

USO DE LA MATRIZ EXPERIMENTAL PLAN PUEBLA EN LA DETERMINACION DE DOECL Y DOECI EN EXPERIMENTOS AGRICOLAS

Marino Barrientos G.¹

INTRODUCCION

Frecuentemente el investigador agrícola se enfrenta a la necesidad de realizar experimentos factoriales en los cuales se consideran únicamente algunos del total de tratamientos resultantes, (llamados factoriales fraccionados) como una de las formas para evitar la pérdida de precisión al establecer un número muy elevado de tratamientos en una sola repetición. En este momento necesita encontrar la respuesta a la

1 Ingeniero Agrónomo, Profesor Adjunto del Centro de Estadística y Cálculo.

siguiente pregunta: ¿Cuántos y cuáles, del total de tratamientos, serán considerados en el experimento?

La respuesta es fácil de encontrar si hace uso de las denominadas **MATRICES EXPERIMENTALES**, que en otras palabras no son más que el diseño de los tratamientos que se probarán en el experimento. Del total de matrices experimentales existentes, un grupo particularmente útil lo constituyen las matrices **PLAN PUEBLA**, debido a las siguientes características:

- i) Consideran el conocimiento agronómico del investigador acerca de la respuesta de un cultivo a determinados factores limitativos (generalmente va de SW a NE al observarla en un sistema coordenado).
- ii) Se evita la dependencia del cálculo electrónico en la realización de los análisis estadístico-económicos de los resultados, ya que permiten su ejecución en forma gráfica, con esto se obtiene además:
 - Recomendaciones más prácticas y sencillas.
 - Mayor tiempo para la planificación de programas de asistencia técnica o la continuidad del proceso de investigación, porque los resultados son obtenidos más rápidamente en el análisis gráfico.
- iii) Los resultados que se obtienen son analizados, no sólo estadística sino también económicamente, lo cual es de vital importancia ya que toda actividad humana se da fundamentalmente sobre la base económica. Y es más, considera tanto el capital sin restricciones (dosis óptima económica de capital ilimitado = **DOECL**) como el capital restringido (dosis óptima de capital limitado = **DOECL**) que es el caso más frecuente entre el campesinado guatemalteco.

El conjunto de matrices Plan Puebla se divide, de acuerdo al número de niveles (y su codificación) que cada una considera para cada factor, en:

a) **Plan Puebla I:**

que considera 4 niveles para cada factor cuya codificación es -1.0 , -0.33 , $+0.33$ y $+1.0$ en el espacio de exploración completo del mismo.

b) **Plan Puebla II:**

que utiliza 5 niveles para cada factor, codificados en -0.9 , -0.3 , 0 , $+0.3$ y $+0.9$ respectivamente.

c) **Plan Puebla III:**

que también utiliza 5 niveles para cada factor a saber: -0.9 , -0.4 , 0 , $+0.4$ y $+0.9$.

Habría que determinar de antemano cuales serán los límites del espacio de exploración para cada factor involucrado; he aquí un problema difícil de resolver, ya que no existen reglas definidas para el mismo, únicamente deben ser seleccionados de tal manera que el óptimo de cada factor esté situado en dicho espacio. Como una ayuda, se dice que el investigador seleccionará como límite superior la dosis mínima que a su juicio suprima o casi suprima su deficiencia al encontrarse los demás factores en su nivel óptimo y como límite inferior, la mínima dosis que tenga interés práctico (que no necesariamente tiene que ser cero).

El número de tratamientos en el experimento, queda determina-

do por la expresión $2^k + 2k$ para P.P. I y $2^k + 2k + 1$ para P.P. II y P.P. III; donde k es el número de factores en estudio. En P.P. I, con el 2o. y 3er. nivel de cada factor se obtiene el factorial completo 2^k y con el 1o. y 4o. las $2k$ prolongaciones en el sentido SW y NE del espacio de exploración, respectivamente. En el P.P. II y III, con el 2o. y 4o. nivel para cada factor se obtiene el factorial completo 2^k , con el 1o. y 5o. las $2k$ prolongaciones y con el 3er. nivel el tratamiento central del espacio de exploración.

Estos tratamientos deben ser sometidos a evaluación mediante el diseño experimental que resulte más apropiado, en función de las características del mismo material experimental (principalmente el suelo); completamente al azar y bloques al azar generalmente.

