

LABORATORIO 9 - LABORATORIO INFORMÁTICO

Caso 1. Se quiere determinar la mejor forma de elaborar hormigón compactado con una pavimentadora. La variable de respuesta es el porcentaje de compactación, medido con un densímetro nuclear. Tras una tormenta de ideas con expertos, se ha realizado un diseño de experimentos con 5 factores: el porcentaje de aditivo, la pavimentadora (A antigua, B moderna), el operador de la pavimentadora (A con poca experiencia, y B con mucha), el tipo de mezcla de hormigón y la temperatura del hormigón. Se ha tenido que realizar un diseño fraccionado puesto que el presupuesto limita el número de experimentos a un máximo de 12. Se pide que se analicen los resultados, que fueron los siguientes:

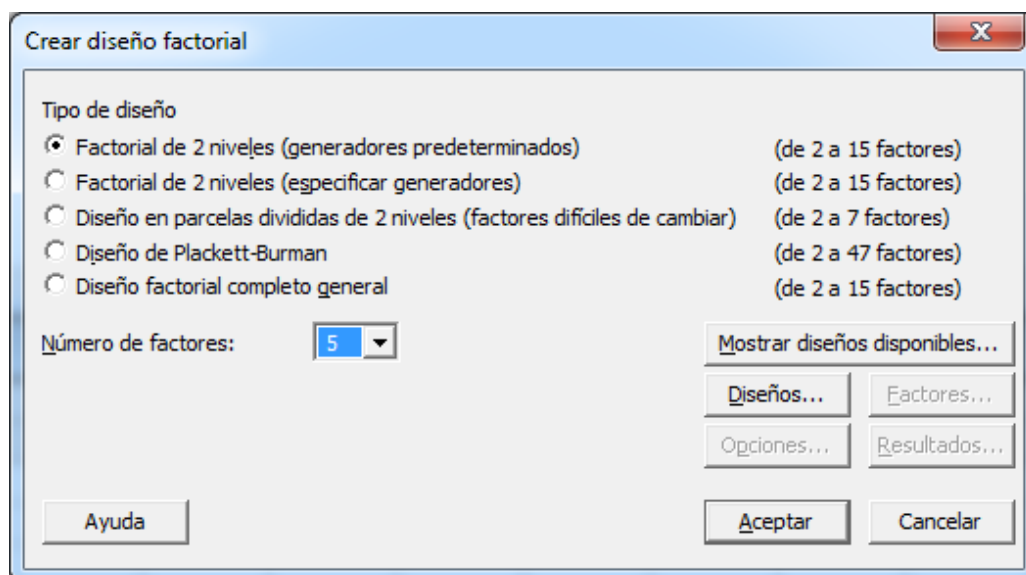
Mezcla	% Aditivo	Pavimentadora	Operador	Temperatura	% Compactación
Bajo cemento	5%	A	B	30º	96,34
Medio cemento	5%	A	A	25º	94,23
Bajo cemento	10%	A	A	30º	96,71
Medio cemento	10%	A	B	25º	94,98
Bajo cemento	5%	B	B	25º	96,38
Medio cemento	5%	B	A	30º	94,28
Bajo cemento	10%	B	A	25º	96,84
Medio cemento	10%	B	B	30º	95,19

Los datos de este caso provienen de la siguiente publicación:

Arias, C.; Adanaqué, I.; Buestán, M. Optimización del proceso de elaboración de hormigón compactado con pavimentadora. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4754>

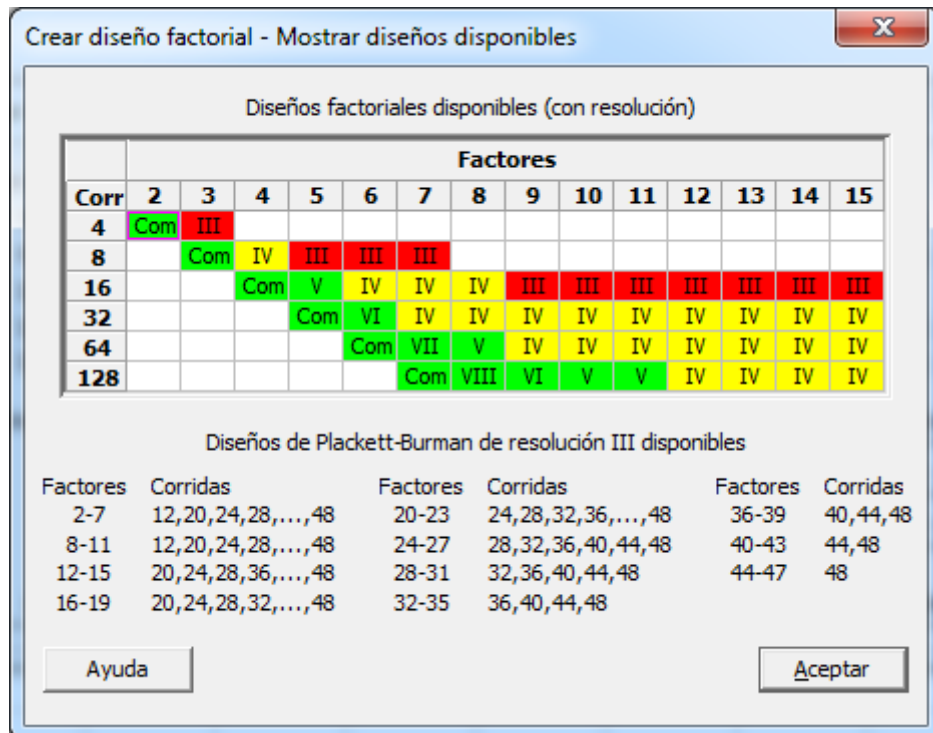
Vamos a resolver el siguiente diseño con MINITAB. En primer lugar, crearemos la matriz del diseño:

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial



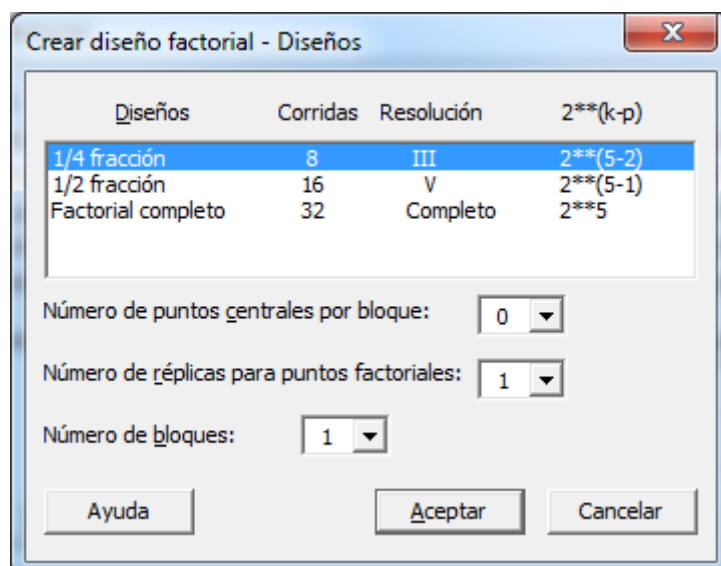
Elegimos el diseño factorial de 2 niveles (generadores predeterminados) y 5 como número de factores.

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial > Mostrar diseños disponibles



Comprobamos que para 5 factores y con una limitación de 12 ensayos, tendremos que utilizar un diseño factorial de resolución III.

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial > Diseños



Hemos elegido el diseño 1/4 fracción, que permite 8 corridas, con una resolución III. El número de réplicas es 1. Si ponemos puntos centrales por bloque, se podría determinar si el modelo

necesita términos cuadráticos, pero no es el caso. Tampoco se ha considerado usar bloques (1 por defecto).

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial > Factores

Crear diseño factorial - Factores

Factor	Nombre	Tipo	Bajo	Alto
A	Mezcla	Texto	Bajo cement	Medio cemen
B	% Aditivo	N Numérico	5	10
C	Pavimentado	Texto	A	B
D	Operador	Texto	A	B
E	Temperatura	N Numérico	25	30

Ayuda Aceptar Cancelar

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial > Opciones

Crear diseños factoriales - Opciones

Plegar diseño

- ☒ No plegar
- ☐ Plegar en todos los factores
- ☐ Plegar sólo en el factor:

Fracción

- ☒ Utilizar fracción principal
- ☐ Utilizar fracción número:

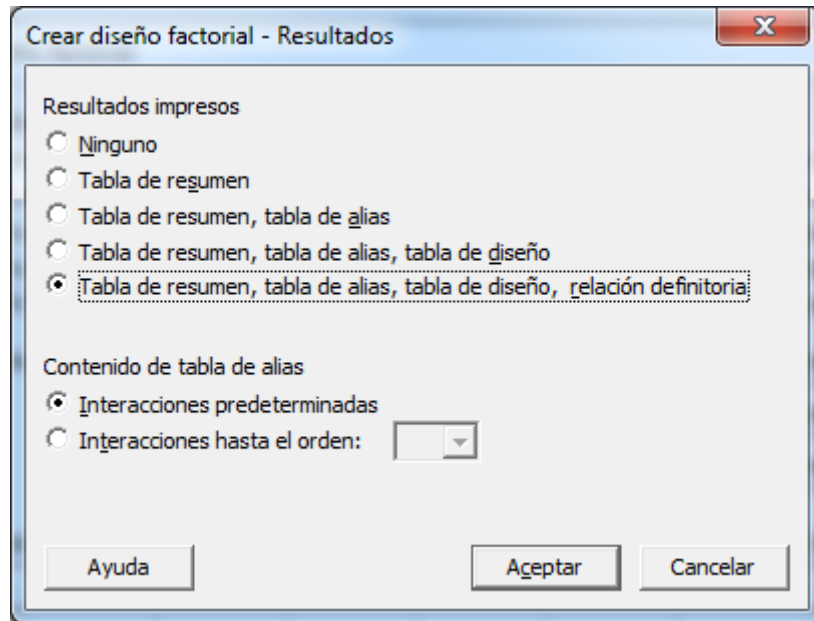
☐ Aleatorizar corridas

Base para el generador de datos aleatorios:

☒ Almacenar diseño en hoja de trabajo

Ayuda Aceptar Cancelar

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial > Resultados



Los resultados que obtenemos de la creación del diseño son los siguientes:

Diseño factorial fraccionado

Factores: 5 Diseño de la base: 5; 8 Resolución: III
Corridas: 8 Réplicas: 1 Fracción: 1/4
Bloques: 1 Puntos centrales (total): 0

* NOTA * Algunos efectos principales se confunden con interacciones de dos factores.

