

# Estadística para Investigadores

Diseño, innovación y descubrimiento

Segunda edición

George E. Box  
J. Stuart Hunter  
William G. Hunter



EDITORIAL  
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

### **Registro bibliográfico (ISBD)**

BOX, George E. P.

[Statistics for Experimenters : Design, Innovation, and Discovery. Español]

Estadística para Investigadores : diseño, innovación y descubrimiento / George E. P. Box, J. Stuart Hunter, William G. Hunter ; versión española traducida por Dr. Xavier Tomàs Morer ; revisada por Dr. Ernesto J. Barrios Zamudio. – 2ª ed. – Barcelona : Reverté, 2008

XVIII, 639 p. : il. ; 24 cm.

Traducción de: Statistics for Experimenters : Design, Innovation, and Discovery. – Índice.  
DL B-34970-2008. - ISBN 978-84-291-5044-5

1. Probabilidad y estadística matemática. I. Hunter, J. Stuart. II. Hunter, William G. III. Tomàs Morer, Xavier, trad. IV. Barrios Zamudio, Ernesto J., rev. V. Título.  
519.2

*Título de la obra original:*

### **Statistics for Experimenters Design, Innovation, and Discovery**

*Edición original en lengua inglesa publicada por*

**John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey**

Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

*Versión española traducida por*

**Dr. Xavier Tomàs Morer**

Profesor Catedrático de Estadística

Institut Químic de Sarrià

Universitat Ramon Llull. Barcelona

*Revisada por*

**Dr. Ernesto J. Barrios Zamudio**

Físico-Matemático, IPN.

Maestro en Ciencias, University of Wisconsin-Madison, EUA

Doctor en Estadística, University of Wisconsin-Madison, EUA

### **Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

Loreto, 13-15. Local B

08029 Barcelona. ESPAÑA

Tel: (34) 93 419 33 36

Fax: (34) 93 419 51 89

reverte@reverte.com

www.reverte.com

*Edición en español:*

© Editorial Reverté, S. A., 2008

ISBN: 978-84-291-5044-5

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Impreso en España - *Printed in Spain*

Depósito Legal: B-34970-2008

Impresión y encuadernación: Liberdúplex, S. L. U.

A la memoria de  
WILLIAM GORDON HUNTER



WILLIAM G. HUNTER  
1937-1986

¡Experimenta!  
Haz de ello tu consigna día y noche.  
Experimenta,  
y ello te llevará a la luz.

La manzana en la copa del árbol  
nunca está demasiado alta para alcanzarla,  
así que sigue el ejemplo de Eva.  
¡Experimenta!

Sé curioso,  
aunque los amigos con quien te cruces se molesten.

Enójate  
cada vez que quieran retenerte.

Si sólo sigues este consejo,  
el futuro puede ofrecerte una infinita felicidad

y alegría.

Experimenta

¡Y ya verás!

COLE PORTER\*

\* “*EXPERIMENT*” de “*NYMPH ERRANT*” c. & a. Cole Porter. Copyright © 1933 Harms Inc. Reproducido con el generoso permiso de CHAPPELL & COMPANY LIMITED para todo el mundo (excepto USA, Canadá y Escandinavia). © 1933 WARNER BROSS. INC. Copyright renovado. Reservados todos los derechos. Utilizado con permiso.

Me imagino perfectamente que, cuando el Señor creó el Mundo y a las personas que habitan en él –obra que, según la ciencia moderna, llevó mucho tiempo– razonó consigo mismo de la manera siguiente: “Si lo hago todo predecible, estos seres humanos, a los que he dotado de cerebros bastante buenos, indudablemente aprenderán a predecirlo todo y, por lo tanto, no tendrán aliciente alguno para hacer absolutamente nada, pues reconocerán que el futuro está totalmente determinado y que en él no puede influir ninguna acción humana. Por otra parte, si todo lo hago impredecible, gradualmente descubrirán que no existe base racional para tomar ninguna decisión y, por lo tanto, como en el primer caso no tendrán motivo alguno para hacer nada. Ninguno de estos dos proyectos tiene sentido. Crearé, por tanto, una mezcla de los dos. Que unas cosas sean predecibles y otras impredecibles. Así, entre otras muchas cosas, su importante tarea será la de saber cuál es cuál.”

E. F. SCHUMACHER\*

\* De *Lo pequeño es hermoso*, utilizado con autorización.

*Alfabeto griego\**

---

A	$\alpha$	alfa	N	$\nu$	ny
B	$\beta$	beta	$\Xi$	$\xi$	xi
$\Gamma$	$\gamma$	gamma	O	o	ómicron
$\Delta$	$\delta$	delta	$\Pi$	$\pi$	pi
E	$\varepsilon$	épsilon	P	$\rho$	rho
Z	$\zeta$	zeta	$\Sigma$	$\sigma, \varsigma$	sigma
H	$\eta$	eta	T	$\tau$	tau
$\Theta$	$\theta, \vartheta$	theta	Y	$\upsilon$	ípsilon
I	$\iota$	iota	$\Phi$	$\phi, \varphi$	fi
K	$\kappa$	kappa	X	$\chi$	ji
$\Lambda$	$\lambda$	lambda	$\Psi$	$\psi$	psi
M	$\mu$	my	$\Omega$	$\omega$	omega

\* N del T. Según el *Diccionario de la Lengua Española*. Real Academia de la Lengua Española, 21<sup>a</sup> edición. Madrid, 1992.

# Prólogo a la segunda edición

Al escribir de nuevo este libro hemos sentido profundamente la pérdida de nuestro colega y amigo Bill Hunter (William G. Hunter, 1931-1986). Echamos de menos sus ideas, su consejo y su animoso estímulo. No obstante creemos que su espíritu ha estado con nosotros y que estaría satisfecho por el trabajo que hemos hecho.

Los objetivos de esta edición revisada de *Estadística para Investigadores* son los mismos que los de la primera edición:

1. Poner a disposición de los investigadores y experimentadores herramientas estadísticas y científicas que puedan, en gran medida, catalizar la innovación, la resolución de problemas y los descubrimientos.
2. Mostrar cómo utilizar tales herramientas, conjuntamente con los especialistas en la materia, a medida que avanzan sus investigaciones.

Las novedades que hubieran hecho feliz a Bill son la atmósfera receptiva que estas técnicas tienen hoy en día en la industria y la actual disponibilidad de rápidos ordenadores que permiten\*, cuando es necesario, la utilización de métodos de cálculo intensivos ya programados.

Siguiendo conceptos tales como Seis Sigma, las empresas han entrenado a su personal en las técnicas de la investigación económica. Con esta democratización del método científico se han descubierto a muchas más personas con capacidades creativas y con aptitudes no desarrolladas anteriormente para la resolución de problemas y descubrimientos. Además, el “equipo de ideas” no sólo acelera la mejora sino que identifica a líderes naturales en innovación y puede permitirles liderar. Para hacer posibles tales iniciativas, la filosofía y los métodos modernos de la mejora de procesos se han de enseñar a todos los niveles de una organización. Creemos que este texto servirá de ayuda tanto para los formadores como para los

\* Todos los cálculos de este texto se han realizado en el lenguaje estadístico R (R Development Core Team, 2004) disponible en CRAN (<http://cran.R-project.org>). Las funciones para la representación de los gráficos de ANOVA y lambda, para la selección bayesiana y la construcción de modelos están incluidos en los programas BHH2 y BsMD en R, disponibles en CRAN como paquetes de contribución. También existen programas comerciales, tales como SCA Statistical System que algunos lectores encontrarán sencillos de utilizar. Todos los datos para los ejercicios, ejemplos, y problemas están disponibles en [ftp://ftp.wiley.com/public/sci\\_tech\\_med/statistics\\_experimenter](ftp://ftp.wiley.com/public/sci_tech_med/statistics_experimenter).

formados implicados en esos objetivos. Basándonos también en nuestra larga experiencia creemos que el material de este texto proporciona una adecuada enseñanza a científicos e ingenieros en las universidades, cuyas necesidades, en el pasado, fueron frecuentemente descuidadas.