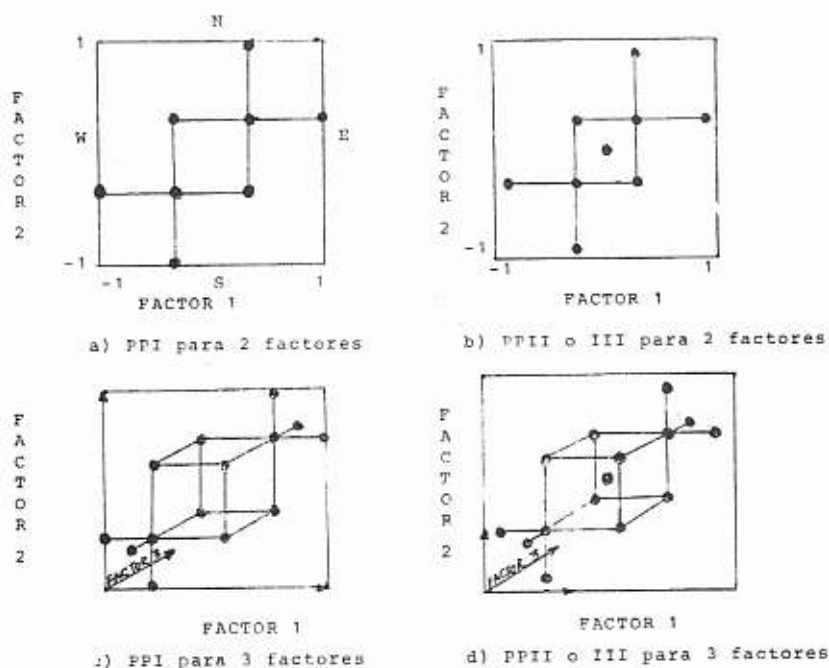


Figura 1
DISTRIBUCION DE LOS TRATAMIENTOS
EN EL ESPACIO DE EXPLORACION

En los casos a y b, el cuadrado central es el factorial completo 2^2 , las prolongaciones los $2(2)$ restantes, y bien al centro, el tratamiento restante. En las figuras c y d, el cubo representa los 2^3 tratamientos del factorial completo, elaborado con el 2o. y 3o. y 2o. y 4o. niveles respectivamente; las prolongaciones los $2(3)$ restantes, con el 1o. y 5o. niveles y en d, el tratamiento central con el 3er. nivel.

Se da a continuación un ejemplo de la determinación de los 8 y 14 tratamientos para una matriz PP I con 2 y 3 tratamientos respectivamente.

Caso 1	Factor	(-1)	(+1)
		Nivel Mínimo	Nivel Máximo
	Nitrógeno	20 Kg/Ha	80 Kg/Ha
	Fósforo	0	60

Matriz	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
N:	-1.0	-0.33	+0.33	+1.0
	----- ----- ----- -----			
	20	40	60	80
P:	-1.0	-0.33	+0.33	+1
	----- ----- ----- -----			
	0	20	40	60

Tratamientos resultantes:

No. orden	Valores codificados	Valores Reales (Kg/Ha)		
		N	P	
1	-0.33 ; -0.33	40	20	} Factorial completo 2^k (con el 2o. y 3er. niveles)
2	-0.33 ; +0.33	40	40	
3	+0.33 ; -0.33	60	20	
4	+0.33 ; +0.33	60	40	
5	-0.33 ; -1.00	40	0	} 2^k prolongaciones (con el 1o. y 4o. niveles)
6	-1.00 ; -0.33	20	20	
7	+1.00 ; +0.33	80	40	
8	+0.33 ; +1.00	60	60	

Caso 2

Tratamientos resultantes bajo la matriz experimental P.P. I para tres factores: N: 20-80 Kg/Ha; P: 0-60 Kg/Ha y K: 0-40 Kg/Ha.

N:	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 0 10px;">Nivel 1</td> <td style="padding: 0 10px;">Nivel 2</td> <td style="padding: 0 10px;">Nivel 3</td> <td style="padding: 0 10px;">Nivel 4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">-1.0</td> <td style="text-align: center;">-0.33</td> <td style="text-align: center;">+0.33</td> <td style="text-align: center;">+1.0</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">60</td> <td style="text-align: center;">80</td> </tr> </table>	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	-1.0	-0.33	+0.33	+1.0					20	40	60	80
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4														
-1.0	-0.33	+0.33	+1.0														
20	40	60	80														
P:	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 0 10px;">-1.0</td> <td style="padding: 0 10px;">-0.33</td> <td style="padding: 0 10px;">+0.33</td> <td style="padding: 0 10px;">+1.0</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">20</td> <td style="text-align: center;">40</td> <td style="text-align: center;">60</td> </tr> </table>	-1.0	-0.33	+0.33	+1.0					0	20	40	60				
-1.0	-0.33	+0.33	+1.0														
0	20	40	60														
K:	<table style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 0 10px;">-1.0</td> <td style="padding: 0 10px;">-0.33</td> <td style="padding: 0 10px;">+0.33</td> <td style="padding: 0 10px;">+1.0</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;"> </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0</td> <td style="text-align: center;">13</td> <td style="text-align: center;">27</td> <td style="text-align: center;">40</td> </tr> </table>	-1.0	-0.33	+0.33	+1.0					0	13	27	40				
-1.0	-0.33	+0.33	+1.0														
0	13	27	40														

