

**Ricardo Fernández Escobar  
Antonio Trapero Casas  
Juan Domínguez Jiménez**

# **EXPERIMENTACIÓN AGRARIA**



© Ricardo Fernández Escobar, Antonio TRapero Casas, Juan Domínguez Jiménez, 2018

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos  
Internet: <http://www.editdiazdesantos.com>  
E-mail: [ediciones@editdiazdesantos.com](mailto:ediciones@editdiazdesantos.com)

ISBN: 978-84-9052-092-5  
Depósito Legal: M-35608-2017

Fotocomposición y diseño de cubierta: P55 Servicios Culturales

Impresión:  
Encuadernación:

Printed in Spain - Impreso en España

## ► AUTORES

### **Ricardo Fernández Escobar**

Catedrático de Pomología

Departamento de Agronomía. Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros Agrónomos y de Montes

Universidad de Córdoba

### **Antonio Trapero Casas**

Catedrático de Patología Vegetal

Departamento de Agronomía. Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros Agrónomos y de Montes

Universidad de Córdoba

### **Juan Domínguez Jiménez**

Investigador Coordinador

Área de Producción Agraria

IFAPA, Centro “Alameda del Obispo”, Córdoba



# PRÓLOGO

---

Una de las mayores dificultades que se le presenta a un estudiante cuando ha de abordar un trabajo de investigación es, probablemente, el tratamiento estadístico de los datos. Esto suele ser así por dos motivos: el primero porque es consciente de su escasa formación en esta materia; y el segundo porque suele ser inconsciente de que el problema, normalmente, se presenta antes de comenzar el experimento, pero es en el momento del análisis de los resultados cuando ha aparecido la dificultad. El problema, no obstante, es general y no exclusivo de los estudiantes, pues muchos de los artículos que son rechazados en revistas científicas de impacto en el campo de la agronomía (y también en otros campos afines), lo son debido a un mal planteamiento de los experimentos o a un mal análisis estadístico de los datos. En el ámbito profesional el problema se agrava aún más, pues muchos técnicos con responsabilidad en la transferencia de tecnología, extensionistas agrarios o responsables de la dirección técnica de empresas productoras de insumos o de explotaciones agrarias, no suelen aplicar métodos estadísticos sencillos para determinar si una técnica nueva, un producto fitosanitario o una nueva variedad superan o no a lo habitual de la zona. El valor de la experiencia para juzgar la bondad de nuevas técnicas o las ventajas de un nuevo material suelen anteponerse al rigor de un análisis matemático, en muchas ocasiones por falta de pericia en el manejo de estos métodos.

Esta obra se ha concebido para aliviar las dificultades de investigadores, técnicos y estudiantes, poniendo a su disposición una descripción y discusión de procedimientos para el diseño y establecimiento de experimentos, así como para facilitar el cálculo, el análisis y la interpretación de los datos de una forma sencilla y práctica, sin grandes exigencias en conocimientos matemáticos. En definitiva, se ha tratado de manejar conceptos y métodos

disponibles en la actualidad para un correcto planteamiento de un experimento o de una simple prueba comparativa y del análisis e interpretación de los datos. Para facilitar la comprensión de los procedimientos se expone el cálculo manual del análisis de datos y, para facilitar y agilizar el trabajo rutinario, se recurre a un programa estadístico, *Statistix Version 10.0* (Analytical Software, Tallahassee, FL, USA) que, en opinión de los autores, cumple el requisito de sencillez, resulta asequible, y su contenido abarca la práctica totalidad de las necesidades que requiere un experimentador agrícola.

En la actualidad existen magníficos libros sobre diseños de experimentos y análisis de datos, pero no suelen despejar las dificultades aludidas al principio, al menos en la experiencia que tienen los autores de esta publicación tras muchos años de dedicación a la docencia, a la investigación y a la formación de personal. A ello hay que añadir que esos libros, por lo general, solo tratan de aspectos estadísticos, fundamentales para el diseño de los experimentos y el análisis de datos, pero hay aspectos de la experimentación agrícola que escapan del ámbito matemático, como la definición de los objetivos, la selección de los tratamientos, la toma de datos o la interpretación y presentación de los resultados. Estos aspectos han sido incluidos en este texto como complemento al componente estadístico.