El material del texto original ha sido reordenado y en gran parte redactado de nuevo con el objetivo de asegurar una mayor accesibilidad a los lectores. Además se han introducido o enfatizado algunos conceptos, tales como:

- Las numerosas consideraciones, además de las propiamente estadísticas, que se han de considerar para que una investigación sea eficaz.
- La necesidad de trabajar en estrecha colaboración con especialistas en la materia.
- La importancia de seleccionar un conjunto de referencia adecuado.
- La importancia de las técnicas gráficas como complemento a métodos más formales.
- El uso de factores inactivos y espacios canónicos para resolver problemas de respuestas múltiples.
- La eficiencia, muchas veces incrementada, que se obtiene por transformación de los datos utilizando los gráficos lambda.
- La asimilación del concepto de transmisión de error y su aplicación al diseño de productos y procesos que están poco influidos (robustos) por la variabilidad de los componentes del sistema.
- La importancia de los diseños *split-plot*, o similares, en la experimentación industrial, especialmente en el diseño de procesos y productos robustos a las condiciones del entorno.
- La importancia del procedimiento secuencial a la resolución de problemas y, en particular, la realización secuencial de diseños de experimentos.
- Cómo seleccionar los mejores experimentos siguientes.
- El aprendizaje de las técnicas de investigación practicando el diseño de un dispositivo sencillo –por ejemplo, un helicóptero de papel–.
- Cómo el empirismo puede conducir al mecanicismo.
- El uso de la aleatorización y la formación de bloques para permitir el análisis “como si” los supuestos estándar fueran ciertos.
- El uso y análisis de arreglos experimentales complejos; en particular, los diseños de Plackett-Burman.
- La *función de información del diseño*.
- La introducción al control de procesos, el pronóstico y el análisis de series temporales.
- Una discusión sobre el funcionamiento de un proceso evolutivo.

## USO DE LAS PREGUNTAS Y PROBLEMAS

Las preguntas y problemas al final de cada capítulo pueden utilizarse de dos maneras. Puede considerar analizarlos *antes* de la lectura del capítulo para ayudar a identificar los puntos clave y guiar su estudio, o bien puede considerarlos como prácticas y ejercicios *después* de leer el capítulo. También encontrará útiles la colección de citas en las contracubiertas de este libro.

Si aplica estas ideas, y especialmente si se encuentra con éxitos o fracasos poco usuales, nos gustaría aprender de su experiencia. Hemos intentado escribir este libro de forma clara y que pueda ser útil. Si tiene alguna sugerencia de cómo mejorarlo, por favor escríbanos.

## AGRADECIMIENTOS

Estamos especialmente agradecidos por su ayuda en la preparación de esta obra y por su generosa ayuda a Ernesto Barrios Zamudio. También queremos agradecer la ayuda de René Valverde Ventura, Carla Vivacqua y Carmen Paniagua Quiñones. Estamos en deuda con David Bacon Mac Berthouex, Søren Bisgaard, Bob DeBaun, David Steinberg, Dan Meyer, Bill Hill, Merv Muller y Daniel Peña por sus críticas y sus valiosas sugerencias a las primeras versiones del manuscrito, y a Claire Box y Tady Hunter por su paciencia y ánimo. Desde el inicio al final de este esfuerzo hemos sido particularmente afortunados por contar con el acertado y alentador consejo de nuestra editora Lisa Van Horn en la total preparación de este libro.

GEORGE E. P. BOX  
J. STUART HUNTER

*Madison, Wisconsin*  
*Princeton, New Jersey*  
*Abril de 2005*



# Índice

<b>Prólogo a la segunda edición</b> .....	IX
<b>Capítulo 1 Catalizar la generación del conocimiento</b> .....	1
1.1. El proceso de aprendizaje .....	1
1.2. Consideraciones importantes .....	5
1.3. El problema del investigador y los métodos estadísticos	7
1.4. Una típica investigación .....	9
1.5. Cómo utilizar las técnicas estadísticas .....	13
Referencias y lecturas adicionales .....	14
<b>Capítulo 2 Fundamentos (probabilidad, parámetros y estadísticos)</b> ..	17
2.1. Error experimental .....	17
2.2. Distribuciones .....	18
2.3. Parámetros y estadísticos .....	23
2.4. Medidas de posición y dispersión .....	24
2.5. Distribución normal .....	28
2.6. Gráficos de probabilidad normal .....	33
2.7. Aleatoriedad y variables aleatorias .....	34
2.8. Covarianza y correlación como medidas de dependencia lineal .....	37
2.9. Distribución $t$ de Student .....	39
2.10. Estimación de parámetros .....	43
2.11. Muestreo aleatorio de una población normal .....	44
2.12. Las distribuciones $\chi^2$ cuadrada y $F$ .....	46
2.13. La distribución binomial .....	49
2.14. La distribución de Poisson .....	54

Apéndice 2A. Media y varianza de una combinación lineal de observaciones .....	58
Referencias y lecturas adicionales .....	60
<b>Capítulo 3 Comparación de dos tratamientos: distribuciones de referencia, pruebas e intervalos de confianza .....</b>	<b>67</b>
3.1. Conjuntos y distribuciones de referencia relevantes .....	67
3.2. Diseño de comparación de parejas aleatorizadas: ejemplo de los zapatos de los chicos .....	81
3.3. Formación de bloques y aleatorización .....	92
3.4. Resumen: comparaciones, replicaciones, aleatorización y formación de bloques en experimentos sencillos .....	94
3.5. Profundizando en las pruebas de significación .....	95
3.6. Inferencias sobre datos discretos: distribución binomial ..	106
3.7. Inferencias sobre frecuencias (recuentos por unidad): distribución de Poisson .....	110
3.8. Tablas de contingencia y pruebas de asociación .....	113
Apéndice 3A. Comparación de la robustez de las pruebas para comparar dos tratamientos .....	117
Apéndice 3B. Cálculo de la distribución de referencia a partir de datos anteriores .....	120
Referencias y lecturas adicionales .....	123
<b>Capítulo 4 Comparación de varios tratamientos, bloques aleatorizados y cuadrados latinos .....</b>	<b>133</b>
4.1. Comparación de $k$ tratamientos en un diseño completamente aleatorizado .....	133
4.2. Diseños en bloques aleatorizados .....	146
4.3. Un primer apunte sobre los experimentos <i>split-plot</i> y sobre su relación con bloques aleatorizados .....	156
4.4. Diseños con más de una variable de bloque: cuadrados latinos .....	157
4.5. Diseños balanceados de bloques incompletos .....	163
Apéndice 4A. Ideas sobre el ANOVA gráfico .....	166
Apéndice 4B. Algunos cuadrados latinos, cuadrados grecolatinos e hipergrecolatinos útiles .....	167
Referencias y lecturas adicionales .....	168
<b>Capítulo 5 Diseños factoriales a dos niveles .....</b>	<b>173</b>
5.1. Introducción .....	173
5.2. Ejemplo 1: los efectos de tres factores (variables) sobre la transparencia de una película .....	174