Generadores del diseño: $D = AB$; $E = AC$

Relación definitoria: $I = ABD = ACE = BCDE$

Estructura de alias

$I + ABD + ACE + BCDE$

$A + BD + CE + ABCDE$

$B + AD + CDE + ABCE$

$C + AE + BDE + ABCD$

$D + AB + BCE + ACDE$

$E + AC + BCD + ABDE$

$BC + DE + ABE + ACD$

$BE + CD + ABC + ADE$

Tabla de diseño

Corrida	A	B	C	D	E
1	-	-	-	+	+
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	+
4	+	+	-	+	-
5	-	-	+	+	-
6	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	+	+

Ahora, colocamos en la columna correspondiente los resultados de la compactación:

Hoja de trabajo 1 ***											
↓	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6	C7-T	C8-T	C9	C10	C11
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Mezcla	% Aditivo	Pavimentadora	Operador	Temperatura	Compactación	
1	1	1	1	1	Bajo cemento	5	A	B	30	96,34	
2	2	2	2	1	Medio cemento	5	A	A	25	94,23	
3	3	3	3	1	Bajo cemento	10	A	A	30	96,71	
4	4	4	4	1	Medio cemento	10	A	B	25	94,98	
5	5	5	5	1	Bajo cemento	5	B	B	25	96,38	
6	6	6	6	1	Medio cemento	5	B	A	30	94,28	
7	7	7	7	1	Bajo cemento	10	B	A	25	96,84	
8	8	8	8	1	Medio cemento	10	B	B	30	95,19	
9											
10											

A partir de este momento, ya estamos en disposición de analizar e interpretar los resultados.

En primer lugar vamos a realizar el test de normalidad de los datos (Kolmogorov-Smirnov).

Estadísticas > Estadística básica > Prueba de normalidad

Prueba de normalidad

Variable:

Líneas percentiles

☒ Ninguno

☐ En los valores de Y:

☐ En los valores de datos:

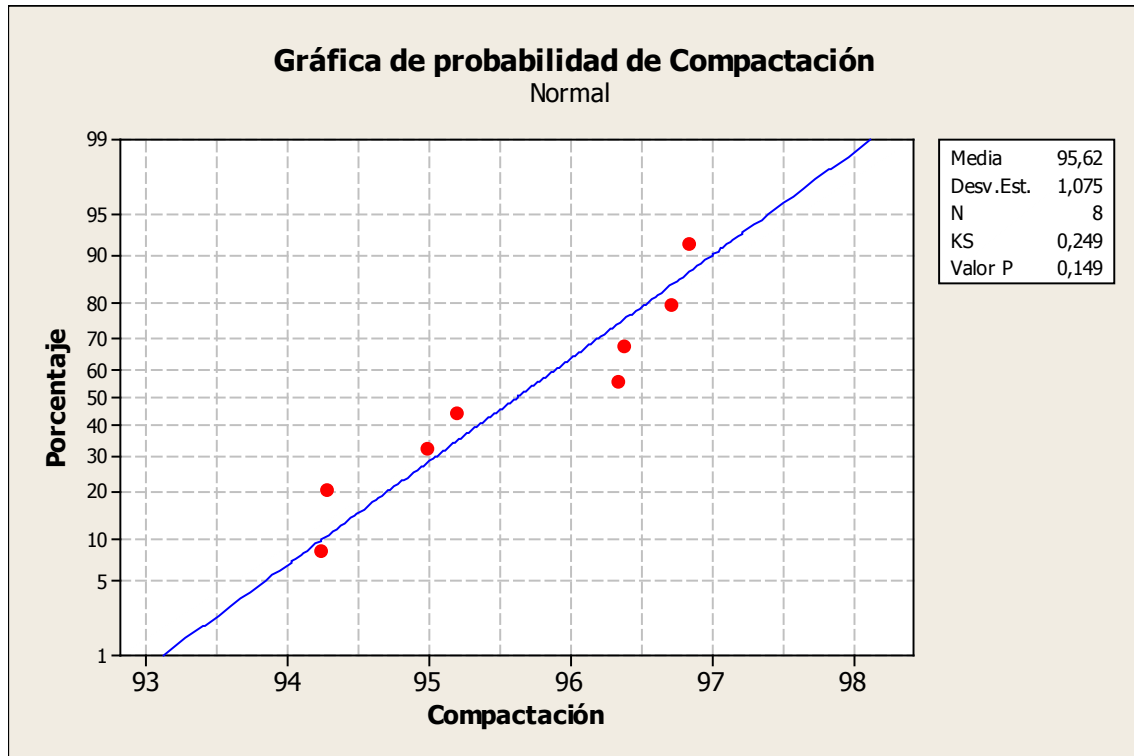
Pruebas de normalidad

☐ Anderson-Darling

☐ Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk)

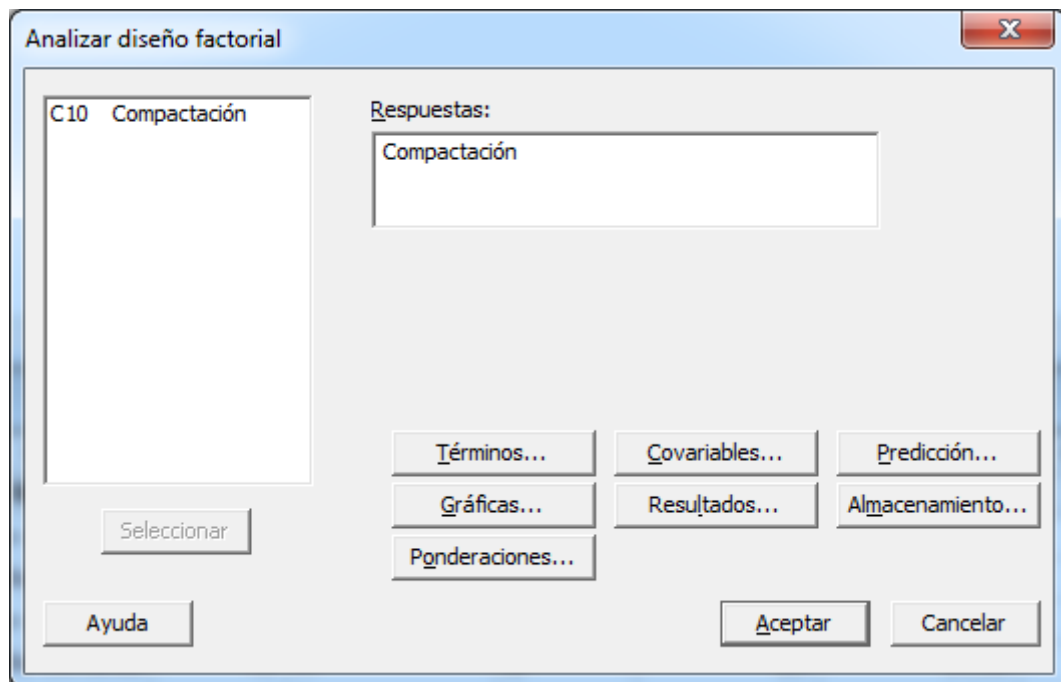
☒ Kolmogorov-Smirnov

Título:

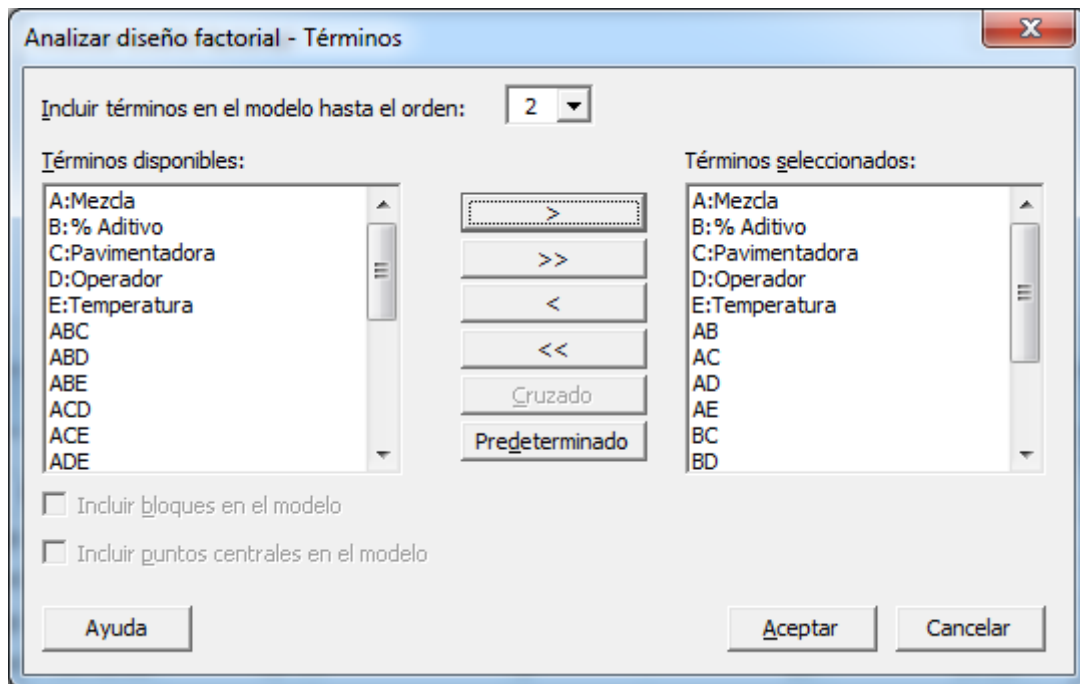


La significación de la prueba, superior a 0,05, impide rechazar la hipótesis nula de normalidad de los datos. Los datos, por tanto, se ajustan razonablemente a una curva normal.

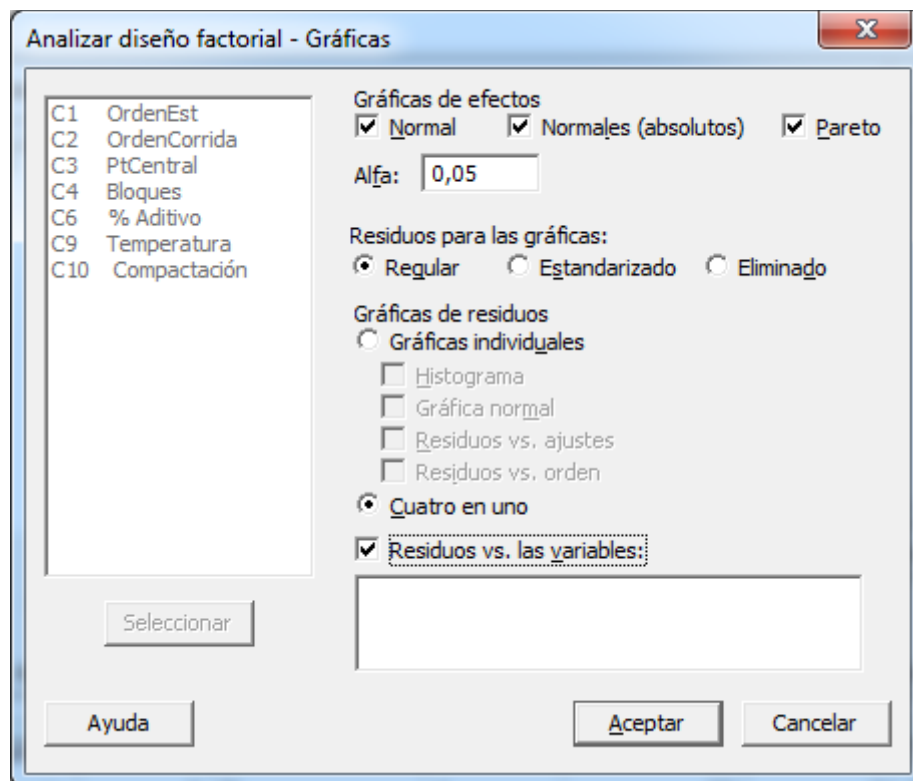
Estadísticas > DOE > Factorial > Analizar diseño factorial



Estadísticas > DOE > Factorial > Analizar diseño factorial > Términos



Estadísticas > DOE > Factorial > Analizar diseño factorial > Gráficas



Los resultados que obtenemos son los siguientes:

Ajuste factorial: Compactación vs. Mezcla; % Aditivo; ...

