

Diseño de Experimentos

Jhon Jairo Padilla Aguilar, PhD.

Justificación

- ▶ La experimentación juega un papel fundamental en todos los campos de la investigación y el desarrollo.



Ejemplo:

- ▶ Un ingeniero metalúrgico tiene interés en estudiar el efecto de dos procesos diferentes de endurecimiento: el templado en aceite y el templado en agua salada.
- ▶ **Objetivo:**
 - ▶ Determinar cuál de las dos soluciones de templado produce la dureza máxima para esta aleación particular.
- ▶ **Experimento:**
 - ▶ Somete varios ejemplares o muestras para ensayo de la aleación a cada medio de templado y mide la dureza de los ejemplares después del templado.
 - ▶ Criterio de selección: dureza promedio de los ejemplares tratados en cada solución de templado.



Preguntas sobre el ejemplo:

- ▶ Estas dos soluciones son los únicos medios de templado de interés potencial? (hay otras maneras de hacerlo?)
- ▶ Hay en este experimento otros factores que podrían afectar la dureza y que deberían investigarse o controlarse?
- ▶ Cuántas muestras para ensayo de la aleación deberán probarse en cada solución de templado?
- ▶ Cómo deben asignarse las muestras para ensayo de prueba a las soluciones de templado y en qué orden deberán recolectarse los datos?
- ▶ Qué método de análisis de datos deberá usarse?
- ▶ Qué diferencia en la dureza promedio observada entre los dos medios de templado se considerará importante?



El objetivo de la experimentación es...

- ▶ Obtener *información de calidad*.
- ▶ Información que permita:
 - ▶ Desarrollar nuevos productos y procesos
 - ▶ Comprender mejor un sistema (un proceso industrial, un procedimiento analítico,...)
 - ▶ y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad,
 - ▶ Comprobar hipótesis científicas, etc.



Se requiere planificación...

- ▶ La experimentación se debe planificar (diseñar) cuidadosamente para que proporcione la información buscada.
- ▶ Dicha planificación debe considerar dos aspectos importantes relacionados con toda experimentación:
 - ▶ La experimentación es normalmente cara (recursos de equipos, personal, materiales, etc)
 - ▶ El resultado observado de un experimento tiene incertidumbre (varía aleatoriamente)
- ▶ La estadística es una herramienta fundamental para el diseño de los experimentos y la evaluación de los resultados



Importancia del Diseño Estadístico de Experimentos (DEE)

- ▶ Tanto por la importancia de las decisiones que se pueden tomar, como por el coste elevado de la experimentación no es adecuado dejar la elección de los experimentos y la evaluación de los resultados a la mera intuición del experimentador.
- ▶ DEE indica cómo planificar (diseñar, organizar) la secuencia de experimentos de una forma óptima
- ▶ DEE minimiza tanto el costo de la experimentación como la influencia del error experimental sobre la información buscada.