5.3. Ejemplo 2: los efectos de tres factores sobre tres propiedades físicas de un polímero en solución .....	175
5.4. Diseño factorial $2^3$ : investigación a escala de planta piloto .....	177
5.5. Cálculo de los efectos principales .....	178
5.6. Efectos de las interacciones .....	181
5.7. Experimentos genuinamente repetidos .....	183
5.8. Interpretación de resultados .....	185
5.9. Tabla de contrastes .....	186
5.10. Uso incorrecto del ANOVA en experimentos factoriales $2^k$ .....	188
5.11. Visualización de los datos .....	190
5.12. Trabajar con más de una respuesta: un experimento sobre comida para animales .....	193
5.13. Diseño factorial $2^4$ : estudio del desarrollo de un proceso	199
5.14. Análisis mediante gráficos de probabilidad normal y gráficos de Lenth .....	203
5.15. Otros modelos para datos factoriales .....	208
5.16. Formación de bloques en diseños factoriales $2^k$ .....	211
5.17. Aprender practicando .....	216
5.18. Resumen .....	220
Apéndice 5A. Formación de bloques en diseños factoriales más grandes .....	220
Apéndice 5B. Confusión parcial .....	222
Referencias y lecturas adicionales .....	222
<b>Capítulo 6 Diseños factoriales fraccionados</b> .....	<b>235</b>
6.1. Efectos de cinco factores sobre seis propiedades de una película en ocho experimentos .....	235
6.2. Estabilidad de un nuevo producto, cuatro factores en ocho ensayos. Diseño $2^{4-1}$ .....	236
6.3. Ejemplo de una media fracción: modificación de un cojinete .....	239
6.4. Anatomía de la media fracción .....	240
6.5. Diseño $2_{III}^{7-4}$ : ejemplo de la bicicleta .....	244
6.6. Diseños con ocho experimentos .....	247
6.7. Ejemplo de utilización de la tabla 6.6 .....	247
6.8. Cambio de signo, plegamiento y uso secuencial de diseños .....	249
6.9. Una investigación utilizando el plegamiento de múltiples columnas .....	252

6.10. Aumento de la resolución de un diseño de III a IV por plegamiento .....	257
6.11. Diseños con dieciséis experimentos .....	258
6.12. Media fracción nodal $2^{5-1}$ de un diseño factorial $2^5$ : ejemplo del reactor .....	261
6.13. Dieciseisava fracción nodal de un diseño factorial $2^8$ ..	263
6.14. Diseño nodal $2_{III}^{15-11}$ . Sesenta y cuatroava fracción de un diseño factorial $2^{15}$ .....	266
6.15. Construcción de otras fracciones a dos niveles .....	269
6.16. Eliminación de los efectos de bloques .....	271
Referencias y lecturas adicionales .....	273
<b>Capítulo 7 Diseños fraccionados adicionales y su análisis .....</b>	<b>281</b>
7.1. Diseños de Plackett y Burman .....	281
7.2. Selección de nuevos experimentos .....	294
7.3. Justificación del uso de diseños fraccionados .....	303
Apéndice 7A. Detalles técnicos .....	306
Apéndice 7B. Análisis parcial aproximado para los diseños PB .....	308
Apéndice 7C. Diseños ortogonales de Hall .....	310
Referencias y lecturas adicionales .....	313
<b>Capítulo 8 Diseños factoriales y transformación de datos .....</b>	<b>317</b>
8.1. Diseño (factorial) de dos factores .....	317
8.2. Simplificación y aumento de la sensibilidad mediante transformaciones .....	320
Apéndice 8A. Fundamentos para la transformación de los datos .....	329
Apéndice 8B. $\chi^2_v$ de Bartlett para probar la no homogeneidad de varianzas .....	329
Referencias y lecturas adicionales .....	329
<b>Capítulo 9 Fuentes de variación múltiples .....</b>	<b>335</b>
9.1. Diseños de lotes subdivididos, componentes de la varianza y transmisión de error .....	335
9.2. Diseños split-plot o de lotes subdivididos .....	335
9.3. Estimación de los componentes de la varianza .....	345
9.4. Transmisión de error .....	353
Referencias y lecturas adicionales .....	359

<b>Capítulo 10 Mínimos cuadrados y la necesidad de los diseños de experimentos</b> .....	363
10.1. Estimación con mínimos cuadrados .....	364
10.2. Versatilidad de mínimos cuadrados .....	378
10.3. Los orígenes del diseño de experimentos .....	397
10.4. Modelos no lineales .....	407
Apéndice 10A. Representación vectorial de los conceptos estadísticos .....	410
Apéndice 10B. Versión matricial de mínimos cuadrados	416
Apéndice 10C. Análisis de factoriales, parciales y otros	418
Apéndice 10D. Mínimos cuadrados ponderados y sin ponderar .....	420
Referencias y lecturas adicionales .....	424
<b>Capítulo 11 Modelado, geometría y diseño de experimentos</b> .....	437
11.1. Algunos modelos empíricos .....	441
11.2. Algunos diseños experimentales y la función de información del diseño .....	447
11.3. ¿Está suficientemente bien estimada la superficie de respuesta? .....	453
11.4. Estrategia de diseño secuencial .....	454
11.5. Análisis canónico .....	461
11.6. Diseños de Box-Behnken .....	475
Referencias y lecturas adicionales .....	483
<b>Capítulo 12 Algunas aplicaciones de los métodos de superficie de respuesta</b> .....	489
12.1. Experimentación iterativa para la mejora del diseño de un producto .....	489
12.2. Simplificación de una función de respuesta mediante transformación de los datos .....	503
12.3. Detección y explotación de espacios de factores activos e inactivos para datos con múltiples respuestas .....	509
12.4. Exploración de espacios de factores canónicos .....	513
12.5. Del empirismo al mecanicismo .....	518
12.6. Aplicaciones de la metodología de superficies de respuesta .....	526
Apéndice 12A. Varianza media de $\hat{y}$ .....	527
Apéndice 12B. ....	528
Referencias y lecturas adicionales .....	530

<b>Capítulo 13</b>	<b>Introducción al diseño de productos y procesos robustos</b>	539
13.1.	Robustez al entorno	539
13.2.	Robustez a los componentes de variación	549
	Apéndice 13A. Una formulación matemática para la robustez al entorno	556
	Apéndice 13B. Selección de los criterios	558
	Referencias y lecturas adicionales	559
<b>Capítulo 14</b>	<b>Introducción al control de procesos, pronósticos y series temporales</b>	565
14.1.	Supervisión de procesos	565
14.2.	Media móvil ponderada exponencialmente	569
14.3.	El gráfico CUSUM	574
14.4.	Ajuste del proceso	576
14.5.	Una breve visión de algunos modelos de series temporales y aplicaciones	585
14.6.	Utilización de un modelo para hacer un pronóstico	588
14.7.	Análisis de intervención: ejemplo de la contaminación atmosférica en Los Ángeles	593
	Referencias y lecturas adicionales	595
<b>Capítulo 15</b>	<b>Proceso en operación evolutiva</b>	599
15.1.	Más de un factor	602
15.2.	Múltiples respuestas	606
15.3.	El comité del proceso en operación evolutiva	607
	Referencias y lecturas adicionales	608
<b>Tablas</b>		611
<b>Índice de autores</b>		625
<b>Índice alfabético</b>		629

# CAPÍTULO 1

## Catalizar la generación del conocimiento

### 1.1. EL PROCESO DE APRENDIZAJE

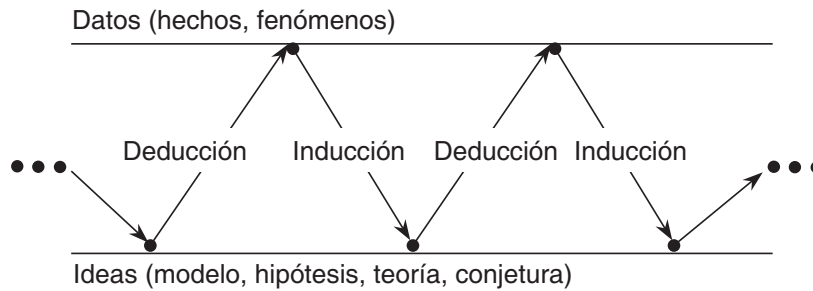
El conocimiento es poder. Es la clave de la innovación y del beneficio. Pero conseguir nuevos conocimientos puede ser complejo, llevar mucho tiempo y ser costoso. Para tener éxito en el empeño hemos de aprender a aprender. Éste no es un concepto esotérico. Es la clave para la generación de ideas, para la mejora de procesos, para el desarrollo de nuevos productos y procesos robustos. Utilizando este texto puede simplificar y acelerar bastante la generación, la verificación y el desarrollo de nuevas ideas. Descubrirá que los métodos estadísticos, y en particular el diseño de experimentos, catalizan el método científico y, en cierta forma aumentan mucho su eficiencia.