TRATAMIENTOS

No. orden	Valores codificados	Valores reales (Kg/Ha)		
		N	P	K
1	-0.33 ; -0.33 ; -0.33	40	20	13
2	-0.33 ; -0.33 ; +0.33	40	20	27
3	-0.33 ; +0.33 ; -0.33	40	40	13
4	-0.33 ; +0.33 ; +0.33	40	40	27
5	+0.33 ; -0.33 ; -0.33	60	20	13
6	+0.33 ; -0.33 ; +0.33	60	20	27
7	+0.33 ; +0.33 ; -0.33	60	40	13
8	+0.33 ; +0.33 ; +0.33	60	40	27
9	-1.00 ; -0.33 ; -0.33	20	20	13
10	+1.00 ; +0.33 ; +0.33	80	40	27
11	-0.33 ; -1.00 ; -0.33	40	0	13
12	+0.33 ; +1.00 ; +0.33	60	60	27
13	-0.33 ; -0.33 ; -1.00	40	20	0
14	+0.33 ; +0.33 ; +1.00	60	40	40

NOTA: Tómese como patrón los tratamientos codificados y para cualquier factor sustitúyanse en los mismos los valores correspondientes para cada nivel.

Hasta este momento únicamente se ha logrado obtener el diseño de los tratamientos que deberán ser sometidos a prueba en el experimento. Seguidamente debe procederse a la planificación del mismo, es decir a diseñar el experimento, que consistirá en determinar qué diseño se utilizará (generalmente por facilidad de ejecución en bloques al azar), cuantas repeticiones se realizarán, de qué tamaño será la unidad experimental, que variable o variables respuestas serán las que expresan mejor el efecto de los tratamientos, etc. etc. Una vez logrado esto se procede a la ejecución, obteniendo finalmente los resultados esperados, los cuales deben someterse a análisis con el propósito de probar las hipótesis planteadas en el mismo y dar recomendaciones prácticas desde el punto de vista tanto estadístico como económico.

En éste momento donde posiblemente se presente el mayor problema, ocurre algunas veces que no se sabe qué hacer con la información obtenida, sin embargo el objetivo del presente artículo no es agotar el tema sino que dar algunos lineamientos generales para hacer más eficiente el uso de las matrices Plan Puebla, no se detalla el procedimiento de análisis a seguir, no obstante en términos generales es el siguiente*.

1. Hacer el ANDEVA para el diseño experimental empleado considerando todos los tratamientos evaluados. Si no se encuentra significancia se procederá a recomendar la combinación de los niveles mínimos para cada factor. Si se encuentra significancia:
2. Hacer el ANDEVA para el núcleo del espacio de exploración (el factorial completo 2^k) en el cual obtendremos una de las $K + 1$ posibles conclusiones que son:
 - a) No existe respuesta a ningún factor
 - b) Hay respuesta a un factor
 - c) Hay respuesta a dos factores y así sucesivamente hasta llegar al caso de que exista respuesta a los K factores involucrados.

Los factores que resulten no significativos en esta etapa deberán ser sometidos a una prueba para determinar si siguen siendo no

* Para más información remitirse al artículo original del mismo autor, o a la bibliografía citada en éste escrito.

significativos en todo el espacio de exploración, en caso de resultar **negativa** deberá ignorarse la primera conclusión y tomar en cuenta también estos factores en la siguiente fase del análisis.

La prueba consiste en comparar la diferencia de las medias de los tratamientos (d) contra un valor calculado, llamado DMS y declarar **significancia** (prueba negativa) si $d \geq DMS$.

$$DMS = t(\alpha, GLE) \sqrt{CMe \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)}$$

donde:

DMS = diferencia mínima significativa entre las medias comparadas.

$t(\alpha, GLE)$ = Valor tabular de t para un nivel de significancia asumido y los grados de libertad para el error en el ANDEVA completo.

82

CMe = cuadrado medio del error en el ANDEVA completo.

r_1 y r_2 = número de repeticiones que intervienen en el cálculo de cada una de las medias comparadas.