La estructura de la obra se ha basado en los más de 25 años de impartición de una asignatura en los cursos de doctorado, y actualmente en los másteres, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Ingenieros de Montes de la Universidad de Córdoba, que en los últimos años se ha denominado *Métodos Experimentales en Agronomía*. A lo largo de estos años se ha ido diseñando el perfil de esta materia y ajustándola a las necesidades reales de los alumnos, hasta llegar a la estructura que se recoge en esta publicación. En este momento, es justo mencionar la labor pionera del profesor Luis Rallo Romero, que inició la impartición de esta asignatura con el afán altruista de ofrecer a sus alumnos una formación básica, de la que carecían, para la realización de sus trabajos experimentales. La perseverancia en el mantenimiento de la asignatura, acompañada por la buena aceptación por parte del alumnado y el consiguiente éxito en la matriculación, hizo que otros profesores nos integrásemos en las enseñanzas y mantuviéramos vigente el objetivo con el que el profesor Rallo la concibió.

La obra se ha organizado en 24 capítulos y tres apéndices. Los dos primeros capítulos tratan sobre aspectos a considerar en el diseño y planteamiento de los experimentos; los tres siguientes abordan los procedimientos para la comparación de dos o más muestras, introduciendo al lector en el análisis de la varianza. A continuación, se describen los diseños más comunes en la experimentación agrícola, que incluyen una introducción sobre el

tipo de diseño, la aplicación práctica, el establecimiento de un experimento diseñado de esa forma y el análisis de los datos, tanto manual como con el programa *Statistix*. Le siguen capítulos dedicados al estudio de la correlación y las regresiones, así como al análisis de covarianza, de tanta utilidad al trabajar con plantas perennes. Un capítulo se dedica a los métodos no paramétricos, importantes en experimentos agrícolas y tradicionalmente ignorados por los investigadores. Para finalizar, se incluyen capítulos dedicados a la toma de datos en campo, las medidas en plantas y la interpretación y presentación de resultados tal como se exigen actualmente en las revistas de impacto. La obra termina con tres apéndices. El primero es un glosario que resulta de utilidad para aquellos menos familiarizados con la materia. El número de términos podría ampliarse considerablemente, pero se ha realizado un esfuerzo de síntesis evitando repeticiones de algunos conceptos claramente definidos en los capítulos. El segundo describe brevemente las distribuciones más comunes, para que el curioso pueda entender algo más sobre la distribución con la que trabaja. El tercero es una recopilación de tablas estadísticas, necesarias para el cálculo manual.

Tenemos la convicción de que esta publicación resultará de gran utilidad a estudiantes y profesionales, que requieren de estas herramientas para el desarrollo de sus trabajos. Con ese espíritu la hemos preparado y en la esperanza de su utilidad confiamos.

Primavera de 2017  
LOS AUTORES





# ÍNDICE

---

<b>Autores</b> .....	<b>VII</b>
<b>Prólogo</b> .....	<b>IX</b>
<b>1. La experimentación en agricultura</b> .....	<b>1</b>
Usos y abusos de la estadística .....	1
Cómo realizar un buen experimento .....	3
Experimentos en explotaciones comerciales .....	5
<b>2. Estructura y diseño de un experimento</b> .....	<b>7</b>
Definición de experimento: clases .....	7
Unidad experimental y tratamientos .....	8
Error experimental .....	9
Control del error experimental .....	9
Las repeticiones y sus funciones .....	11
Factores a tener en cuenta para elegir el número de repeticiones .....	12
Sorteo .....	13
Empleo de filas guarda .....	13
Inferencias estadísticas .....	15
<b>3. Comparación de dos muestras</b> .....	<b>17</b>
Muestras pareadas .....	17
Muestras independientes de igual tamaño con $\sigma_1 = \sigma_2$ .....	20
Muestras independientes de distinto tamaño con $\sigma_1 = \sigma_2$ .....	23
Muestras independientes con $\sigma_1 \neq \sigma_2$ .....	26
Consideraciones finales .....	27
<b>4. Análisis de varianza</b> .....	<b>29</b>
Modelos de análisis de varianza .....	29
Procedimiento general del análisis de varianza .....	31
<i>Modelo I: efectos fijos</i> .....	31
<i>Modelo II: efectos aleatorios</i> .....	35
Supuestos del análisis de varianza .....	36
<i>Normalidad</i> .....	36