El aprendizaje avanza por iteración tal como se muestra en la figura 1.1. Una idea inicial (o modelo, hipótesis, teoría o conjetura) conduce, por un proceso de *deducción*, a ciertas consecuencias necesarias que se pueden comparar con los datos. Cuando las consecuencias y los datos no concuerdan la discrepancia puede conducir, por un proceso denominado *inducción*, a la modificación del modelo. Se inicia entonces un segundo ciclo de iteración. Se deducen las consecuencias del modelo modificado y de nuevo se comparan con los datos que ya teníamos o con los nuevos, que a su vez pueden llevar a nuevas modificaciones y siempre a un aumento del conocimiento. El proceso de adquisición de datos puede ser un experimento científico, pero también puede ser un paseo por una biblioteca o una ojeada por Internet.

#### **El aprendizaje inductivo-deductivo: una experiencia cotidiana**

El proceso iterativo inducción-deducción, dirigido por la estructura del cerebro humano y conocido desde los tiempos de Aristóteles, forma parte de nuestra experiencia cotidiana. Por ejemplo, el ingeniero químico Peter Minerex\* aparca cada

\* ¿Adivina por qué se llama Peter Minerex?



**Figura 1.1.** Proceso iterativo de aprendizaje.

mañana su coche en un espacio asignado del parking. Una tarde, al salir del trabajo, se encuentra siguiendo la siguiente secuencia de aprendizaje deductiva-inductiva:\*

*Modelo:* Hoy es un día como otro cualquiera.

*Deducción:* Mi coche estará en su sitio de aparcamiento.

*Datos:* No está.

*Inducción:* Alguien debe habérselo llevado.

*Modelo:* Me han robado el coche.

*Deducción:* Mi coche no estará en el aparcamiento.

*Datos:* No. ¡Está allí!

*Inducción:* Alguien lo cogió y lo condujo de vuelta hasta allí.

*Modelo:* El ladrón lo cogió y lo devolvió.

*Deducción:* Mi coche tendrá algo roto.

*Datos:* Está intacto y no está cerrado con llave.

*Inducción:* Lo cogió alguien que tenía las llaves.

*Modelo:* Mi esposa utiliza mi coche.

*Deducción:* Probablemente ella ha dejado una nota.

*Datos:* Sí. Aquí está la nota.

Suponga que desea resolver un problema concreto y que las especulaciones iniciales le llevan a algunas ideas relevantes. A continuación buscará datos que respalden mejor o que refuten esta teoría. Esto puede ser algo como realizar una búsqueda en sus archivos o en los de la web, dar un paseo hasta la biblioteca, asistir a una reunión para una “lluvia de ideas” con sus colaboradores y directivos, la observación pasiva de un proceso o una experimentación activa. En cualquier caso, los hechos y los datos reunidos a veces confirmarán su conjetura, en cuyo caso habrá resuelto su problema. Sin embargo, a menudo parecerá que su idea inicial solamente es parcialmente correcta o quizá totalmente equivocada. En los dos últimos casos, la diferencia entre la deducción y la realidad le conducirá a seguir profundizando. Esto le puede conducir a una idea modificada o totalmente diferente y a analizar de nuevo sus datos actuales o a generar nuevos datos.

\* Nota del traductor: A lo largo del texto, los autores juegan con el doble sentido que tienen en inglés los nombres de los personajes.

Los humanos tenemos un cerebro bilateral, específicamente diseñado para realizar este tipo de continua conversación deductiva-inductiva. Aunque este proceso iterativo puede conducir a una solución de un problema, no se debe esperar que la naturaleza de la solución, o el camino que ha seguido para alcanzarla, sea único.

### Un ejemplo químico

La química Rita Stoveing\* tuvo la siguiente idea:

- Modelo** A causa de ciertas propiedades de un catalizador recientemente descubierto, su presencia en una determinada mezcla de reacción probablemente podría inducir a que un compuesto químico *A* se combinara con otro compuesto *B* para formar, con un alto rendimiento, un valioso producto *C*.
- Deducción** Rita tiene una hipótesis tentativa y deduce sus consecuencias, pero no dispone de los datos para verificarla o rechazarla. Tras largas conversaciones con colegas, una cuidadosa consulta bibliográfica y búsquedas adicionales con el ordenador, sabe que nadie ha realizado dicha reacción. Por lo tanto, decide efectuar algunos experimentos apropiados. Basándose en sus conocimientos de Química, lleva a cabo un experimento en condiciones de reacción cuidadosamente seleccionadas. En particular, supone que una temperatura de 600 °C es un valor adecuado para realizar el ensayo.
- Datos** El resultado del primer experimento es decepcionante. El esperado producto *C* es un líquido incoloro e inodoro, y lo que ha obtenido es un producto negro y alquitranado que contiene menos de un 1 % del esperado producto *C*.
- Inducción** En este momento, el modelo inicial y los datos no concuerdan. Ese problema tiene preocupada a Rita y por la noche está algo taciturna con su esposo, Peter Minerex; pero a la mañana siguiente, en la ducha, empieza a pensar lo siguiente: Quizá el producto *C* primero se haya formado con un gran rendimiento, pero posteriormente se haya descompuesto.
- Modelo** La teoría sugiere que las condiciones de reacción fueron demasiado severas.
- Deducción** Una menor temperatura habría conducido a un rendimiento satisfactorio de *C*. Rita decide hacer dos nuevos experimentos, en el primero reduce la temperatura de reacción a 550 °C, y en el segundo, a 500 °C.
- Datos** El producto obtenido en ambos casos es más claro y menos alquitranado. El experimento realizado a 550 °C produjo un 4 % del producto esperado *C*, y el realizado a 500 °C, un 17 %.
- Inducción** A partir de estos resultados y de sus conocimientos teóricos sobre este tipo de reacciones, Rita decide que podría continuar la

\* ¿Adivina por qué se llama Rita Stoveing?

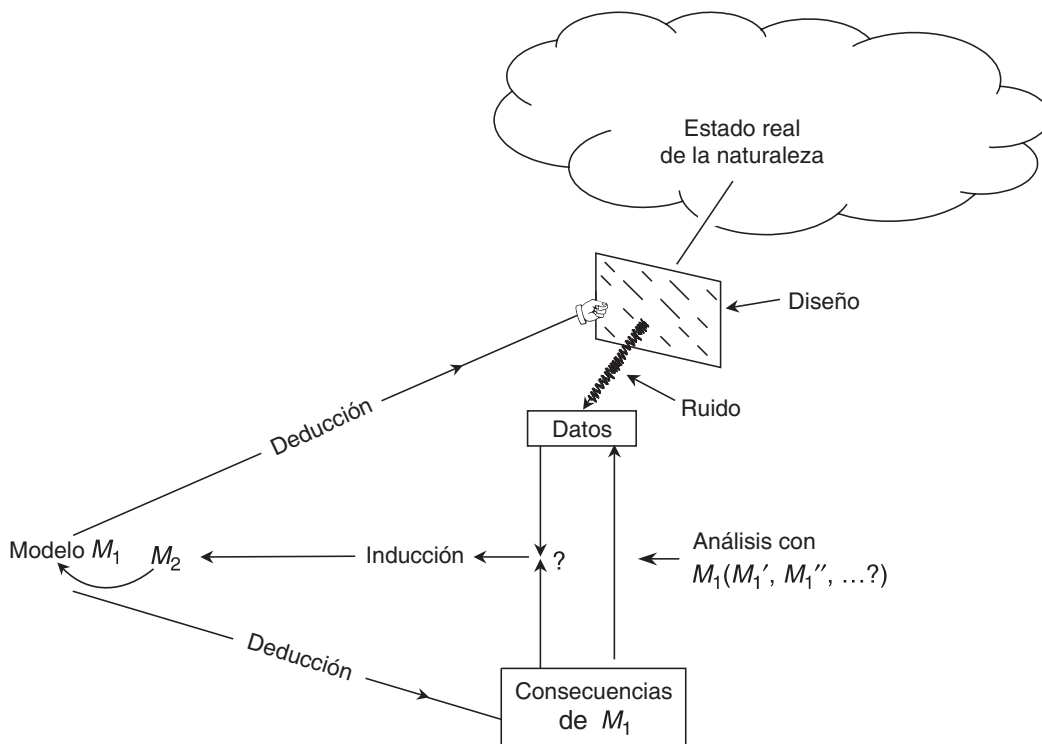
experimentación no sólo variando la temperatura sino también cambiando otros factores (como concentración, tiempo de reacción y cantidad de catalizador) y estudiar otras características del producto (por ejemplo, nivel de las diferentes impurezas o la viscosidad).