Efectos y coeficientes estimados para Compactación (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef
Constante		95,6188
Mezcla	-1,8975	-0,9487
% Aditivo	0,6225	0,3112
Pavimentadora	0,1075	0,0537
Operador	0,2075	0,1037
Temperatura	0,0225	0,0112
% Aditivo*Pavimentadora	0,0625	0,0313
% Aditivo*Temperatura	0,0175	0,0087

S = * PRESS = *

Análisis de varianza para Compactación (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Efectos principales	5	8,08626	8,08626	1,61725	*	*
Mezcla	1	7,20101	7,20101	7,20101	*	*
% Aditivo	1	0,77501	0,77501	0,77501	*	*
Pavimentadora	1	0,02311	0,02311	0,02311	*	*
Operador	1	0,08611	0,08611	0,08611	*	*
Temperatura	1	0,00101	0,00101	0,00101	*	*
2° orden (interacciones)	2	0,00843	0,00843	0,00421	*	*
% Aditivo*Pavimentadora	1	0,00781	0,00781	0,00781	*	*
% Aditivo*Temperatura	1	0,00061	0,00061	0,00061	*	*
Error residual	0	*	*	*		
Total	7	8,09469				

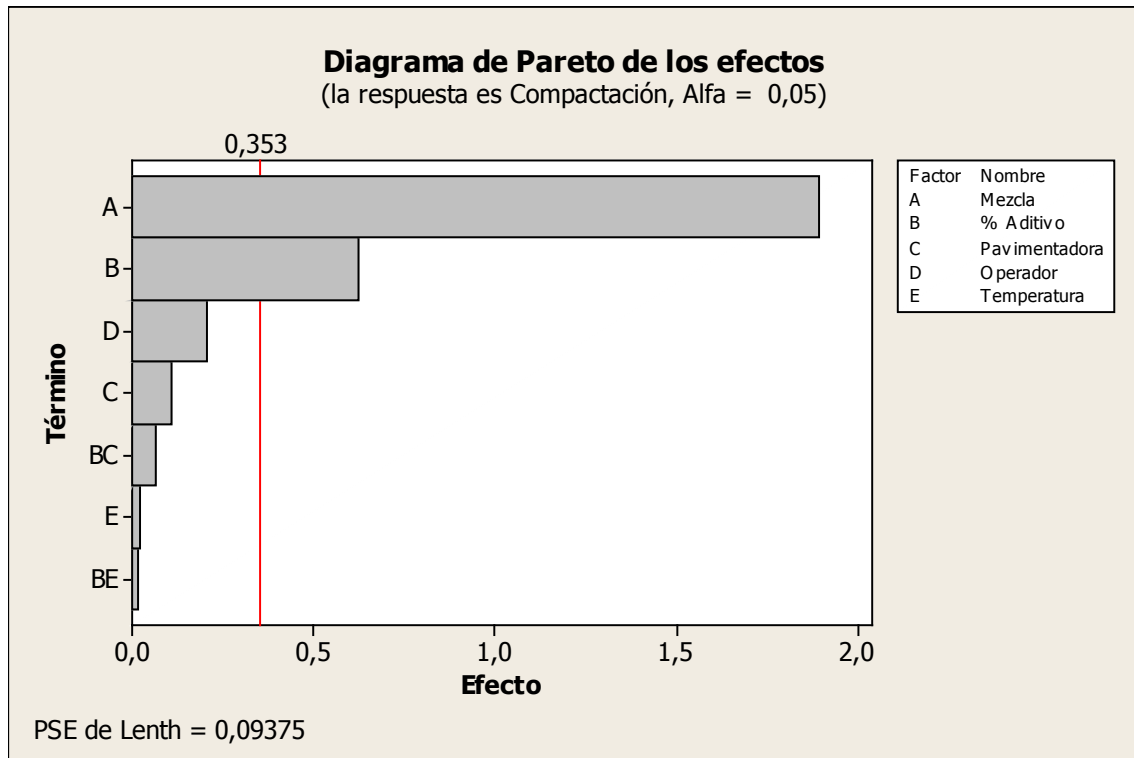
Obs	OrdenEst.	Compactación	Ajuste	EE de ajuste	Residuo	Residuo estándar
1	1	96,3400	96,3400	*	-0,0000	*
2	2	94,2300	94,2300	*	0,0000	*
3	3	96,7100	96,7100	*	-0,0000	*
4	4	94,9800	94,9800	*	-0,0000	*
5	5	96,3800	96,3800	*	0,0000	*
6	6	94,2800	94,2800	*	0,0000	*
7	7	96,8400	96,8400	*	0,0000	*
8	8	95,1900	95,1900	*	0,0000	*

Coefficientes estimados para Compactación utilizando datos en unidades no codificadas

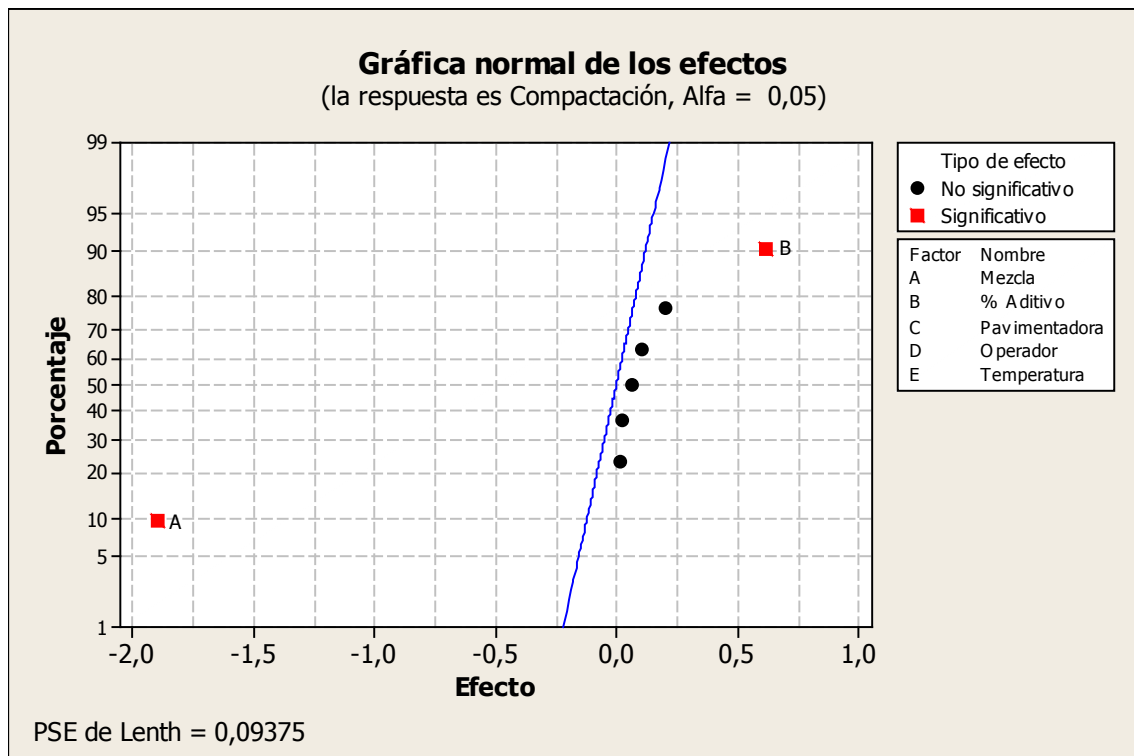
Término	Coef
Constante	94,8500
Mezcla	-0,948750
% Aditivo	0,0860000
Pavimentadora	-0,0400000
Operador	0,103750
Temperatura	-0,00600000
% Aditivo*Pavimentadora	0,0125000
% Aditivo*Temperatura	0,00140000

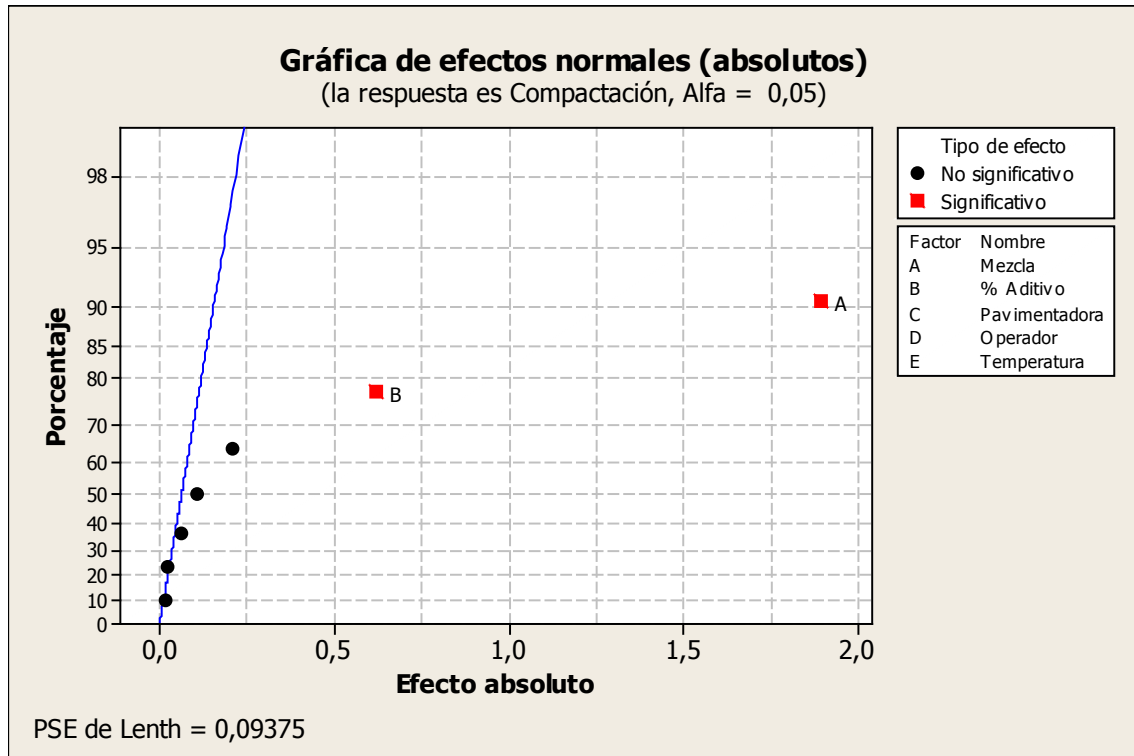
Se comprueba que los efectos de la mezcla (-1,8975) y del porcentaje de aditivo (0,6225), en unidades codificadas, son los más influyentes. Falta comprobar si los efectos son significativos.

El diagrama de Pareto de los efectos muestra que los efectos significativos son el tipo de mezcla y el porcentaje de aditivo.