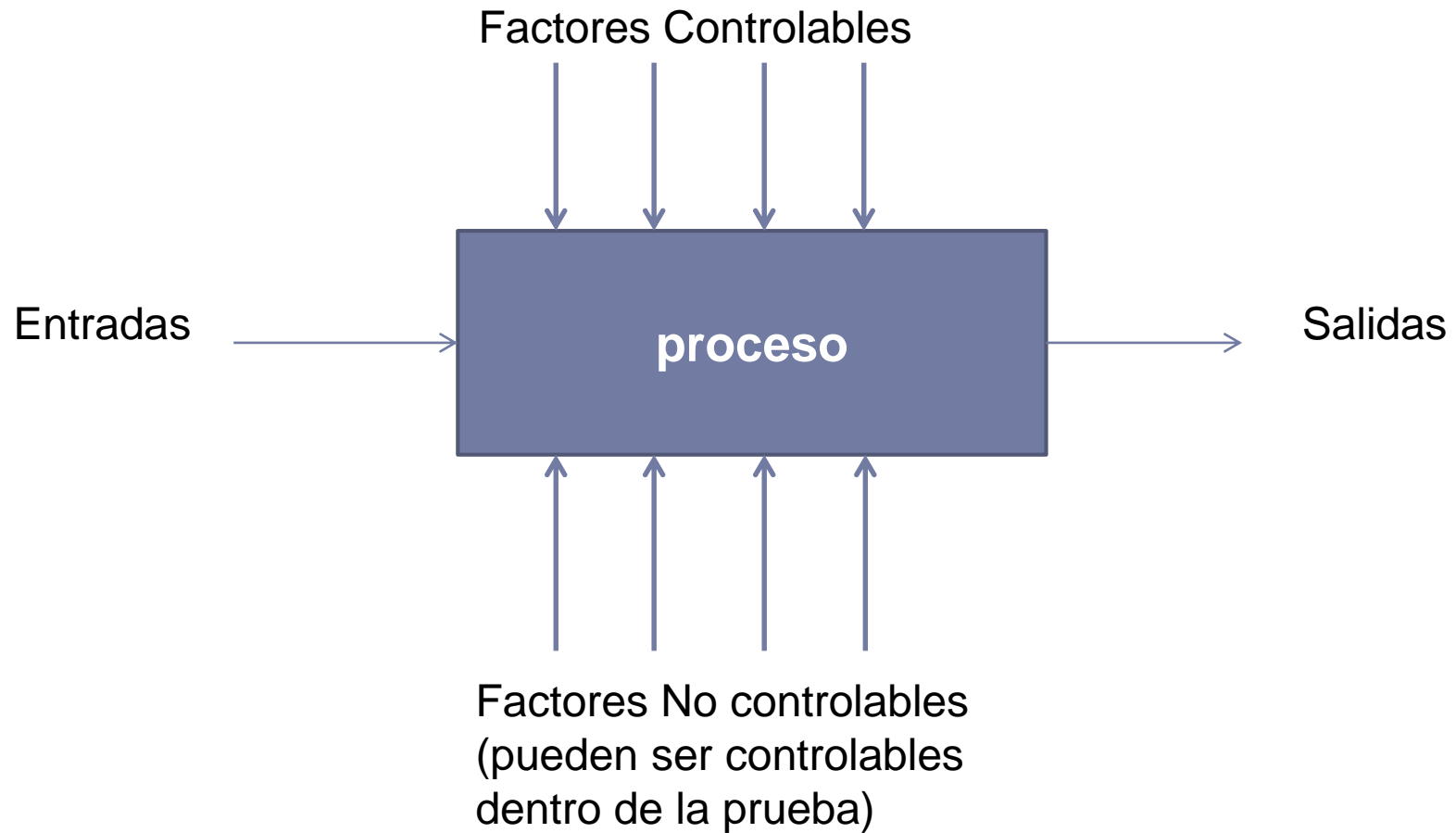


Qué es el Diseño Estadístico de Experimentos?

- ▶ Es una metodología
- ▶ Utiliza herramientas matemáticas. En especial estadísticas.
- ▶ Permite al experimentador:
 - ▶ Seleccionar la estrategia experimental óptima que permita obtener la información buscada con el mínimo coste.
 - ▶ Evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la máxima fiabilidad en las conclusiones que se obtengan.



Experimentación en sistemas aleatorios:



Objetivos Generales un experimento aleatorio

- ▶ Obtener un conocimiento inicial sobre un nuevo sistema en estudio. ¿En qué valores de los factores se puede centrar la investigación?
- ▶ Determinar la influencia de los factores sobre las respuestas observadas. De entre todos los factores que afectan al proceso, ¿cuales influyen más?, ¿cómo interaccionan entre ellos?
- ▶ Optimizar respuestas. ¿Qué valores de los factores proporcionan las respuestas de mayor calidad?
- ▶ Determinar la robustez del sistema. ¿Como afectan a la respuesta variaciones no controladas en el valor de los factores?



Objetivos específicos de un experimento aleatorio

- ▶ Determinar cuáles son los factores que tienen mayor influencia sobre las salidas
- ▶ Determinar cuáles valores de los factores controlables tienen mayor influencia **para que las salidas estén cerca de un valor nominal deseado casi siempre.**
- ▶ Determinar los valores de los factores controlables que tienen mayor influencia **para que la variabilidad de las salidas sea reducida.**
- ▶ Determinar cuál es el ajuste de los factores controlables que tiene mayor influencia **para que los efectos de las variables no controlables sean mínimos.**