3. Las dosis óptimas económicas se calculan para todos aquellos factores que resultaron significativos en el paso anterior; para lo cual se tienen dos vías: la primera ajustando un modelo aproximativo mediante la técnica de regresión múltiple y la segunda mediante un análisis gráfico, que es a la que se le da énfasis en éste escrito y es uno de los fuertes argumentos de la Plan Puebla I, ya que es el de mayor utilidad para el investigador local.

Los pasos a seguir son:

- a) Dibujar las gráficas de respuesta para cada factor significativo, en un sistema de coordenadas rectangulares, tomando como base los promedios de rendimiento para cada nivel del mismo.
- b) Se calcula el ingreso neto, (IN) para cada una de las curvas así obtenidas, de acuerdo a la siguiente relación:

$$CF + IN = y - CV$$

en donde: CF = costos fijos (todos los gastos de cultivo menos los factores en evaluación)

IN = Ingreso neto

Y = precio unitario del producto

Y = rendimiento obtenido

C.V. = costos variables y $C.V. = \sum_{i=1}^k f_i F_i$

K = número de factores

f_i = costo real unitario del factor i

F_i = cantidad total utilizada del factor i

Por ser los costos fijos una constante, para facilidad de cálculo se toma $IN = yY - C.V.$

- c) En la curva de mayor IN se estima la DOECI, trasladando sobre ella la pendiente de la relación de precios unitarios de factor/producto, hasta encontrar el punto en que son tangentes que al proyectarlo sobre el eje del factor en cuestión (X) y esa será la DOECI.
- d) Los pasos b y c se repiten en cada una de las gráficas del inciso a.

El tratamiento óptimo a recomendar es el que resulta de la unión de las DOECI encontradas para cada factor significativo y los niveles mínimos para los no significativos.

Para lo que constituye lo más importante, la determinación de la DOECL para los factores significativos se sigue el siguiente orden:

- a) Calcular el incremento de rendimiento, ΔY , dado por la diferencia entre el rendimiento promedio de cada tratamiento y el rendimiento promedio del testigo.

- b) Calcular el incremento de ingreso neto, (ΔIN) según la expresión: $\Delta IN = y\Delta Y - CV$
- c) Obtener la tasa de retorno de capital variable, (TRCV), como resultado de la razón entre ΔIN y CV
- d) Finalmente las DOECL serán aquellas que correspondan al tratamiento que dé mayor TRCV.

RECOMENDACIONES SOBRE SU USO:

La matriz PLAN PUEBLA I es de especial utilidad cuando los resultados se someterán únicamente al análisis gráfico, y cuando se necesite o desee evaluar el nivel o de un factor. (codificado).

La PLAN PUEBLA II cuando además del análisis gráfico se tenga interés en el matemático y finalmente:

La PLAN PUEBLA III cuando el análisis sea matemático ya que el gráfico resulta difícil.

No deberán usarse éstas matrices cuando se tenga especial interés en estimar con precisión los coeficientes de regresión de algún modelo aproximativo dado y no pueden emplearse cuando se considere algún factor cualitativo.

BIBLIOGRAFIA

1. Estrada L., L.A. Metodología de investigación utilizada para la obtención y análisis de resultados sobre prácticas mejoradas para la producción de cultivos. Guatemala, ICTA, 1978.
2. Franco D., J. E. La matriz experimental Plan Puebla. Seminario del C.E.C. Chapingo, México, Colegio de Post-Graduados, 1977.
3. Hernández S., R.; Turrent F., A. y Méndez, I. El modelo aproximativo y la matriz experimental como factores que influyen sobre el sesgo al aproximar superficies de respuesta a dos factores. 2a. ed. Chapingo, México, Colegio de Post-Graduados, 1978.
4. Ortiz D., H. R. Aplicación práctica del enfoque de agrosistemas para estratificar diferentes condiciones de producción de cultivos con el objeto de diseñar recomendaciones para la aplicación de fertilizantes químicos y estiércoles al maíz de temporal, en Totonicapán, Guatemala. Tesis Mag. Sci. Chapingo, México, Colegio de Post-Graduados, 1977.
5. Turrent F., A. El método gráfico estadístico para la interpretación económica de experimentos conducidos con la matriz Plan Puebla I. Chapingo, México, Colegio de Post-Graduados, 1978.
6. -----, y Laird, R. J. La matriz experimental Plan Puebla para ensayos sobre prácticas de producción de cultivos. 3a. ed. Chapingo, México, Colegio de Post-Graduados, 1978.