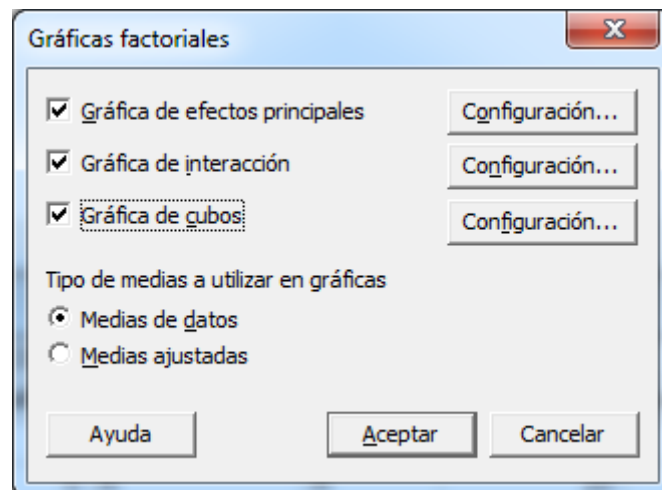
El gráfico de Daniel también permite comprobar la significación de dichos efectos principales.



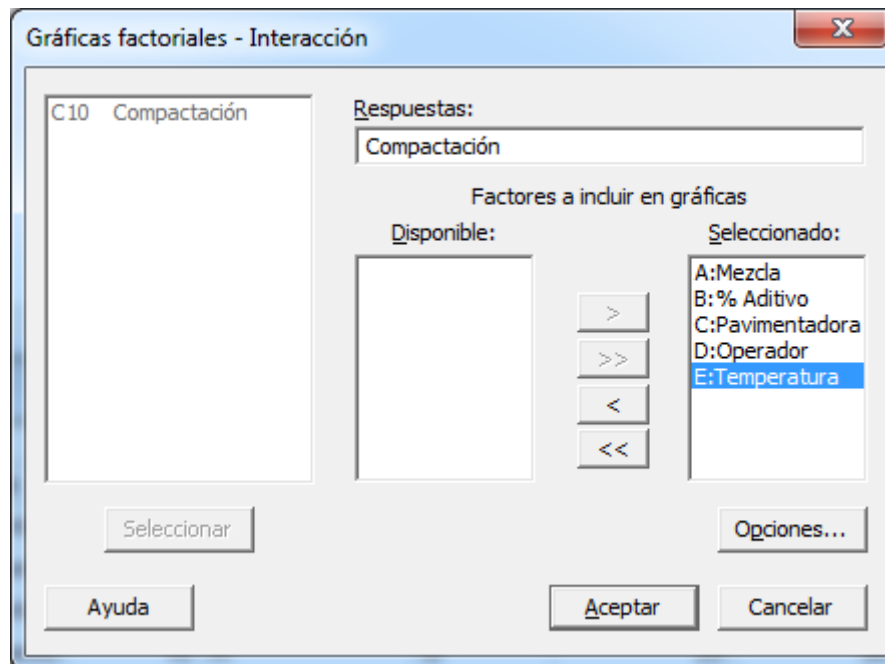
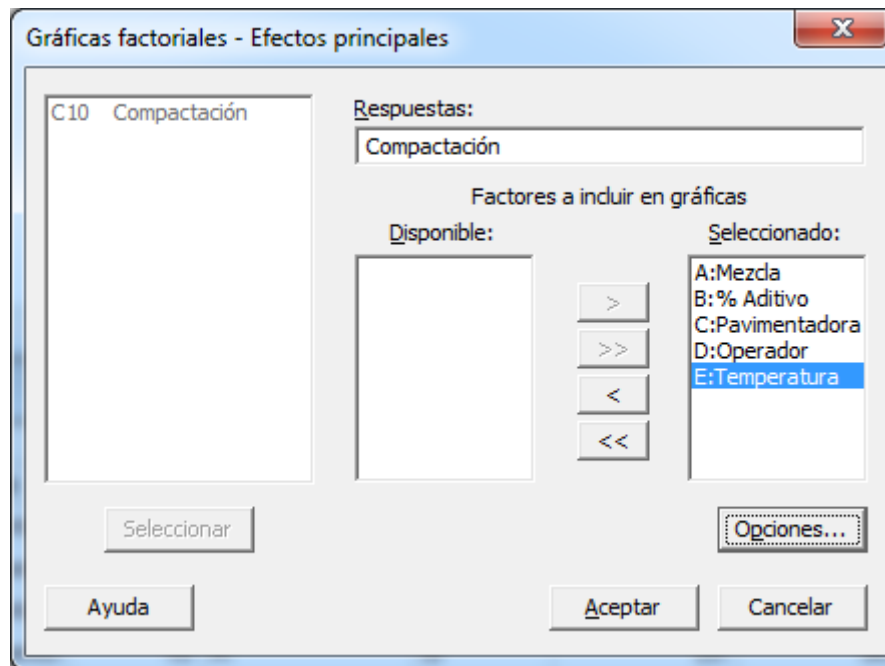


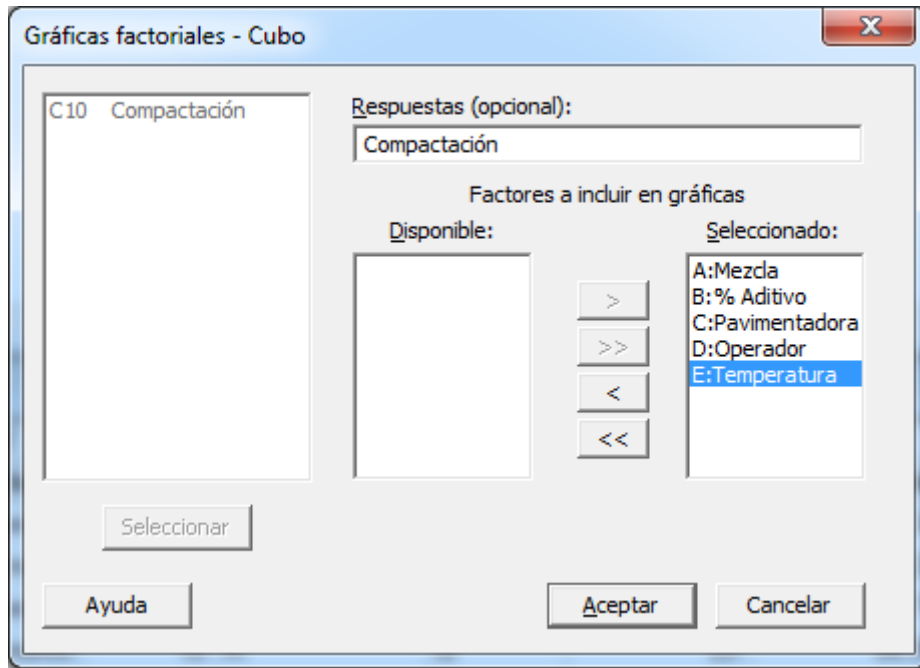
Veamos ahora las gráficas de los efectos principales y las interacciones (que no han resultado significativas).

Estadísticas > DOE > Factorial > Gráficas factoriales

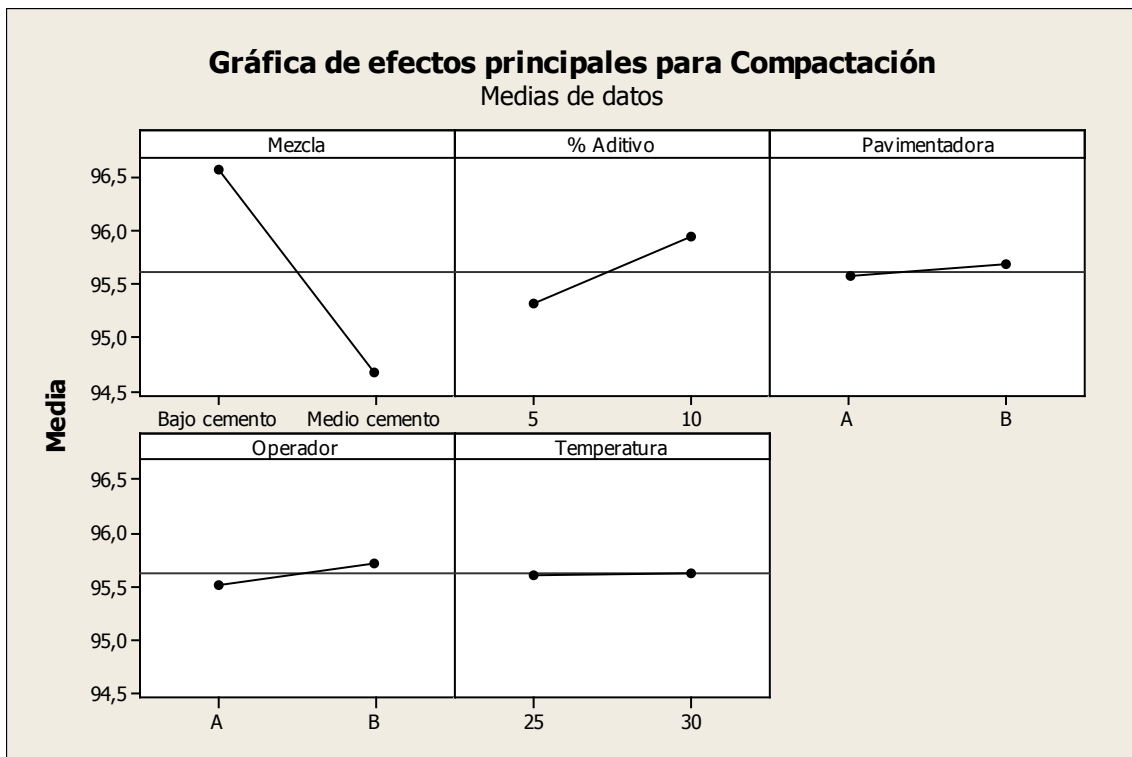


En las gráficas seleccionadas, la configuración es la que sigue:



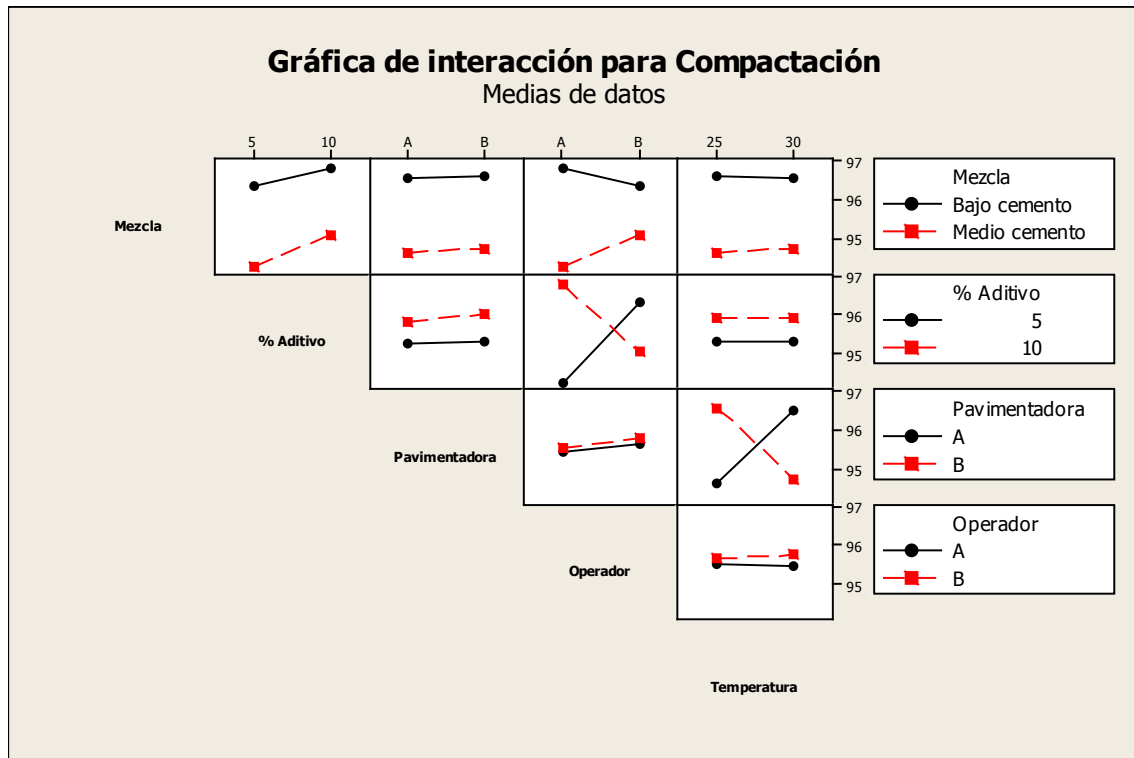


Los gráficos de efectos principales resultantes son los siguientes:

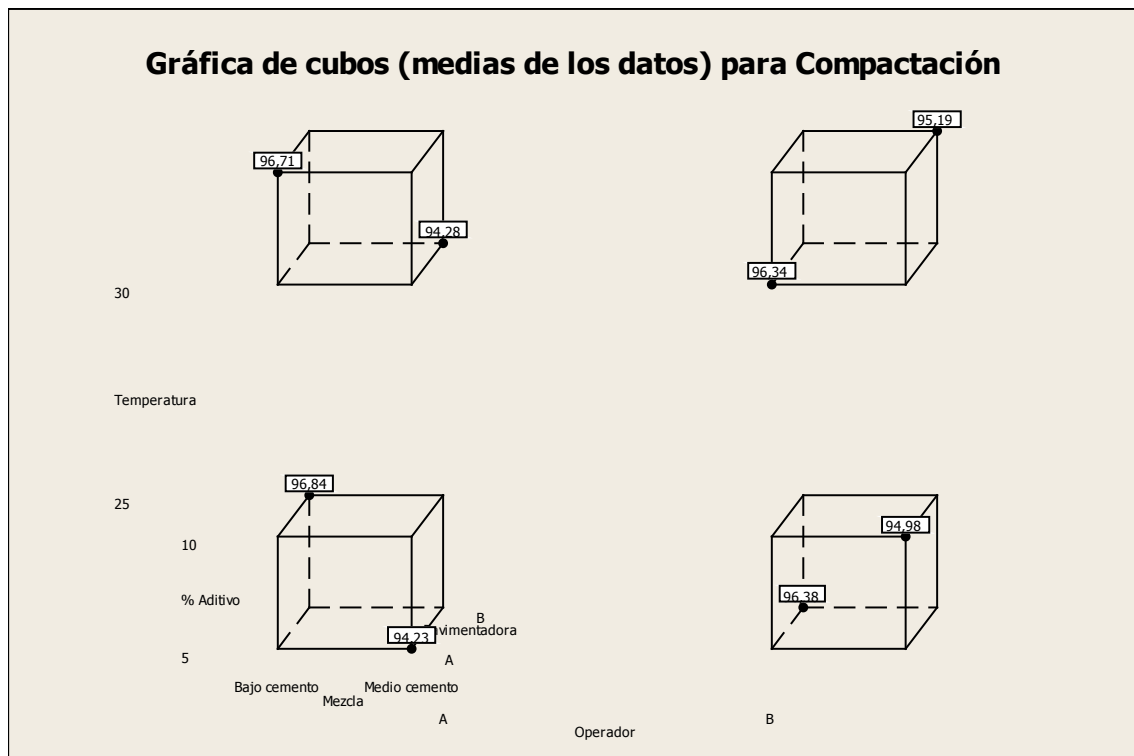


Analizando los efectos principales se puede observar que el porcentaje de compactación del hormigón aumento cuando el tipo de mezcla está a bajo nivel de contenido de cemento (lo cual puede ser muy interesante, por ser más económico). También aumenta con un porcentaje alto (10%) de aditivo, la pavimentadora nueva, el operador experimentado y la temperatura a 30°. Sin embargo, pavimentadora, operador y temperatura son efectos despreciables y significativos desde el punto de vista estadístico.

A continuación podemos ver las gráficas de interacción. A pesar de que pudiera existir dicha interacción, ésta no es significativa desde el punto de vista estadístico.



Asimismo, MINITAB ofrece la gráfica de cubos (medias de los datos).



Podemos ahora ver cómo es la superficie de respuesta. Para ello vamos a realizar lo siguiente:

Como queremos representar la superficie de respuesta en función de los factores principales significativos, vamos a codificar como numérico la mezcla, siendo (-1) el nivel bajo y (1) el nivel alto.

Estadísticas > DOE > Factorial > Crear diseño factorial > Factores

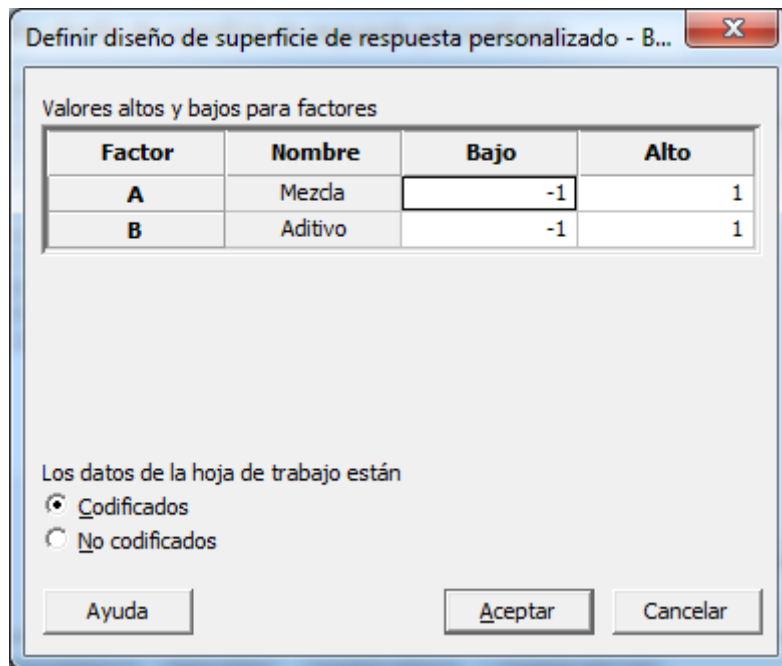
Factor	Nombre	Tipo	Bajo	Alto
A	Mezcla	Numérico	-1	1
B	% Aditivo	Numérico	5	10
C	Pavimentado	Texto	A	B
D	Operador	Texto	A	B
E	Temperatura	Numérico	25	30

Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Definir diseño de superficie de respuesta

Factores:

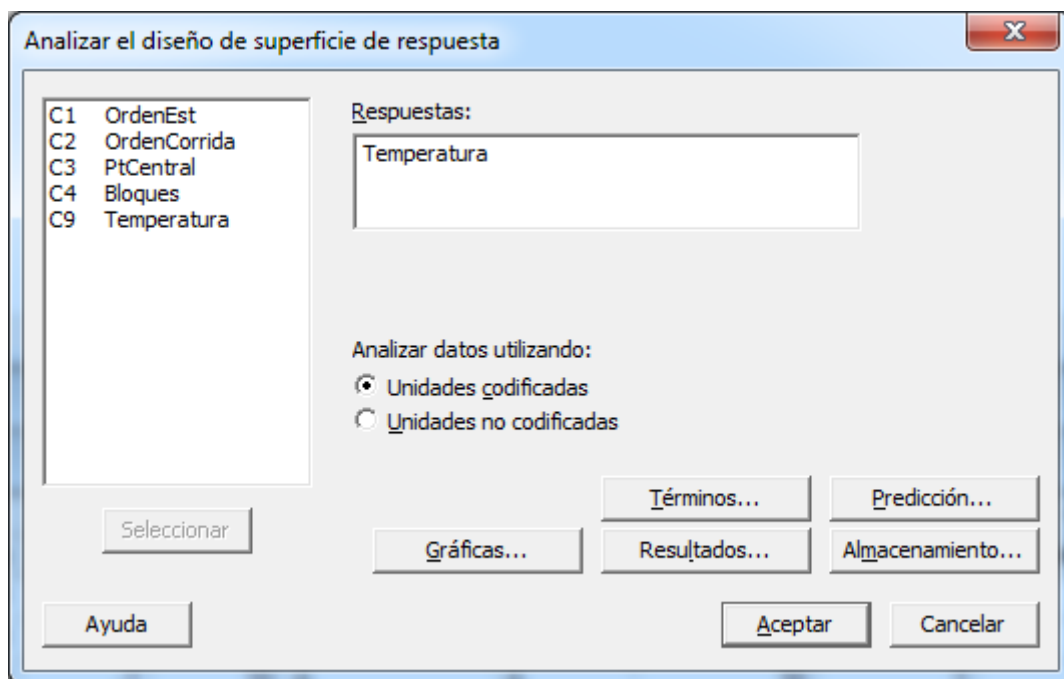
Mezcla % Aditivo

Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Definir diseño de superficie de respuesta > Bajo/Alto

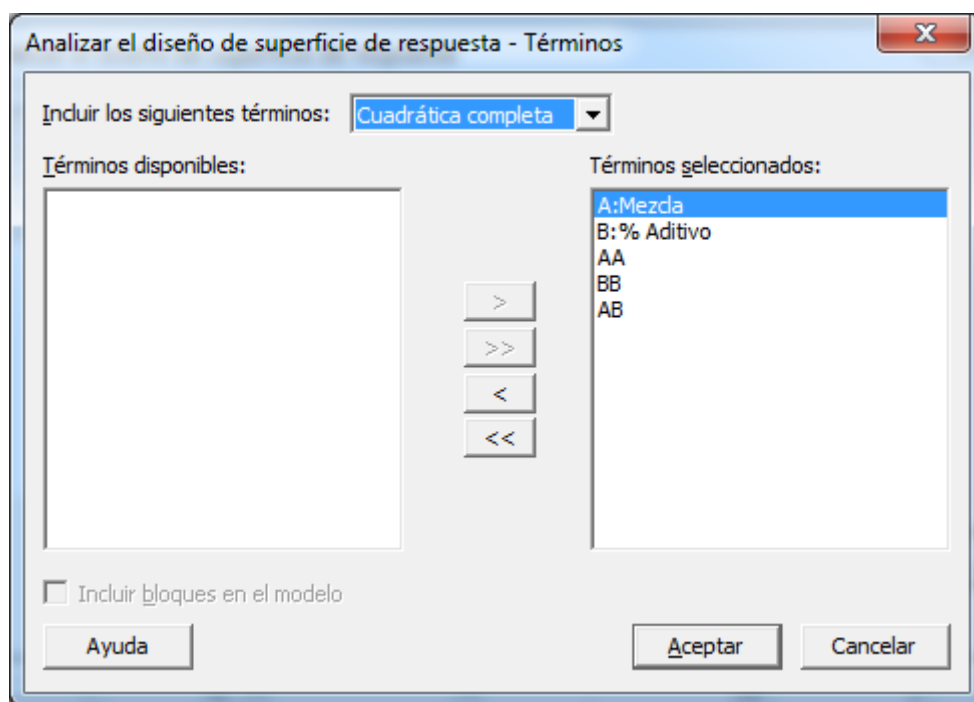


Ahora ya podemos dibujar la superficie de respuesta.