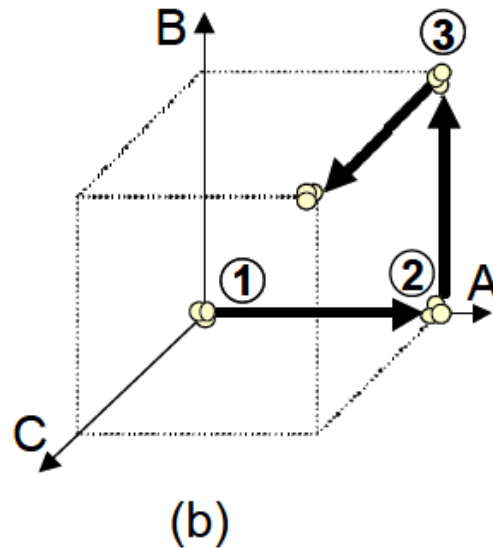
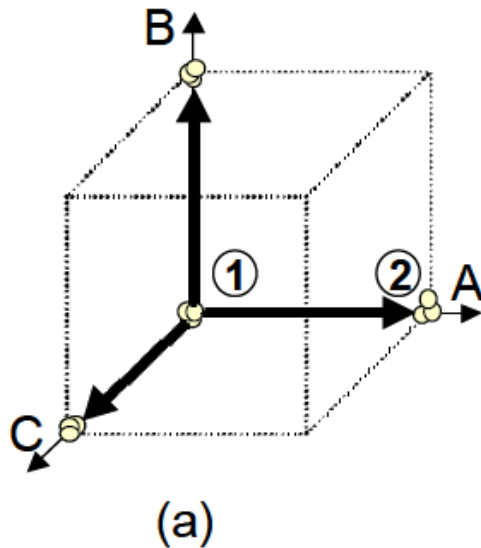
El método tradicional de experimentación

- ▶ **Variar-un-factor-cada-vez (VUFCV):**
 - ▶ A partir de unas condiciones iniciales, se realizan experimentos en los cuales todos los factores se mantienen constantes excepto el que se está estudiando.
 - ▶ De este modo, la variación de la respuesta se puede atribuir a la variación del factor, y, por tanto, revela el efecto de ese factor.
 - ▶ El procedimiento se repite para los otros factores.
- ▶ **Justificación:**
 - ▶ Si se variaran dos o más factores entre dos experimentos consecutivos, no sería posible conocer si el cambio en la respuesta ha sido debido al cambio de un factor, al de otro, o al de todos a la vez.



Variar un factor cada vez

- ▶ El método VUFCV también se utiliza para hallar qué valores de los factores optimizan una respuesta.
 - ▶ Se experimenta en dos condiciones distintas variando el factor A.
 - ▶ Se escoge como valor óptimo de A aquel que proporciona la mejor respuesta.
 - ▶ Se fija este valor, y se utiliza como nuevo punto de partida para variar el factor B (punto 3) y así sucesivamente.



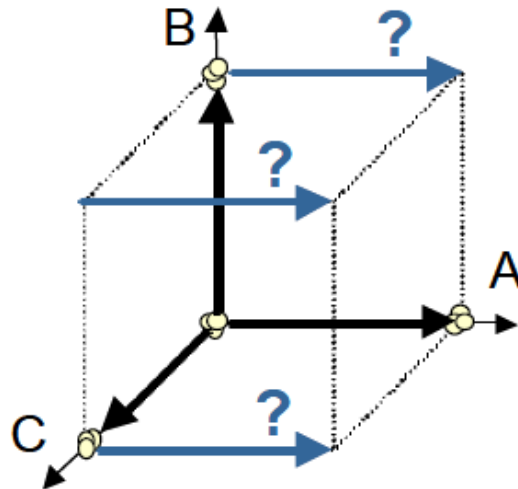
Inconvenientes del método tradicional

- ▶ Presenta inconvenientes importantes cuando existe interacción entre factores.
- ▶ Existe interacción entre dos factores A y B cuando el efecto del factor A es diferente según qué valor tome el factor B, y viceversa.