<i>Homogeneidad de las varianzas (homoscedasticidad)</i> .....	38
<i>Independencia de medias y errores</i> .....	40
<i>Aditividad</i> .....	42
Transformaciones de los datos.....	44
<i>Logarítmica [log(Y)]</i> .....	44
<i>Raíz cuadrada [<math>\sqrt{Y}</math>]</i> .....	45
<i>Inversa [1/Y]</i> .....	45
<i>Angular o Arcoseno [<math>\arcsen \sqrt{\text{Porcentaje}/100}</math>]</i> .....	45
<i>Escalas pretransformadas</i> .....	45
<i>Otras transformaciones</i> .....	46
<i>Datos periféricos o raros (outliers)</i> .....	46
Realización del análisis de varianza .....	47
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	49
<b>5. Separación de medias y contrastes</b> .....	<b>55</b>
Comparaciones <i>a priori</i> .....	56
<i>Contrastes ortogonales</i> .....	56
<i>Contrates polinómicos</i> .....	60
<i>Comparaciones con un control</i> .....	61
<i>Comparaciones con el mejor</i> .....	63
Comparaciones <i>a posteriori</i> .....	63
<i>Método de la Mínima Diferencia Significativa (MDS o "LSD")</i> .....	65
<i>Método de Tukey</i> .....	66
<i>Procedimientos de Bonferroni y de Sidak</i> .....	68
<i>Procedimiento de Scheffé</i> .....	70
<i>Otros métodos de comparación múltiple</i> .....	72
<b>6. Diseño completamente aleatorio</b> .....	<b>73</b>
El modelo lineal aditivo.....	73
Diseño y análisis de varianza.....	74
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	77
<b>7. Diseño en bloques al azar</b> .....	<b>81</b>
Modelo lineal para un diseño en bloques completamente al azar.....	82
Diseño y análisis de varianza.....	82
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	86
<b>8. Cuadrado latino</b> .....	<b>89</b>
Modelo lineal para un diseño en cuadrado latino .....	89
Diseño y análisis de varianza.....	90
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	95
<b>9. Diseño aumentado</b> .....	<b>99</b>
Diseño del experimento .....	99
Análisis .....	101

<b>10. Experimentos factoriales .....</b>	<b>109</b>
Diseños experimentales y modelos de análisis de varianza.....	110
Realización del análisis de varianza factorial.....	114
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	117
<b>11. Diseño en parcelas divididas.....</b>	<b>121</b>
Fundamentos del análisis de varianza.....	122
Realización del análisis de varianza .....	125
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	128
<b>12. Diseño en bloques divididos .....</b>	<b>135</b>
Fundamentos del análisis de varianza.....	136
Realización del análisis de varianza .....	139
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	143
<b>13. Análisis de varianza combinado .....</b>	<b>155</b>
Observaciones múltiples.....	156
<i>Análisis de muestreos</i> .....	156
<i>Análisis de mediciones temporales repetidas</i> .....	161
Series de experimentos .....	165
<i>Análisis de diferentes épocas</i> .....	165
<i>Análisis de diferentes años</i> .....	168
<i>Análisis de diferentes localidades</i> .....	172
<i>Análisis de experimentos de larga duración</i> .....	176
<b>14. Correlación lineal.....</b>	<b>179</b>
Cálculo del coeficiente de correlación lineal .....	180
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	181
Interpretación de los valores de $r$ .....	182
Consideraciones finales .....	183
<b>15. Regresión lineal.....</b>	<b>185</b>
Cálculo de la regresión lineal .....	186
Relaciones con la correlación .....	189
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	189
Estimaciones de la regresión poblacional.....	190
Ajuste de la recta por el origen .....	193
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	196
Comparación de líneas de regresión .....	197
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	199
Consideraciones finales .....	200
<b>16. Regresión múltiple .....</b>	<b>201</b>
Correlación parcial y múltiple .....	201
Ejemplo.....	202
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	203