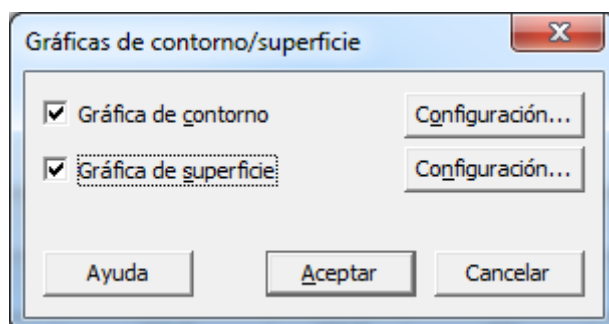
Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Analizar el diseño de superficie de respuesta



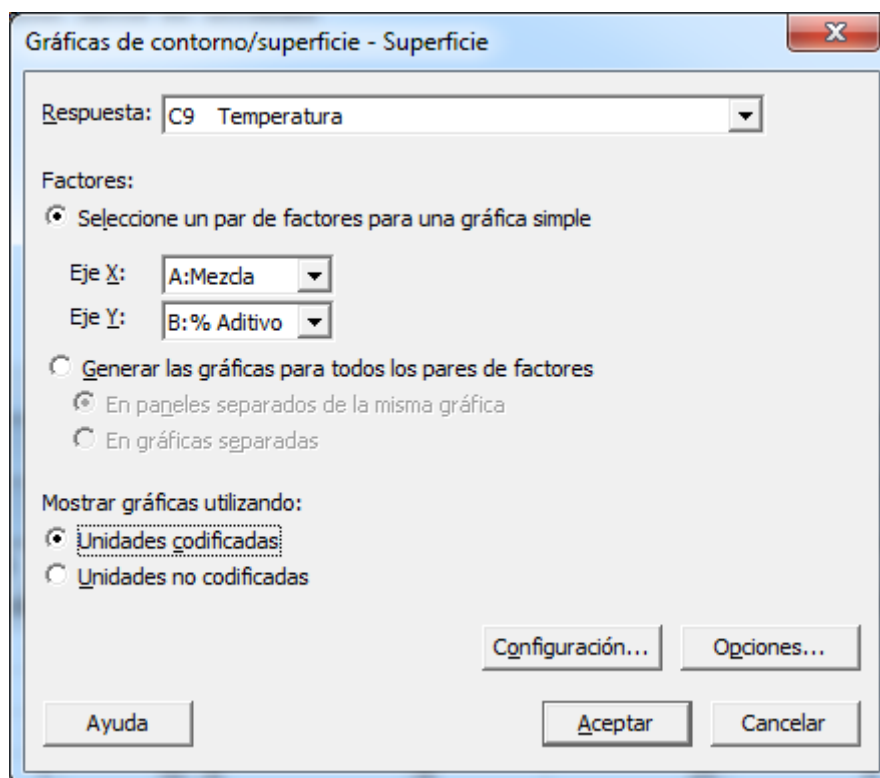
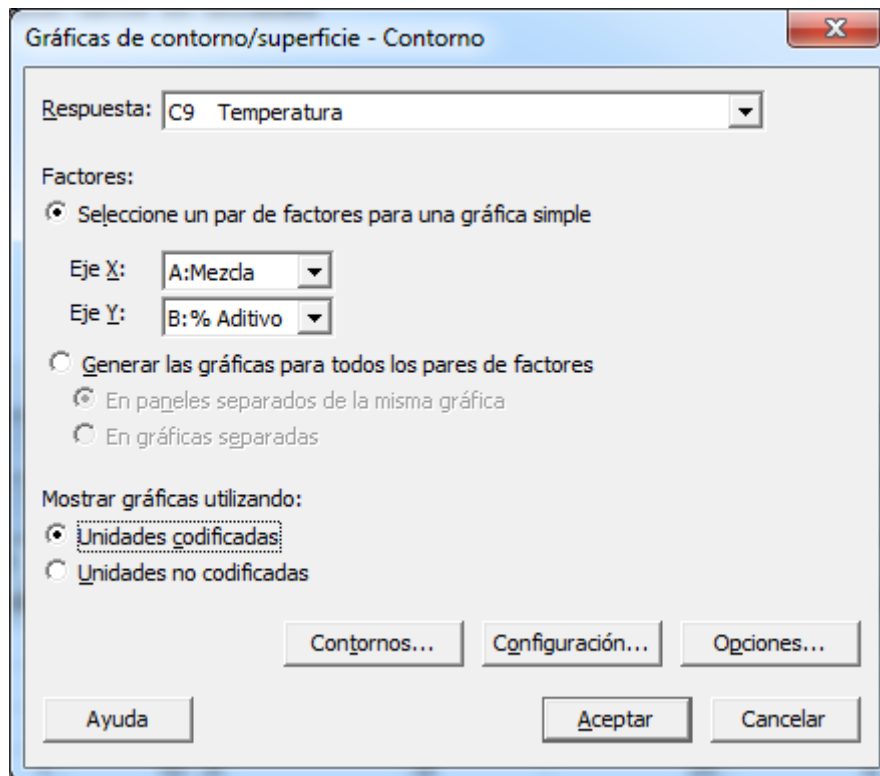
Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Analizar el diseño de superficie de respuesta > Términos



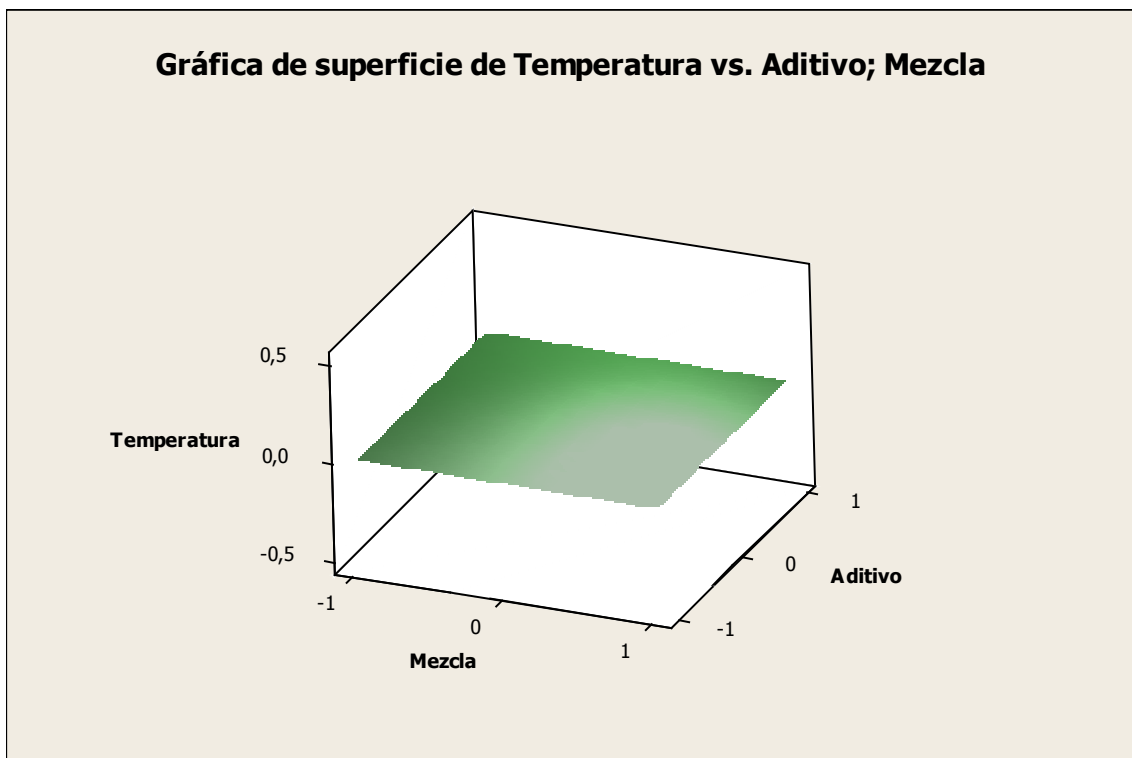
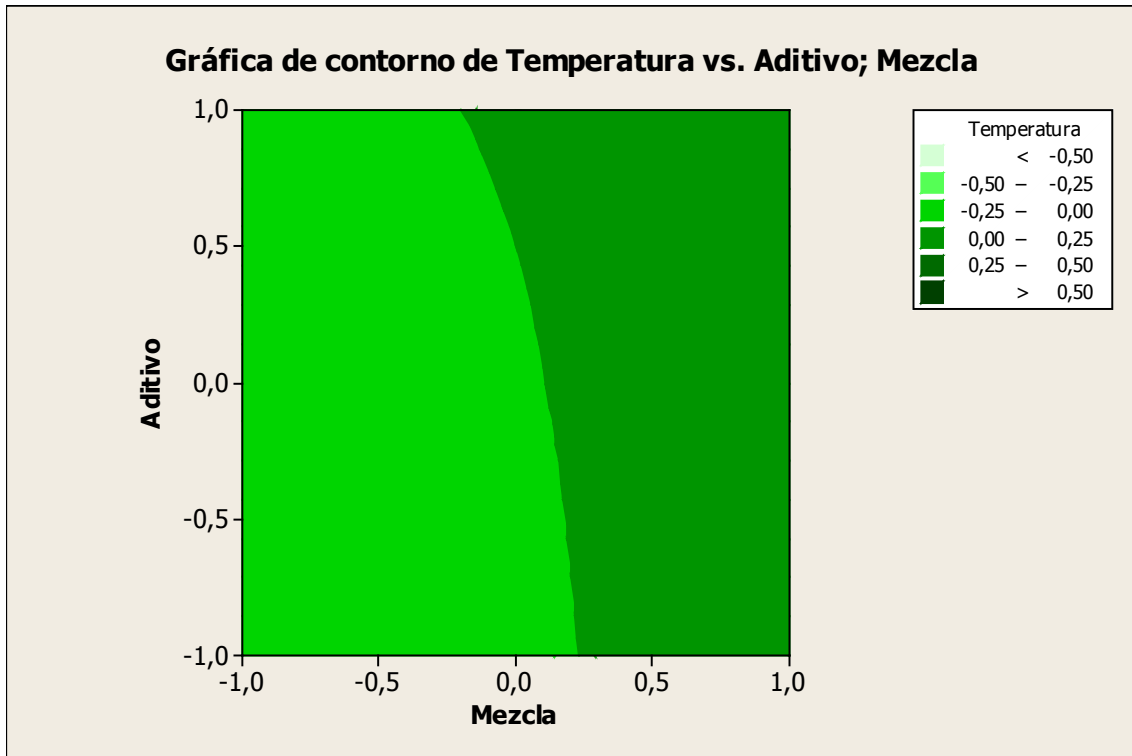
Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Gráficas de contorno/superficie



Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Gráficas de contorno/superficie > Configuración



Los gráficos son los siguientes:

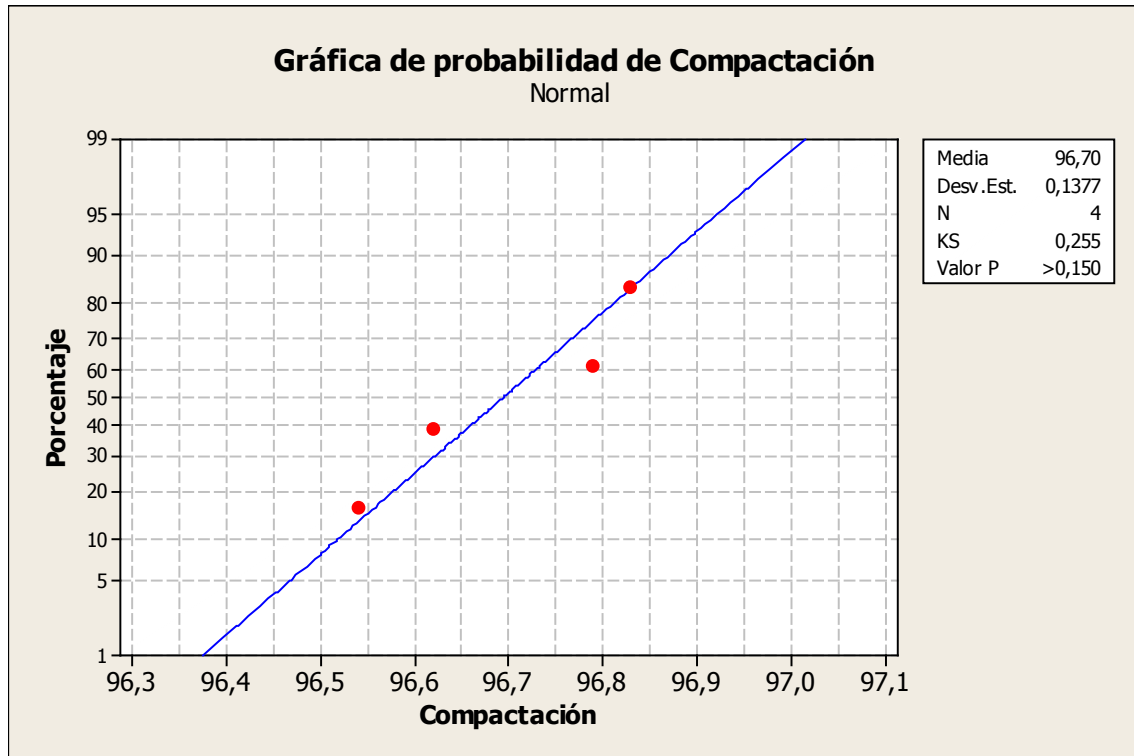


Caso 2. Como hemos realizado 8 experimentos, nos queda presupuesto para 4 más. Lo que vamos a hacer es corroborar lo que hemos visto hasta ahora. Para ello se va a realizar un diseño factorial a dos niveles con dos factores. Se fijará el tipo de mezcla al nivel “Bajo cemento”, el porcentaje de aditivo al 10% y la temperatura de hormigón a 30°. Se experimentará con las pavimentadoras y los operadores.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Mezcla	% Aditivo	Pavimentadora	Operador	Temperatura	% Compactación
Bajo cemento	10%	A	A	30º	96,54
Bajo cemento	10%	A	B	30º	96,83
Bajo cemento	10%	B	A	30º	96,62
Bajo cemento	10%	B	B	30º	96,79

En primer lugar, se comprueba la normalidad de los datos:



En cuanto al análisis del diseño, se obtiene lo siguiente:

Ajuste factorial: Compactación vs. Pavimentadora; Operador

Efectos y coeficientes estimados para Compactación (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef
Constante		96,6950
Pavimentadora	0,0200	0,0100
Operador	0,2300	0,1150
Pavimentadora*Operador	-0,0600	-0,0300

S = * PRESS = *

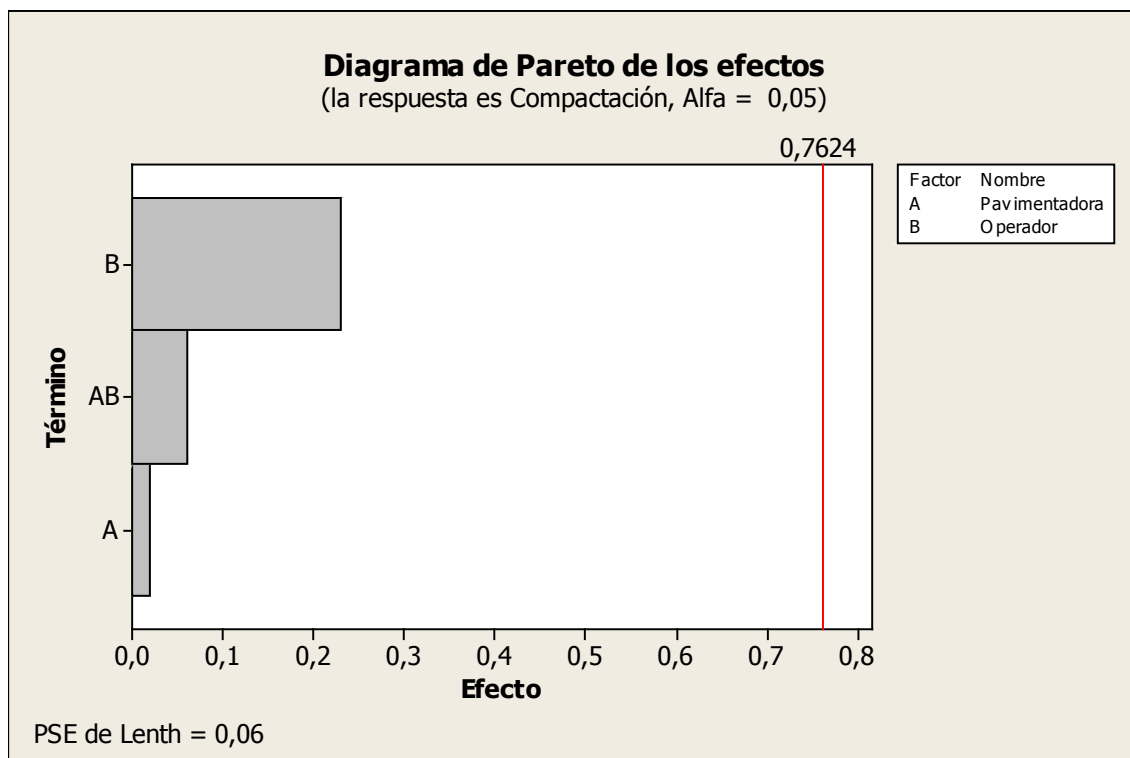
Análisis de varianza para Compactación (unidades codificadas)

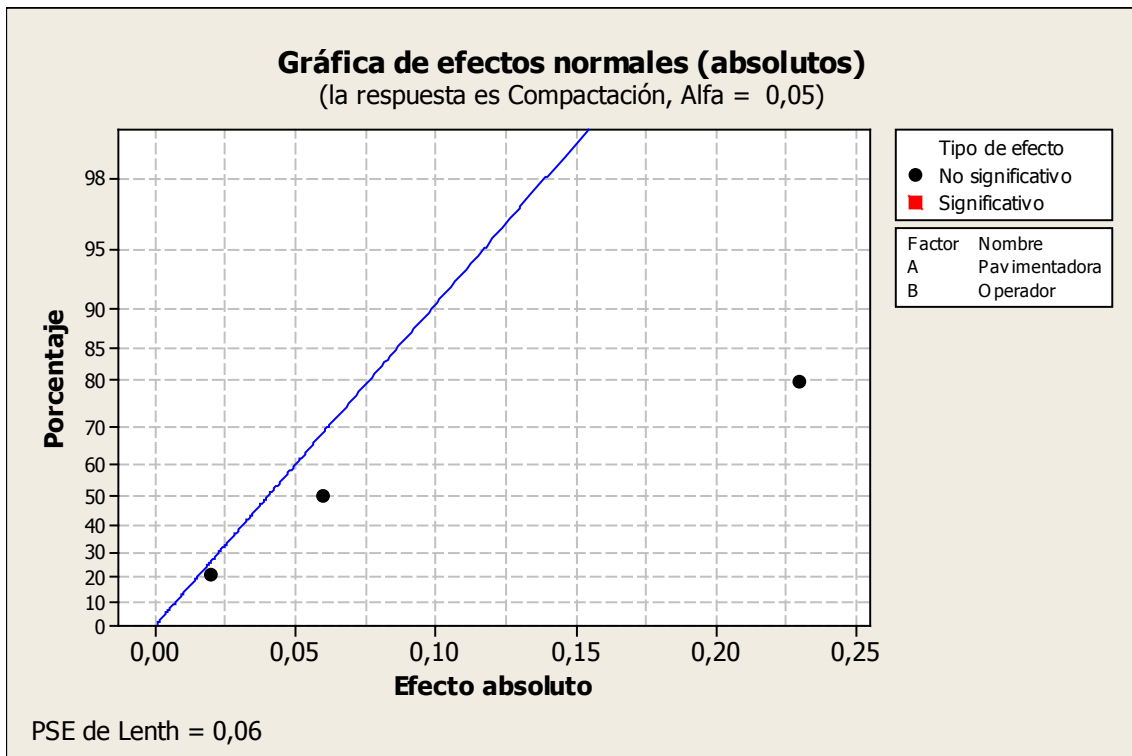
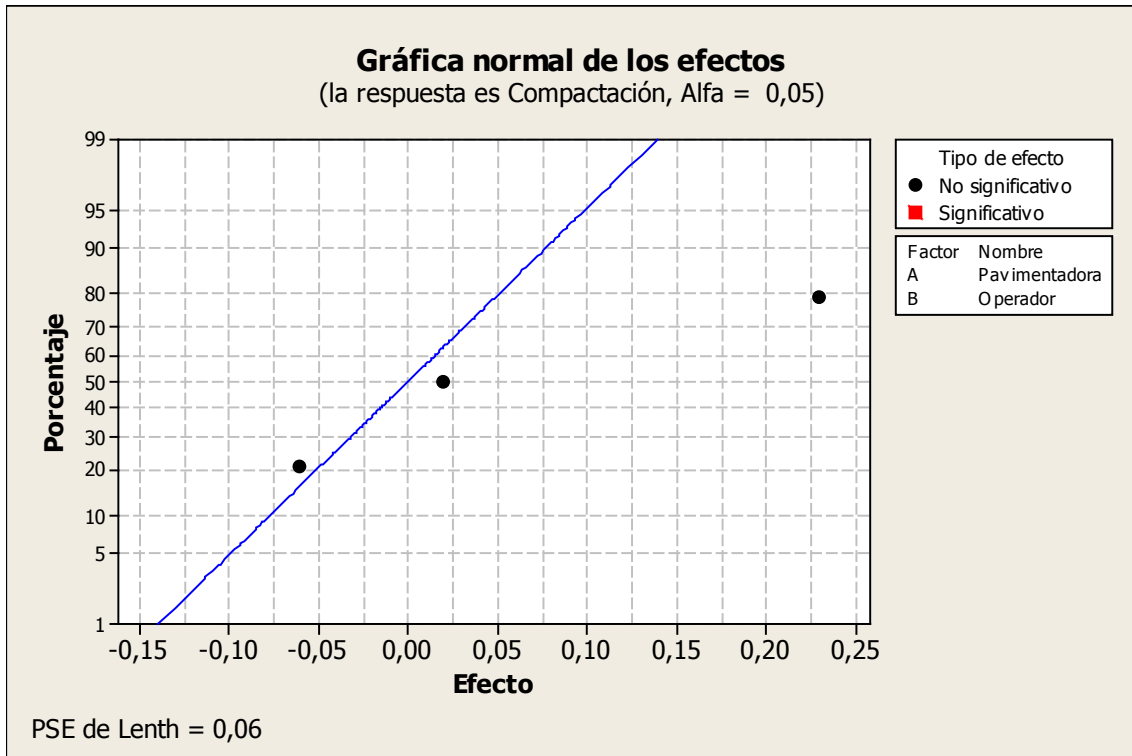
Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Efectos principales	2	0,0533000	0,0533000	0,0266500	*	*
Pavimentadora	1	0,0004000	0,0004000	0,0004000	*	*
Operador	1	0,0529000	0,0529000	0,0529000	*	*
2º orden (interacciones)	1	0,0036000	0,0036000	0,0036000	*	*
Pavimentadora*Operador	1	0,0036000	0,0036000	0,0036000	*	*
Error residual	0	*	*	*		
Total	3	0,0569000				