Para evaluar de forma económica este tipo de sistemas complejos, Rita tendrá que utilizar el diseño de experimentos y el análisis estadístico. Más adelante en este texto se explicará cómo continuar la investigación utilizando herramientas estadísticas.

**Ejercicio 1.1.** Describir un ejemplo real o hipotético de aprendizaje iterativo en su campo de trabajo (ingeniería, agricultura, biología, genómica, educación, medicina, psicología, etcétera).

### Un ciclo de retroalimentación

En la figura 1.2 se muestra la iteración deductiva-inductiva como un proceso de realimentación. A la izquierda del diagrama está representada como  $M_1$  la idea (hipótesis, modelo) inicial. Por *deducción* considera las consecuencias esperadas de  $M_1$ ; es decir, qué puede ocurrir si  $M_1$  es cierto y qué puede ocurrir si  $M_1$  no se cumple. También *deduce* qué datos necesita para investigar  $M_1$ . El plan (diseño) experimental elegido se representa por un marco a través del cual se pueden ver algunos aspectos del estado real de la naturaleza. Tenga en cuenta que, cuando realiza un experimento, el marco lo selecciona usted\* (es *su* mano sujetando el marco). Los



**Figura 1.2.** Solución iterativa de un problema como un ciclo de retroalimentación.

\* Naturalmente, esto no es cierto para los datos obtenidos por casualidad sobre los que no se tiene ningún control.

datos obtenidos representan algún aspecto (aunque no siempre sea un aspecto de interés) de la realidad enmascarado por un mayor o menor “ruido”; es decir, por el error experimental. Se puede comparar el análisis de los datos con las consecuencias esperadas (deducidas) de  $M_1$ . Si concuerdan, el problema está resuelto. Si no concuerdan, la forma en que discrepan le puede permitir descubrir cómo modificar su idea inicial  $M_1$ . Si utiliza los mismos datos puede considerar análisis alternativos, así como posibles modificaciones del modelo original  $M_1'$ ,  $M_1''$  ... Puede resultar evidente que su idea original sea equivocada o que al menos necesita ser considerablemente modificada. En tal caso, ahora podrá postular un nuevo modelo  $M_2$ . Esto requerirá la selección de un diseño experimental nuevo o aumentado para descubrir aspectos adicionales y posiblemente diferentes de la realidad. Todo ello puede conducir a una solución satisfactoria del problema, o alternativamente proporcionar pistas que indiquen la mejor manera de proseguir la investigación.

## 1.2. CONSIDERACIONES IMPORTANTES

### Conocimiento del problema

Tenga presente la importancia del conocimiento del problema para considerar y explorar modelos provisionales y para saber dónde buscar ayuda.

### El camino hacia la solución de un problema no es único

Cuando por primera vez Peter Minerex echó en falta su coche pudo fácilmente haber reaccionado de forma diferente. Por ejemplo, pudo haber telefoneado inmediatamente a la policía y de este modo iniciar diferentes (aunque quizá no tan efectivos) caminos de descubrimiento. De forma similar, en la anterior investigación química, otro investigador, tras haber estudiado los resultados discordantes, podría haber decidido explorar una ruta química completamente diferente para obtener el producto deseado. El objetivo es *converger* hacia una solución satisfactoria, aunque el punto de partida y el camino (y algunas veces la naturaleza de la solución) sean diferentes para los distintos investigadores.

El juego de las “veinte preguntas” ilustra tales consideraciones. El objetivo del juego es identificar un objeto desconocido haciendo no más de 20 preguntas, cada una de ellas sólo tiene una de dos posibles respuestas. Supongamos que lo que se ha de adivinar es el nombre del escritor colombiano Gabriel García Márquez\* y la clave inicial es *animal o vegetal*. Ante esta pregunta inicial, un equipo hábil puede proceder de la siguiente forma:

EQUIPO A	
Pregunta	Respuesta
¿Animal o vegetal?	Animal
¿Racional?	Sí
¿Hombre o mujer?	Hombre
¿Vive actualmente?	Sí

\* N. del T. En el original el objeto a adivinar era el sombrero de copa de Abraham Lincoln. Un latino difícilmente habría adivinado lo del sombrero. Las preguntas son por tanto adaptadas al contexto.

¿Europeo?	No
¿Americano?	Sí
¿De América del Norte?	No
¿Centroamericano?	No
¿Futbolista?	No
¿Pertenece al mundo de la cultura?	Sí
¿Relacionado con la música?	No
¿Escritor?	Sí
¿Juan Carlos Onetti?	No
¿Ernesto Sábato?	No
¿Argentino?	No
¿Mario Vargas Llosa?	No
¿Gabriel García Márquez?	Sí

Pero otro equipo, entrenado en el juego, seguramente podría haber seguido un camino diferente. Por ejemplo:

EQUIPO B	
Pregunta	Respuesta
¿Animal o vegetal?	Animal
¿Hombre o mujer?	Hombre
¿Vive?	Sí
¿Americano?	Sí
¿Relacionado con la música?	No
¿Futbolista?	No
¿Literato?	Sí
¿De Sudamérica?	Sí
¿Peruano?	No
¿Premio Nobel?	Sí
¿Gabriel García Márquez?	Sí

El juego sigue el proceso iterativo mostrado en las figuras 1.1 y 1.2, y el “diseño” es la selección de las preguntas. La conjetura a cada etapa del proceso, refinada progresivamente, conduce a la selección adecuada de una pregunta con nuevos datos que a su vez sugieren una adecuada modificación de la conjetura. Los dos equipos A y B siguen diferentes caminos, pero ambos llegan a la solución correcta, dado que los datos en que se basaron eran los verdaderos.

Las cualidades necesarias para jugar este juego son: (a) el conocimiento del tema (en este caso el juego) y (b) el conocimiento de la estrategia. Respecto a la estrategia, es bien sabido que en cada etapa se plantea una pregunta que divida los objetos no eliminados previamente en aproximadamente dos mitades equiprobables. En este ejemplo ambos equipos trataron de hacerlo con preguntas como “¿Hombre o mujer?” o “¿Europeo o americano?”\*

\* Mediante el juego de las 20 preguntas es posible adivinar una palabra sobre un diccionario que contenga un millón de palabras. Las preguntas empiezan: “¿La palabra está en la primera mitad del diccionario o en la segunda?”. Si la respuesta es por ejemplo “En la primera mitad”, la siguiente pregunta es “Y ahora, ¿en la primera mitad o en la segunda?”. Y así sucesivamente. Observe que  $2^{20} \gg 10^6$ .

La estrategia de este juego es muy similar a los métodos estadísticos en investigación científica. Observe que sin conocimiento de la estrategia siempre es posible jugar, quizá no demasiado bien; mientras que sin conocimiento del problema resulta absolutamente imposible hacerlo. No obstante, observe que es mucho mejor utilizar *ambos*, un buen conocimiento del problema y una estrategia adecuada. Análogamente es posible realizar una investigación sin estadística, pero resulta imposible realizarla sin conocimiento del problema. Sin embargo, el uso de métodos estadísticos acelera la convergencia a la solución, y de esta forma un buen investigador se convierte aún en un mejor investigador.

### 1.3. EL PROBLEMA DEL INVESTIGADOR Y LOS MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Las tres fuentes de dificultad a las que se enfrenta el investigador son la *complejidad*, el *error experimental* y la confusión entre *correlación* y *causalidad*.