Regresión con dos variables independientes .....	204
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	211
Regresión con más de dos variables independientes .....	213
Consideraciones sobre la regresión múltiple .....	217
<b>17. Regresión curvilínea .....</b>	<b>219</b>
Curvas de tipo logarítmico y exponencial .....	219
<i>Curvas de tipo logarítmico</i> .....	220
<i>Curvas de tipo exponencial</i> .....	222
<i>Otras curvas de tipo logarítmico o exponencial</i> .....	224
Curvas de tipo polinómico.....	224
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	231
Otros tipos de curvas de interés .....	233
<i>Curva logística (sigmoide)</i> .....	234
<i>Curva asintótica</i> .....	238
<b>18. Análisis de covarianza .....</b>	<b>243</b>
Realización del análisis de covarianza .....	244
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	249
Covarianza múltiple.....	251
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	256
Consideraciones sobre el análisis de covarianza .....	257
<b>19. Métodos no paramétricos.....</b>	<b>259</b>
Prueba de los signos.....	259
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	260
Prueba de rangos (categorías) con signos de Wilcoxon.....	260
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	262
Prueba de la suma de rangos (categorías) de Wilcoxon.....	262
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	264
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	265
Prueba de Kruskal-Wallis .....	266
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	268
Prueba de Friedman .....	269
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	271
Correlación de rangos de Spearman .....	272
<i>Cálculo con el programa Statistix (SX)</i> .....	275
<b>20. Toma de datos y medidas en campo .....</b>	<b>277</b>
Métodos de muestreo .....	279
<i>Muestreo aleatorio simple</i> .....	279
<i>Muestreo sistemático</i> .....	281
Estimaciones y categorías.....	282
<i>Escalas 1-5</i> .....	282
<i>Escalas 0-3</i> .....	283

<i>Escalas 1-9</i> .....	283
<i>Escalas 0-5</i> .....	283
Medidas indirectas .....	285
<b>21. Medidas en plantas leñosas</b> .....	<b>287</b>
Experimentación con plantas leñosas .....	287
<i>Selección y calibración de plantas leñosas</i> .....	288
<i>La parcela elemental</i> .....	289
Medidas del crecimiento vegetativo .....	289
<i>Medidas del crecimiento nuevo</i> .....	290
<i>Medidas del tamaño del árbol</i> .....	290
<i>Otras medidas del crecimiento vegetativo</i> .....	292
Medidas de la productividad .....	293
<i>Medidas de la floración</i> .....	293
<i>Medidas del cuajado de frutos</i> .....	295
<i>Medidas de la producción</i> .....	295
Medidas de calidad de la cosecha .....	296
<i>Medidas del tamaño del fruto</i> .....	296
<i>Medidas del color del fruto</i> .....	297
<b>22. Medidas en plantas herbáceas</b> .....	<b>299</b>
Medidas durante el ciclo vegetativo .....	300
Medidas de la cosecha .....	301
<b>23. Interpretación y presentación de resultados</b> .....	<b>303</b>
Consideraciones generales .....	303
Presentación de resultados .....	305
<i>Experimento en bloques al azar con medida de una variable cualitativa</i> .....	306
<i>Experimento en bloques al azar con medida de una variable cuantitativa y un factor no cuantitativo</i> .....	307
<i>Experimento en bloques al azar con medida de una variable cuantitativa y un factor cuantitativo</i> .....	308
<i>Experimento factorial con interacción</i> .....	309
<i>Experimento factorial sin interacción</i> .....	311
<i>Presentación de regresiones</i> .....	311
<i>Presentación de datos por la media y el error estándar de la media</i> .....	312

---

## APÉNDICES

<b>A1. Conceptos estadísticos</b> .....	<b>315</b>
<b>A2. Distribuciones más comunes</b> .....	<b>323</b>
Distribución normal .....	323