Coefficientes estimados para Compactación utilizando datos en unidades no codificadas

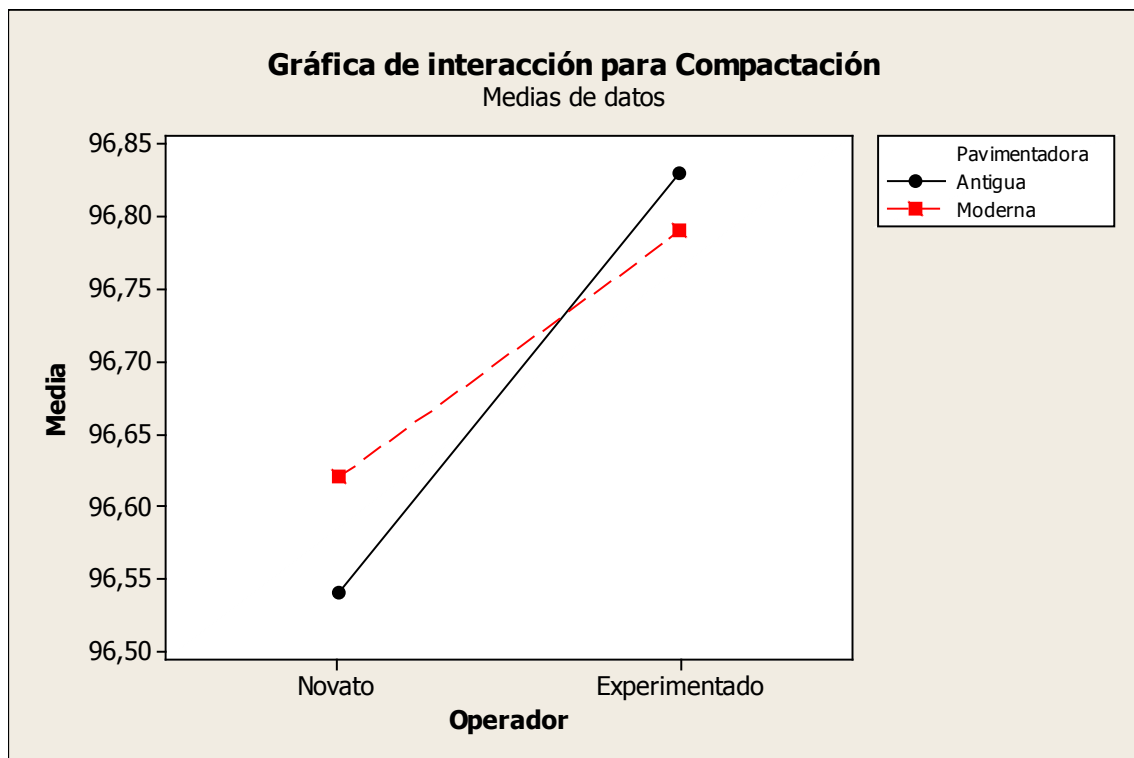
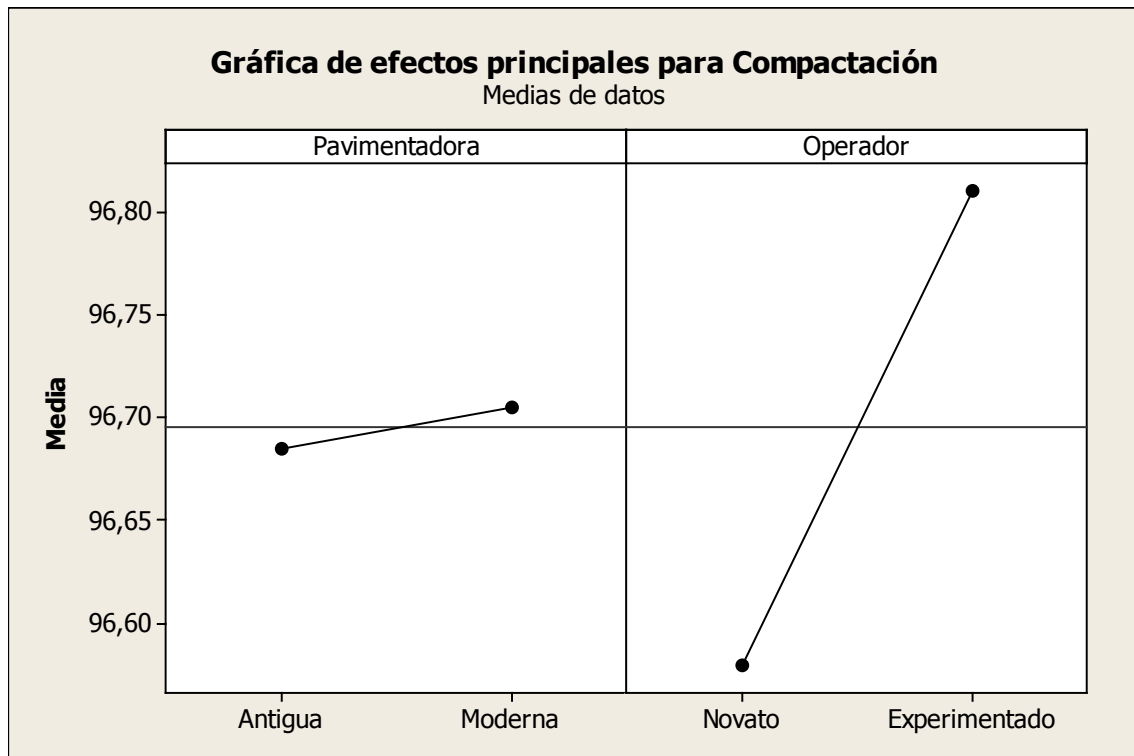
Término	Coef
Constante	96,6950
Pavimentadora	0,0100000
Operador	0,115000
Pavimentadora*Operador	-0,0300000

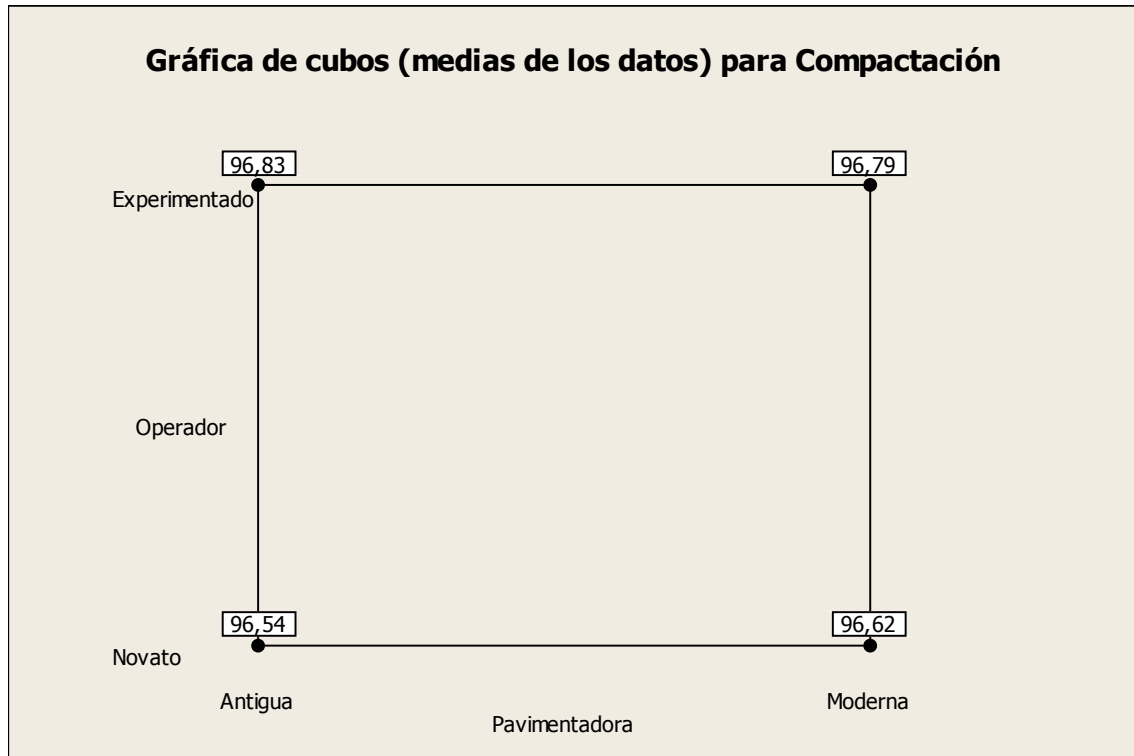
Se corrobora que no existen efectos ni interacciones significativas:





En cuanto a las gráficas de los efectos e interacciones, los resultados son los que siguen, aunque no son significativos:





Como conclusiones de todo este análisis se puede decir que el porcentaje de compactación se ve influenciado significativamente por el tipo de mezcla y el porcentaje de aditivo. Lo mejor es una mezcla con un contenido medio de cemento y un porcentaje del 10% de aditivo. El resto de factores e interacciones no son significativas. No obstante, conviene que las máquinas se encuentren bien calibradas y con un buen mantenimiento y no descuidar el entrenamiento de los operadores.