#### Complejidad

En la experimentación para el descubrimiento o la mejora de un proceso\* por lo general es necesario considerar simultáneamente la influencia de varias “variables de entrada”, tales como temperatura, velocidad de alimentación, concentración y catalizador sobre un conjunto de “variables de salida”, tales como rendimiento, contenido en impurezas y coste económico. Las variables de entrada controlables se denominan *factores* y las variables de salida *respuestas*. Si se estudia cómo mejorar un proceso, la primera pregunta es:

“¿Qué hace qué a quién?”

Con  $k$  factores y  $p$  respuestas existen  $k \times p$  posibilidades que se han de considerar. Además, mientras que un determinado conjunto de factores (por ejemplo, temperatura y presión) pueden provocar un cambio en una respuesta (por ejemplo, rendimiento), otro conjunto de factores, similar o diferente al anterior (por ejemplo, temperatura y concentración) puede influir sobre una respuesta diferente (por ejemplo, pureza). Entonces resulta necesario llegar a un compromiso entre un alto rendimiento satisfactorio y una pureza adecuada. Así mismo, varios factores pueden interactuar en su influencia sobre una respuesta determinada. Por ejemplo, el cambio en el rendimiento provocado por un determinado cambio de la temperatura puede a su vez ser distinto a diferentes concentraciones. El tener en cuenta todas estas posibilidades sitúa al investigador frente a un desafío abrumador. Las estrategias de realizar la experimentación por prueba y ajuste, o la de realizar “cambiar un factor a la vez” hacen que sea poco probable alcanzar un buen resultado rápida y económicamente.

El uso del diseño estadístico de experimentos hace posible, minimizando la influencia del error experimental, ensayar varios factores simultáneamente proporcionando una clara imagen de cómo influyen sobre la respuesta tanto aislados como conjuntamente. Esta información puede llevarnos a la solución empírica de problemas, pero también puede llegar a mucho más. Con los resultados de un diseño

\* El término proceso se utiliza en un sentido general. Así, un proceso puede ser un método analítico o de fabricación de un producto o algún procedimiento médico.

experimental bien realizado, un especialista en la materia profundizará su razonamiento de las formas siguientes: “Cuando veo cómo  $x_3$  afecta a  $y_1$  e  $y_2$ , y como  $x_1$  y  $x_2$  interaccionan en su efecto sobre  $y_3$ , esto me sugiere qué y cómo es lo que está ocurriendo y qué es lo que debo hacer a continuación”. Una explicación teórica puede surgir a partir de una representación empírica.

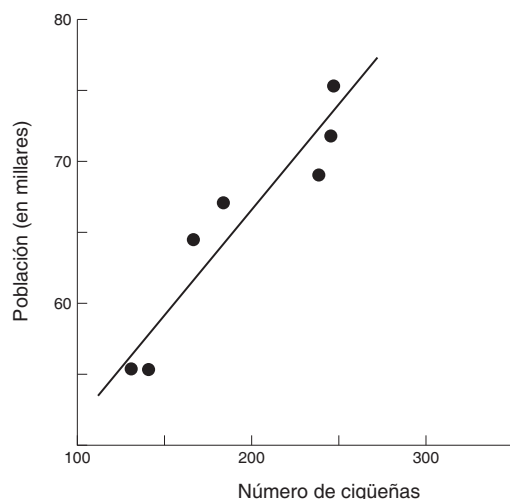
### Error experimental

La variabilidad de una respuesta no atribuible a influencias conocidas se denomina *error experimental*. Dado que el error experimental es inevitable, resulta esencial saber cómo abordarlo. Por lo general, solamente una pequeña parte del error experimental se debe a errores de medición. Por el contrario, lo más frecuente es que la mayor parte provenga de variaciones de las materias primas, del muestreo y de las condiciones de trabajo. Un buen diseño experimental ayuda a evitar que los efectos reales queden enmascarados por el error experimental, y a la inversa evita que el investigador concluya erróneamente la existencia de efectos que no existen.

Mediante el uso adecuado del análisis estadístico de un diseño de experimentos se puede reducir en gran manera la confusa influencia del error experimental\*. Más aún, el análisis estadístico proporciona *medidas de precisión* de las cantidades estimadas objeto de nuestro estudio (tales como diferencias en las medias o tasas de variación). Esto hace posible juzgar si existe evidencia sólida de la existencia de efectos reales y, de esta forma, incrementar la probabilidad de que el investigador siga un camino correcto y no uno falso.

### Confusión entre correlación y causalidad

La figura 1.3 muestra la población de Oldenburg al final de cada año, en siete años<sup>†</sup>, frente al número de cigüeñas observadas en ese año. Aunque en este ejemplo pocas personas establecerían la hipótesis de que el aumento observado del número de ci-



**Figura 1.3.** Número de cigüeñas frente a la población de Oldenburg.

\* Otra forma de expresarlo es afirmar que el diseño experimental puede aumentar mucho la relación señal-a-ruido.

<sup>†</sup> Los datos cubren el periodo 1930-1936. Ver *Ornithologische Monatsberichte*, **44**, N.º 2, Jahrgang, 1936, Berlin y **48**, N.º 1, Jahrgang, 1940 Berlin, y *Statistisches Jahrbuch Deutscher Gemeinden*, 27-33, Jahrgang, 1932-1938, Gustav Fischer, Jena. Agradecemos a Lars Pallesen estas referencias.

güeñas *causa* el incremento observado de la población, en ocasiones los investigadores, en otros contextos, cometen este tipo de error. La correlación entre dos variables  $Y$  y  $X$  se da a menudo porque *ambas* variables están asociadas con un tercer factor  $W$ . En el ejemplo de las cigüeñas, dado que la población humana  $Y$  y el número de cigüeñas  $X$  aumentan ambas a lo largo del periodo de siete años considerado, el factor común  $W$  en este caso es el *tiempo*.

**Ejercicio 1.2.** Proponga otros ejemplos en los que exista una correlación pero no exista causalidad.

## 1.4. UNA TÍPICA INVESTIGACIÓN

Como ejemplo del proceso iterativo de aprendizaje y para, al mismo tiempo, dar una imagen previa de lo que se va a exponer en el texto, presentamos una investigación imaginaria dirigida a mejorar la calidad del agua potable. Nuestros investigadores son la química Rita Stoveing y el ingeniero químico Peter Minerex. A medida que vaya leyendo lo que sigue, piense en los problemas estadísticos idénticos a los que se pueden presentar los investigadores en cualquiera de las ciencias experimentales.

### El problema

Evidentemente, en este planeta solamente existe una cantidad limitada de agua potable que necesariamente tenemos que usar y reutilizar una y otra vez. La siguiente investigación fue necesaria debido a que un determinado suministro de agua contiene un nivel de nitratos excesivamente alto y totalmente inaceptable. Stoveing y Minerex han desarrollado una nueva resina de intercambio iónico que adsorbe el nitrato contaminante. Lo interesante de esa nueva resina es que resulta específica para nitratos, que potencialmente es más económica y fácil de regenerar que las otras resinas actualmente disponibles en el mercado. Desgraciadamente, en condiciones de laboratorio sólo se puede preparar en cantidades experimentales. Se ha decidido que sería un buen objetivo el realizar nuevas investigaciones antes de que se pueda fabricar un producto viable comercialmente. El siguiente esquema muestra cómo, a medida que avanza su investigación, esto les lleva a considerar diferentes aspectos y a utilizar diversas técnicas estadísticas\* con diferentes grados de sofisticación.

### Ciclos iterativos de investigación

Rita y Peter saben que los resultados obtenidos en experimentos realizados en condiciones de trabajo similares pueden variar considerablemente. Por lo tanto, antes de iniciar su investigación han realizado el máximo esfuerzo para estabilizar los procedimientos y para reducir la variabilidad del proceso. Además, han decidido estudiar varios factores y observar diferentes respuestas, y a fin de que el estudio sea eficiente y económico utilizarán de forma extensiva los métodos estadísticos.

