística. Principios y procedimientos.* 2nd ed. Graf América. México, D.F.
- Zamudio-Sánchez, F. J. y A. A. Alvarado-Segura. 1996. *Análisis de diseños experimentales con igual número de submuestras.* Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.