Distribución de medias de muestras .....	324
Distribución t de Student .....	325
Distribución F .....	326
Distribución binomial .....	326
Distribución chi-cuadrado ( $\chi^2$ ) .....	327
<b>A3. Tablas estadísticas .....</b>	<b>329</b>
Tabla A1. Distribución de la t de Student .....	329
Tabla A2. Distribución F .....	331
Tabla A3. Distribución de $\chi^2$ (Chi-cuadrado) .....	335
Tabla A4. Coeficientes de correlación r adiferentes niveles de significación .....	337
Tabla A5. Número de signos iguales requeridos para obtener significación en la prueba de los signos .....	339
Tabla A6. Prueba de categorías con signos de Wilcoxon. ....	340
Tabla A7. Prueba de la suma de categorías de Wilcoxon (Prueba de Mann-Whitney) .....	341
Tabla A8. Coeficientes de correlación de Spearman $r_s$ a diferentes niveles de significación .....	342
Tabla A9. Transformación $\arcsen \sqrt{\text{Porcentaje}/100}$ expresada en grados .....	343
Tabla A10. Coeficientes $a_{n-i+1}$ para el test de Shapiro-Wilk. ....	344
Tabla A11. Valores críticos (W) del test de Shapiro-Wilk. ....	347
Tabla A12a. Valores críticos para el test de rachas ( $R_1$ ). ....	349
Tabla A12b. Valores críticos para el test de rachas ( $R_2$ ). ....	350
Tabla A13. Valores críticos (d) del test de Dunnett. ....	351
Tabla A14. Valores críticos (Q) del test de Tukey. ....	353
Tabla A15. Coeficientes para contrastes polinómicos ortogonales (con igual espaciamento entre los niveles de la variable independiente) .....	355
<b>Bibliografía .....</b>	<b>357</b>



## LA EXPERIMENTACIÓN EN AGRICULTURA

---

La agricultura está siempre sujeta a continuos cambios. En la actualidad se está asistiendo a la transición desde una agricultura convencional, cuya productividad ha estado basada en la aplicación masiva de productos químicos para el control de la sanidad y la productividad de los cultivos, hacia una agricultura sostenible basada en la obtención de una producción de calidad competitiva respetando el medio ambiente y conservando los recursos naturales. Estos cambios se logran gracias al avance de los conocimientos generados por la investigación, que permiten desarrollar técnicas apropiadas para esos fines. No obstante, gran parte de la práctica agrícola presenta aún una base empírica.

El desarrollo de nuevas técnicas aplicables en la agricultura pasa necesariamente por la experimentación. No basta hoy en día con que destacados técnicos agrícolas establezcan sus impresiones sobre la bondad de una nueva técnica o la utilización de un determinado material, sino que las recomendaciones transferibles deben estar soportadas por datos sujetos a un riguroso examen. Como muchos ya conocen, es hoy en día difícil, si no imposible, que un trabajo de investigación sea aceptado en una revista agronómica de cierto impacto sin la utilización de procedimientos estadísticos adecuados para el diseño de los experimentos y el análisis de los datos.

El objetivo de la experimentación es obtener datos fiables que permitan establecer comparaciones entre tratamientos diferentes y apoyar o rechazar hipótesis de trabajo. El proceso experimental comprende diversas etapas hasta su conclusión. De forma breve, el proceso exige la definición del problema a resolver, el establecimiento de los objetivos, la selección correcta de los tratamientos a aplicar, del material vegetal a emplear en el experimento, el diseño experimental, la toma correcta de datos, su análisis, y la interpretación y presentación correcta de los resultados. No basta, pues, con recopilar y presentar datos, sino que hay que obtenerlos de forma correcta y buscarle un sentido a los mismos. El componente estadístico representa tan solo una parte, aunque importante, de la experimentación; es la herramienta útil para el diseño correcto del experimento y el análisis de los datos.