\* Esta investigación imaginaria tiene la propiedad de que en las sucesivas iteraciones utiliza la mayoría de las técnicas que se exponen en este libro y que aparecen aproximadamente en el mismo orden. Desde luego, esto no es más que un recurso pedagógico. No obstante muchas investigaciones pasan por varias fases de complejidad estadística que en cierta forma son parecidas a las que se exponen aquí.

Comentario Ambos investigadores han seguido un curso de estadística, pero actualmente lo tienen algo olvidado.

#### ITERACIÓN I

Pregunta ¿Dónde podemos encontrar un breve resumen de los principios estadísticos elementales?

Diseño y análisis Capítulo 2: Fundamentos.

Descubrimientos El estudio del capítulo proporciona la revisión requerida y les prepara para continuar el estudio.

#### ITERACIÓN II

Comentario Minerex cree –y Stoveing, no– que, si se utiliza una calidad muy pura –y más costosa– de la resina, se mejorará el rendimiento.

Pregunta ¿Cómo comparar su resina “común” con la de “alta pureza” más costosa?

Diseño y análisis Capítulo 3: Comparación de dos tratamientos.

Descubrimientos El rendimiento de la resina de alta pureza, más costosa, es prácticamente igual al de la resina “común”. (¡Rita tenía razón!)

#### ITERACIÓN III

Comentario Minerex ha descubierto que estaba equivocado respecto a la resina de alta pureza, pero la resina de calidad “común” todavía le parece prometedora. Por ello deciden comparar las muestras de laboratorio de su nueva resina con cinco resinas estándar disponibles en el mercado.

Pregunta ¿Cómo comparar su resina “común” con las cinco resinas disponibles en el mercado?

Diseño y análisis Capítulo 4: Comparación de más de dos tratamientos.

Descubrimientos Las muestras de laboratorio de su nueva resina son tan buenas como las disponibles en el mercado y quizá mejores que alguna de ellas.

#### ITERACIÓN IV

Comentario Se ha comprobado que la nueva resina funciona tan bien como sus competidoras. Sin embargo, en las condiciones que se ha considerado para realizar una fabricación económicamente viable, la eliminación de nitrato resulta insuficiente para alcanzar el valor que establece la normativa aplicable al agua potable.

Pregunta ¿Cuáles son los factores que más influyen en la eliminación de nitrato? ¿Podrían mejorar la eliminación de nitrato algunas modificaciones del equipo que afecten a factores como el caudal, la profundidad de lecho y el tiempo de regeneración de la resina?

Diseño y análisis Capítulos 5, 6, 7, y 8: Estudios en los que se utilizan diseños factoriales y factoriales fraccionados.

Descubrimientos Si se realizan las adecuadas modificaciones del equipo se pueden obtener niveles de nitrato suficientemente bajos.

#### ITERACIÓN V

Comentario La empresa de Rita y Peter llega a la conclusión de que la fabricación de esa nueva resina es posible y de que podría ser rentable. Para estudiarlo se construye una planta piloto.

Pregunta ¿Cómo afectan los niveles de las variables del proceso de fabricación a la calidad y el coste de la nueva resina?  
¿Cuáles son los mejores niveles?

Diseño y análisis Capítulos 10, 11 y 12: Método de mínimos cuadrados, modelado multidimensional y ajuste de superficies de respuesta.

Descubrimientos La investigación en la planta piloto indica que, si se trabaja en los niveles adecuados de las variables de proceso, se puede fabricar la resina con una calidad satisfactoria y a un coste razonable.

#### ITERACIÓN VI

Comentario Antes de que el proceso sea transferido a la fase de producción deben resolverse los problemas de muestreo y medición.

Pregunta ¿Cómo se pueden perfeccionar los métodos de muestreo y medición para determinar de forma fiable valores de las características de la nueva resina?

Diseño y análisis Capítulo 9: Fuentes de variación múltiples.

Descubrimientos Es posible identificar y medir los componentes de la variabilidad en el muestreo y los análisis químicos del producto. Sobre esta información se puede elaborar un protocolo de muestreo y medición que minimice la varianza de las determinaciones al mínimo coste.

#### ITERACIÓN VII

Comentario Antes de que la nueva resina sea comercializada se ha de estudiar su comportamiento en las diferentes condiciones experimentales en las que se puede encontrar en la realidad. Es necesario diseñar el proceso de obtención de la resina para que sea poco sensible a las variaciones del entorno en el que se utilice la resina.

Pregunta ¿Cómo se puede diseñar el producto para que la adsorción de nitrato no se vea afectada por factores que pueden variar según su diversa aplicación, como por ejemplo el pH y la dureza del agua de suministro o la presencia de trazas de posibles impurezas?

Diseño y análisis	Capítulo 13: Diseño de productos y procesos robustos.
Descubrimientos	Es posible diseñar un proceso que asegure que la nueva resina fabricada sea insensible al cambio del pH, a la dureza del agua y a cantidades no excesivas de impurezas posibles.

## ITERACIÓN VIII

Comentario	El proceso de regeneración de la resina se realizará automáticamente mediante un sistema que contiene numerosos componentes electrónicos y mecánicos. Se sabe que pequeñas variaciones del proceso de fabricación de dichos componentes pueden afectar el rendimiento del sistema.
Pregunta	¿Cómo se puede diseñar el sistema de regeneración de la resina para que los pequeños cambios en las características de fabricación de los componentes no afecten excesivamente al rendimiento del sistema?
Diseño y análisis	Capítulo 13: Diseño de productos y procesos robustos.
Descubrimientos	Se encontró que en algunas circunstancias puede ser necesario utilizar costosos componentes con unas especificaciones ajustadas; y, en otras circunstancias, se pueden sustituir por otros componentes más económicos con unas especificaciones menos restrictivas. Para esto se desarrolló un sistema de alto rendimiento cuyo coste es bajo.

## ITERACIÓN IX

Comentario	La planta a gran escala no es fácil de controlar.
Pregunta	¿Cómo se puede alcanzar un mejor control del proceso?
Diseño y análisis	Capítulo 14: Control de procesos, previsiones y series temporales.
Descubrimientos	Se puede alcanzar un adecuado control del proceso mediante técnicas de depurado, seguimiento y retroalimentación simple del proceso.

## ITERACIÓN X

Comentario	Las condiciones de trabajo iniciales del proceso para la planta a gran escala provienen de experimentos a nivel de planta piloto.
Pregunta	¿Cómo se pueden mejorar las condiciones de trabajo para el proceso a gran escala?
Diseño y análisis	Capítulo 15: Proceso de Operaciones evolutivas.
Descubrimientos	Trabajar de forma secuencial o evolutiva proporciona una mejora continua del proceso.

Lo expuesto anteriormente no agota en absoluto la aplicación de los métodos estadísticos que pueden ser necesarios para producir un producto provechoso y comercializable. Por ejemplo, puede que sea necesario determinar la dimensión del posible mercado y comparar la calidad de la nueva resina respecto a productos similares de la competencia. Del mismo modo quizá convenga organizar y supervisar los controles de planificación e inventario.

## 1.5. CÓMO UTILIZAR LAS TÉCNICAS ESTADÍSTICAS

Todos los problemas reales presentan particularidades que se han de estudiar antes de adoptar métodos que las resuelvan. En consecuencia, cada nuevo problema se debe tratar por sí mismo y con cierto respeto. El precipitarse demasiado puede conducir a errores, tales como obtener la solución correcta del problema equivocado.

### **Averiguar todo cuanto se pueda sobre el problema**

Hágase preguntas hasta que esté convencido de que comprende totalmente el problema y hasta que sea consciente de los recursos disponibles para realizar el estudio. A continuación exponemos algunas de las preguntas que debe plantearse y conseguir respuesta. ¿Cuál es el objetivo de la investigación? ¿Quién es el responsable? Voy a describir el problema: ¿Es correcto? ¿Dispone de datos anteriores? ¿Cómo se han recogido estos datos? ¿En qué orden? ¿Qué días? ¿Por quién? ¿Cómo? ¿Puedo ver los datos? ¿Cómo se midieron las respuestas? ¿Se han revisado recientemente los instrumentos necesarios? ¿Existen otros datos similares a estos? ¿Cómo trabaja el equipo? ¿Qué lo hace funcionar así? ¿Puedo verlo? ¿Puedo verlo trabajando? ¿Cuánto se sabe de la teoría de este fenómeno? Si se trata de un proceso de fabricación, ¿cuáles son los protocolos de muestreo, medición y ajuste?