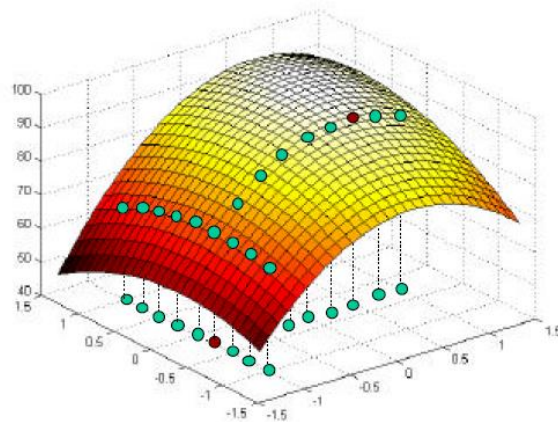
Confuso efecto conjunto de los factores

- ▶ No informa sobre como un factor interactúa con los otros factores o como estas interacciones afectan a la respuesta, con lo cual sólo se obtiene una comprensión limitada de los efectos de los factores. ¿Cuál es el efecto de A cuando los otros factores toman otros valores?.



Dificultad en la optimización

- ▶ No proporciona la posición del óptimo.
- ▶ El experimentador percibe que se ha llegado al óptimo porque cambiando un factor cada vez la respuesta no mejora, pero se puede encontrar lejos del óptimo real.
- ▶ Aunque se puede reiniciar la experimentación partiendo del “óptimo” encontrado, esta solución es extremadamente ineficiente cuando se deben estudiar muchos factores con muchos valores distintos, puesto que el método VUFCV requeriría demasiados experimentos y demasiado tiempo.



Qué método utilizar entonces?

- ▶ Los inconvenientes del método tradicional provienen de variar un factor cada vez.
- ▶ La solución, por lo tanto, debe consistir en variar más de un factor simultáneamente al realizar un nuevo experimento.
- ▶ Ventajas:
 - ▶ Permitiría mejorar la eficiencia del esfuerzo experimentador (reducir costos y esfuerzo)
 - ▶ Permitiría obtener información sobre las interacciones.
- ▶ El reto:
 - ▶ Diseñar una experimentación reducida, donde estos cambios simultáneos se complementen entre sí y permitan obtener la información buscada al combinar los resultados de todos los experimentos.



La solución: DEE

- ▶ El DEE proporciona el marco matemático para:
 - ▶ Cambiar todos los factores simultáneamente
 - ▶ Obtener la información buscada con un número reducido de experimentos, es decir, con la máxima eficiencia.
- ▶ El DEE conduce a una planificación con menos experimentos que el método VUFCV para obtener un conocimiento equivalente.



Principios básicos de DEE

- ▶ **Cualquier problema experimental incluye dos aspectos:**
 - ▶ Diseño del experimento
 - ▶ Análisis estadístico de los datos
- ▶ **Ambos están íntimamente relacionados:**
 - ▶ El análisis de los datos depende de la manera en que se haya realizado el experimento (el diseño empleado)



Principios básicos de DEE

- ▶ Principios básicos del DEE:
 - ▶ Realización de réplicas
 - ▶ Aleatorización
 - ▶ Formación de bloques



Realización de réplicas

- ▶ Repetición del experimento básico.
- ▶ Ejemplo:
 - ▶ Una réplica consistiría en el tratamiento de una muestra con el templado del aceite y el tratamiento alterno
 - ▶ Si se tratan 5 ejemplares en cada medio de templado, se dice que se han obtenido 5 réplicas
- ▶ Propiedades de las réplicas:
 - ▶ Permite obtener una estimación del error experimental
 - ▶ El error experimental permite determinar si en realidad las diferencias observadas en los datos son estadísticamente diferentes
 - ▶ Si el número de réplicas es alto, la precisión de los análisis es mucho más exacta. (con pocas réplicas no se puede saber con certeza si las diferencias son producto del error experimental)



Aleatorización

- ▶ Es la piedra angular para el uso de los métodos estadísticos en el DEE
- ▶ Tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizarán las corridas o ensayos individuales del experimento se determinan al azar.
- ▶ Esto permite que las observaciones (o los errores) sean variables aleatorias con distribuciones independientes.



Aleatorización

- ▶ Pueden analizarse efectos de factores “extraños” (no tenidos en cuenta inicialmente)
- ▶ Ejemplo:
 - ▶ En el ejemplo del templado, podría haber pequeñas diferencias en el espesor de la muestra. Estas diferencias, aunque pequeñas, podrían tener un efecto sobre la variable a medir. Si se escogieran sistemáticamente muestras de diferente espesor para las dos formas de templar, se estaría introduciendo un error. Al hacer la asignación aleatoria de los ejemplares al medio de templado, este problema se aligera en parte.
- ▶ Se puede recurrir a los programas que generan números aleatorios para automatizar la elección aleatoria de los ejemplares, de los operadores o de los instrumentos y herramientas.