### ■ USOS Y ABUSOS DE LA ESTADÍSTICA

El empleo de los métodos estadísticos resulta de interés y de importancia tanto para el investigador como para los técnicos que apliquen los conocimientos tecno-

lógicos resultantes de las investigaciones. Hay que tener en consideración que en la agricultura, la complejidad existente en las relaciones entre el medio de cultivo y las plantas es de tal magnitud que escapan al control simple de una fórmula sencilla. Como observan Little and Hills (1991), por muy profundos conocimientos que se tengan sobre un cultivo, no es posible predecir con exactitud cual será la producción que se obtendría en determinadas condiciones, de la misma manera que lo sería calcular el área de un círculo conociendo su radio. Aun teniendo todo bajo control, cualquier variación aleatoria alteraría los resultados de la predicción. Es por ello por lo que es difícil contestar a las preguntas planteadas en una experimentación con absoluta seguridad, aun tras varios años de estudio, pues siempre se corre el riesgo de llegar a conclusiones incorrectas.

La estadística es una parte de las matemáticas que se fundamenta en la teoría de probabilidades, cuyos teoremas son tan precisos como otros teoremas matemáticos, pero cuyos resultados son probabilísticos y, en consecuencia, con el riesgo de aceptar o de rechazar una hipótesis incorrectamente. En estos términos hay que entenderse en agricultura, de ahí la importancia de que tanto investigadores como técnicos tengan un conocimiento básico de esas teorías. Si bien, como se ha especificado, es difícil la publicación de trabajos científicos sin un planteamiento estadístico correcto, es bien cierto que en el ámbito de la transferencia de tecnología y de la divulgación no sea frecuente el análisis estadístico de los datos, como si en esta fase final de aplicación del conocimiento el rigor de los trabajos y la interpretación de los resultados no fuera algo esencial. Esto hay que extenderlo también al ámbito de la empresa agraria, donde se requiere experimentar para la simple comprobación del efecto de una nueva técnica o del comportamiento de una nueva variedad. Se asiste, pues, hoy en día tanto a situaciones en las que el uso de la estadística es algo circunstancial, como también a aquellas en las que se trata de aplicar para solucionar problemas asociados a una mala planificación del experimento o, incluso, para adornar trabajos que rayan la mediocridad. En cualquiera de estos casos se está desaprovechando una técnica que, si no absolutamente precisa en la conclusión, los rígidos fundamentos matemáticos en los que se basa la hacen vital para la interpretación correcta de los datos.

Incluso en los casos en los que la estadística trata de aplicarse racionalmente, los casos de mal uso de los procedimientos son más frecuentes de lo que podría imaginarse, sin que parezca que pueda ponerse freno a una práctica que conlleva una mala interpretación de los resultados obtenidos. Aunque este mal uso parece contagiado en muchos campos científicos, en el caso de la agronomía se vienen denunciando desde hace más de tres décadas casos de artículos científicos publicados en revistas internacionales de impacto que presentan datos analizados estadísticamente, pero de forma tan incorrecta que pueden alterar las conclusiones obtenidas. Trabajos publicados en esas mismas revistas por Little (1978), Gates (1991), Dyke (1997) y Kramer *et al.* (2016), por citar algunos, a lo largo de casi dos décadas, ponen de manifiesto las deficiencias en el empleo de los métodos estadísticos en trabajos publicados. La lectura de estos artículos es recomendable a cualquier investigador. Sin tratar de resumir sus contenidos, se puede decir que los errores más frecuentemente encontrados son, sin que se establezca un orden de preferencia, la confusión entre el



error experimental y el error de muestreo, lo que a veces lleva a diseñar experimentos sin repeticiones; el análisis incorrecto de experimentos factoriales, donde interviene más de un factor en estudio y se trata de observar si existe o no interacción entre ellos; el análisis de los datos de un diseño experimental que no se corresponde con el diseño establecido; el abuso de los procedimientos de comparación múltiple para la separación de medias, aplicados incluso cuando únicamente se comparan dos medias y también para comparar distintos niveles de un factor cuantitativo, que han de ser separados por regresión, y la ausencia de transformaciones de los datos cuando es un requisito requerido para el análisis de varianza.