### **No olvidar el conocimiento no estadístico**

Cuando vaya a hacer “estadística” no descuide lo que usted y sus colaboradores ya saben respecto a la materia en estudio. Las técnicas estadísticas son inservibles a menos que se combinen con el apropiado conocimiento del tema al que se aplican y con la experiencia previa. Son un complemento al conocimiento del tema, nunca un sustituto.

### **Definir los objetivos**

En cualquier investigación es de suma importancia: (1) *definir claramente los objetivos* del estudio; (2) asegurarse de que todos los implicados en el estudio están de acuerdo con dichos objetivos; (3) asegurarse de que se dispone del equipo necesario para llevar a cabo la investigación propuesta: las instalaciones y los servicios, el personal científico, el tiempo, el presupuesto económico y los servicios de gestión; (4) estar de acuerdo con los criterios que determinarán cuándo se han alcanzado los objetivos, y (5) tener previsto que, si los objetivos cambian, todas las partes interesadas lo conozcan y estén de acuerdo con los nuevos objetivos y criterios. No prestar suficiente atención a estos aspectos puede conducir a serias dificultades y, algunas veces, al desastre.

### Aprender los unos de los otros: interrelación entre teoría y práctica

Igual que los investigadores pueden beneficiarse mucho del uso de los métodos estadísticos, lo inverso es incluso más cierto. Un experto en estadística puede aprender y beneficiarse muchísimo de sus discusiones con ingenieros, químicos, biólogos o especialistas en otras materias. La generación de ideas y técnicas realmente nuevas en estadística suele ser el resultado de un serio interés por los problemas prácticos. Sir Ronald Fisher, el padre de la mayoría de ideas de este texto, fue un científico e investigador al que le gustaba trabajar en estrecha colaboración con otros investigadores. Para él no existía mayor placer que discutir sus problemas con otros científicos frente a un vaso de cerveza. Lo mismo le ocurría a su amigo William S. Gosset (más conocido como “Student”), del que un colega suyo comentó\*: “Para muchos en el mundo de la estadística “Student” era considerado un asesor estadístico de las fábricas de cerveza Guinness; para otros, era un cervecero que dedicaba su tiempo libre a la estadística . . . Aunque algo cierto hay en ambas afirmaciones, se olvidan del punto central, que era la íntima relación entre su investigación estadística y los problemas prácticos que tenía que resolver.” La obra de Gosset y Fisher refleja la característica destacada de la ciencia: la interrelación entre teoría y práctica. Sus éxitos como científicos y su habilidad para desarrollar técnicas estadísticas útiles estaban íntimamente relacionados con su profunda implicación en el trabajo experimental.

### REFERENCIAS Y LECTURAS ADICIONALES

Box, G. E. P. (1987) “In memoriam: William G. Hunter, 1937-1986”, *Technometrics*, **29**, 251-252.

Dos textos importantes sobre la utilización de los métodos estadísticos en la investigación científica son:

Fisher, R. A. (1925) *Statistical Methods for Research Workers*, Edinburg and London, Oliver and Boyd.

Fisher, R. A. (1935) *The Design of Experiments*, Edinburg and London, Oliver and Boyd.

Para una mayor información sobre métodos y asesoramiento estadístico consulte los siguientes artículos y la bibliografía citada en ellos:

Derr, J. (2000) *Statistical Consulting: A Guide to Effective Communication*, Australia, Duxbury.

Chatfield, C. (1995) *Problem Solving: A Statistician’s Guide*, London, Chapman and Hall.

Bajaria, H. J. y Copp, R. P. (1991) *Statistical Problem Solving*, Garden City, MI, Multi-face Publishing.

Hoadley, A. y Kettnering J. (1990) “Communications between statisticians and engineers/physical scientists”, *Technometrics*, **32**, 243-274.

\* L. McMullen en el prólogo de *Student’s Collected Papers*, editado por E. S. Pearson y J. Wishart, University Press Cambridge, London, 1942, editado por Biométrica Office, University College, London.

Kimball, A. W. (1957) Errors of the third kind in statistical consulting. *J. Am. Statist. Assoc.*, **57**, 133-142.

Daniel, C. (1969) "Some general remarks on consultancy in statistics", *Technometrics*, **11**, 241-245.

Ejemplos de "correlación sin sentido" parecidos al expuesto en este capítulo sobre las cigüeñas y la tasa de natalidad pueden encontrarse en:

Hooke, R. (1983) *How to tell the Liars from the Statisticians*, Dekker, New York.

Huff, D. (1954) *How to Lie with Statistics*, Norton, New York.

Tufte, R. (1983) *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphics Press, New York.

Para ilustración y debate del proceso iterativo de la experimentación consulte por ejemplo:

Box, G. E. P. (1976) Science and statistics, *J. Am. Statist. Assoc.*, **71**, 791-799.

Crouch, T. (2003) *The Bishop's Boys*, W. W. Norton, New York. (La experimentación secuencial de los hermanos Wright en el diseño y el desarrollo del primer aeroplano.)

Deming, W. E. (1953) "On the distinction between enumerative and analytic surveys", *J. Am. Statist. Assoc.*, **48**, 244-255.

Medawar, P. B. (1990) *Advice to a Young Scientist*, Sloan Science Series, Basic Books, New York.

Watson, J. D. (1968) *The Double Helix: A Personal Account of the Discovery of the Structure of DNA*, Touchstone: Simon & Schuster, New York.

Algunas referencias útiles sobre cálculo estadístico son:

Ross, I. y Gentleman, R. (1996) R, "A language for data analysis and graphics", *J. Computat. Graphical Stat.*, **5**(3), 299-314.

R Development Core Team. (2005) *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>

*NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*, URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>, 2005.

Algunos proveedores de programas estadísticos útiles para los lectores de este texto son:

*NIST/Dataplot* URL: <http://www.itl.nist.gov/div898/software.htm>, 2005.

*SCA: Scientific Computing Associates* URL: <http://www.scausa.com>

*JMP: The Statistical Discovery Software* URL: <http://www.jmp.com>

*MINITAB: Statistical Software* URL: <http://www.minitab.com>

*R: A Language and Environment for Statistical Computing* URL: <http://www.R-project.org>

*S-PLUS: Insightful S-PLUS* URL: <http://www.insightful.com/products/splus>

**PREGUNTAS DEL CAPÍTULO 1**

1. ¿Qué se entiende por la naturaleza iterativa del aprendizaje?
2. ¿De qué manera los estadísticos pueden ser útiles a los investigadores?
3. ¿Qué se consigue con un buen análisis estadístico? ¿Y con un buen diseño estadístico? De los dos, ¿cuál cree que es el más importante?
4. ¿Cuáles son las tres dificultades comunes de la investigación experimental?
5. ¿Puede dar ejemplos –si es posible, de su propio ámbito– de confusión real –o de controversia– que hayan surgido por una o más de estas dificultades?
6. De este texto, ¿qué técnicas espera que le sean más útiles?
7. ¿Cómo debe utilizar las técnicas de este libro?
8. ¿Puede citar una investigación experimental que (a) fue iterativa y (b) que no lo fue?
9. Lea la historia del desarrollo de un determinado campo de la ciencia en un periodo de tiempo (por ejemplo, los libros *The Double Helix*, de J. D. Watson y *The Bishop's Boys* –los hermanos Wright– de T. D. Crouch, 1989). ¿Cómo se relacionan estos descubrimientos con lo expuesto en este capítulo sobre el proceso iterativo de una investigación experimental? ¿Puede descubrir cómo la confrontación de hipótesis y datos conduce a nuevas hipótesis?