Formación de bloques

- ▶ Técnica de diseño que se utiliza para mejorar la precisión de las comparaciones que se hacen entre los factores de interés
- ▶ Se emplea para reducir o eliminar la variabilidad introducida por factores perturbadores (factores que influyen en las salidas pero que no tienen un interés específico)
- ▶ Bloque: Conjunto de condiciones experimentales relativamente homogéneas
- ▶ Cada valor del factor perturbador pasa a conformar un bloque diferente



Procedimiento de aplicación del DEE

1. Comprender el problema y definir claramente el objetivo.
2. Identificar los factores que potencialmente podrían influir en la función objetivo, y los valores que éstos pueden tomar. Entre estos valores se buscará la información necesaria.
3. Establecer una estrategia experimental, llamada *plan de experimentación*.
4. Efectuar los experimentos con los valores de los factores decididos en el punto 2 para obtener los valores de las respuestas estudiadas.
5. Responder las preguntas planteadas, sea directamente, sea utilizando un modelo matemático. Si es necesario, volver a la etapa 1.



Pautas generales para diseñar un experimento

1. Identificación y enunciación del problema
2. Elección de los factores, los niveles y los rangos
3. Selección de la variable de respuesta
4. Elección del diseño experimental
5. Realización del experimento
6. Análisis estadístico de los datos
7. Conclusiones y recomendaciones



1. Identificación y enunciación del problema

- ▶ Es un paso obvio
- ▶ A veces no es sencillo determinar que un problema requiere experimentación
- ▶ Tampoco es fácil desarrollar una enunciación clara (y que todos estén de acuerdo) del problema.
- ▶ Se recomienda un enfoque de equipos: involucrar todas las partes implicadas (ingeniería, aseguramiento calidad, producción, mercadeo, administración, cliente, personal de operación).
- ▶ El personal de operación conoce a fondo el experimento y con demasiada frecuencia se ignora.



1. Identificación y enunciación del problema

- ▶ **Sistematizar el problema:**
 - ▶ Dividir el problema grande en subproblemas más pequeños
- ▶ **El alcance puede ser:**
 - ▶ sólo un diagnóstico (proceso desconocido)
 - ▶ la optimización de un proceso (proceso ampliamente conocido)
- ▶ **Objetivos posibles:**
 - ▶ Confirmación (¿se comporta igual ahora que en el pasado?)
 - ▶ Descubrimiento (¿Qué ocurre si se emplean nuevos materiales, variables o condiciones de operación?)
 - ▶ Estabilidad (¿bajo qué condiciones la variable de interés sufre de una degradación seria?)
- ▶ **Enfoque:**
 - ▶ Comprensivo (variaciones simultáneas en diferentes componentes)
 - ▶ Secuencial (variación de un componente a la vez en forma secuencial)



2. Elección de los factores, los niveles y los rangos

▶ Factores:

- ▶ Potenciales de diseño (los que varía el experimentador)
- ▶ Perturbadores

▶ Factores de diseño:

- ▶ Se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento

▶ Factores constantes:

- ▶ Pueden generar variaciones sobre el experimento, pero para la situación de interés pueden permanecer constantes (no interesa su efecto)



2. Elección de los factores, los niveles y los rangos

- ▶ **Factores perturbadores:**
 - ▶ Pueden tener un efecto considerable sobre el experimento
- ▶ **Se clasifican en:**
 - ▶ Factores controlables: Niveles pueden ser controlables por el experimentador
 - ▶ Factores no controlables: No pueden ser controlados. Si pueden ser medidos, se compensa su efecto aplicando análisis de covarianza. Ejemplo: humedad relativa del ambiente.
 - ▶ Ruido: Factores no controlables en el entorno natural del experimento, pero que pueden ser controlados con fines del experimento.
- ▶ **Estudio de robustez del proceso ó problema de robustez del diseño:**
 - ▶ Es común que el objetivo sea determinar los niveles de los factores controlables que minimizan la varianza debido a los factores de ruido.



2. Elección de los factores, los niveles y los rangos

- ▶ Una vez elegidos los factores, se deben elegir los rangos en los que los hará variar
- ▶ También se deben elegir los niveles específicos en los que se realizarán las corridas
- ▶ También pensar cómo se controlarán los factores y cómo se medirán los factores y las variables de interés
- ▶ Se requiere el conocimiento del proceso (experiencia+teoría)
- ▶ De todas maneras tener mente abierta (no dejarse influenciar por la experiencia pasada al punto de impedir que vea algo nuevo)



2. Elección de los factores, los niveles y los rangos

- ▶ Cuando se hace un tamizado (caracterización) de los factores:
 - ▶ Es preferible mantener un número de niveles reducido para los factores.
- ▶ Es importante elegir la región de interés
- ▶ En el tamizado, la región de interés es relativamente grande (rangos amplios de variación de los factores)
- ▶ En la medida que se vaya conociendo más el proceso, la región de interés se hará más estrecha.



3. Selección de la variable de respuesta

- ▶ Se debe tener certeza de que la variable proporciona información realmente útil para el estudio en cuestión
- ▶ También es importante determinar cómo se va a medir
- ▶ La eficiencia de los instrumentos de medición (error de medición) es un factor importante para determinar la media y la desviación estándar de la variable.

- ▶ Los puntos 1 a 3 se conocen como **Planeación previa al experimento:**
 - ▶ Muchas veces una sola persona no posee los conocimientos necesarios en esta fase y se requiere el trabajo en equipo
 - ▶ De esta planeación depende en gran parte el éxito del experimento



4. Elección del diseño experimental

- ▶ Si se ha hecho una planeación previa al experimento exhaustiva, este paso es relativamente sencillo
- ▶ Consideración del tamaño de la muestra: Número de réplicas
- ▶ Selección de un orden de corridas adecuado
- ▶ Determinar si entra en juego la conformación de bloques
- ▶ Determinar las restricciones sobre la aleatorización
- ▶ Hay programas de computador para seleccionar el orden de las corridas y obtener una buena aleatorización
- ▶ También hay programas para seleccionar el diseño del experimento más adecuado, pero no son confiables (reciben número de factores, niveles y rangos)



4. Elección del diseño experimental

- ▶ Es importante tener en mente los objetivos experimentales
- ▶ Cuando se conoce de antemano que ciertos niveles de algún factor producen una diferencia significativa:
 - ▶ El interés se centra en identificar qué factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta.
- ▶ En otros experimentos podría interesar la verificación de la uniformidad (que las dos alternativas comparadas producen resultados similares)



5. Realización del experimento

- ▶ Se recomienda estar monitoreando el experimento para asegurar que todo sale de acuerdo a la planeación
- ▶ Errores en el procedimiento experimental destruyen la validez experimental (fracaso del experimento, pérdida de dinero)
- ▶ No subestimar los aspectos de logística y planeación cuando se corre el experimento, por sencillo que sea.
- ▶ Se sugiere hacer una corridas piloto o de prueba antes de hacer el experimento definitivo:
 - ▶ Se obtiene información de consistencia experimental
 - ▶ Se comprueba el sistema de medición
 - ▶ Se tiene una idea aproximada del error experimental
 - ▶ Se pone en práctica la técnica experimental global.
 - ▶ Puede acarrear cambios en los pasos 1 a 4.



6. Análisis estadístico de los datos

- ▶ Se requiere obtener resultados objetivos y no apreciativos.
- ▶ Los métodos estadísticos no serán complicados si el experimento ha sido bien planeado y ejecutado.
- ▶ Se cuenta con programas informáticos para esto.
- ▶ Los **métodos gráficos** simples desempeñan un papel importante en el análisis e interpretación de datos.
- ▶ Suelen ser muy útiles los **métodos de comprobación de hipótesis** y la **estimación de intervalos de confianza**.
- ▶ Podría interesar obtener un modelo empírico relacionando las variables respuesta con los factores de diseño. Se requiere análisis residual y verificación de la adecuación del modelo.



7. Conclusiones y recomendaciones

- ▶ Con base en el análisis de los datos, se deben sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción.
- ▶ Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa (para presentar resultados)
- ▶ Deben realizarse corridas de seguimiento o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