En la actualidad el problema no se ha minimizado, sino que, incluso, parece haberse complicado por el uso de paquetes informáticos. No cabe duda de la utilidad que representan estas técnicas para el manejo de datos, pues ahorran mucho tiempo y ganan precisión al evitar muchos errores de cálculo, pero hay que evitar la actitud de pensar que se trata de herramientas inteligentes que conocen lo que el investigador ha realizado por el simple hecho de introducirle los datos obtenidos. Con una misma hoja de datos cualquier paquete informático es capaz de analizarlos de muy diversas formas, dependiendo de la orden de cálculo que le demos, pero es evidente que la orden correcta es la que corresponde al diseño experimental del que proceden los datos. La falta de conocimientos sobre los procedimientos de cálculo, que hace años los investigadores solían tener porque tenían que realizarlo manualmente, conduce con frecuencia a la elección de procedimientos inadecuados. Si a esto se añade la cantidad de información que suelen generar los programas una vez analizados los datos, que a veces confunden al inexperto, es fácil imaginar que la expresión final de los resultados se aleje muchas veces peligrosamente de la realidad.

El rechazo de artículos científicos para su publicación en revistas especializadas tiene su origen, con frecuencia, en un uso inapropiado de los métodos estadísticos, y aún parece que son pocos los rechazados si se tiene en cuenta que muchos evaluadores carecen de conocimientos sólidos de esos procedimientos. Esto ha llevado a proponer a los comités editoriales de algunas revistas que dispongan de expertos en estadística para la evaluación de los trabajos presentados (Little, 1978) o, al menos, a exigir que se presenten más datos de los que suelen aportarse, aun a riesgo de aumentar la longitud de los manuscritos (Marini, 1999), de manera que el lector pueda interpretar los resultados por él mismo. Aunque sensatas, estas propuestas no parecen haber tenido aceptación en los comités editoriales de las revistas.

## ■ CÓMO REALIZAR UN BUEN EXPERIMENTO

El procedimiento para la investigación es el conocido *método científico*, más conocido a veces que comprendido. De forma breve, el método se basa en establecer hipótesis a partir de hechos observados, es decir, formular una idea de cómo se interpretan y se explican esos hechos. Para confirmar si la hipótesis establecida de esa manera es o no cierta, se diseña un experimento que permita probar su validez y, con los datos obtenidos, que aportan nuevos hechos a los ya conocidos, se interpreta si estos apoyan, rechazan o alteran la hipótesis de partida. En este punto, por

lo general, nos encontramos de nuevo al inicio, particularmente si la hipótesis se ha alterado, comenzando otra vez el proceso hasta poder llegar a una conclusión plausible. En el caso más simple de la experimentación de campo, que consiste en comparar una técnica usual con otra nueva, las hipótesis que pueden establecerse son dos, la que considera que ambas dan el mismo resultado y la que considera que ambas difieren en los resultados. Se denomina *hipótesis nula*, y se designa por  $H_0$ , a aquella que se formula en el sentido de que *no* hay diferencia entre las técnicas, es decir, que las diferencias que puedan observarse se deben a diferencias en el muestreo de la misma población. Esta suele ser la hipótesis de trabajo, en contraposición con la denominada *hipótesis alternativa* ( $H_1$ ), que es la complementaria de la hipótesis nula, o lo que es lo mismo, la que establece que ambas técnicas difieren. El experimento puede complicarse al incluir diversos métodos de aplicación o al comparar varias técnicas simultáneamente, pero el procedimiento no varía.

Con independencia de lo que se pretende comparar, ya sea la producción, el tamaño del fruto o cualquier otra característica de dos árboles adyacentes, por ejemplo, los datos que se obtengan de cada árbol raramente van a coincidir, incluso recibiendo ambos el mismo tratamiento. La diferencia es debida, fundamentalmente, a variaciones ambientales si ambos árboles pertenecen a la misma variedad y están injertados sobre un mismo patrón. Esa variabilidad suele escapar al control del investigador y representa el error experimental. En el supuesto de comparar dos técnicas, los resultados obtenidos son una mezcla del efecto de las técnicas y del error experimental, por lo que es necesario estimar este para aislar el posible efecto de las técnicas. Los métodos estadísticos exigen la repetición de los tratamientos para estimar el error experimental, a la vez que aleatoriedad, es decir, que cada árbol del ejemplo tenga la misma probabilidad de recibir un tratamiento determinado. Esta manera de proceder asegura un procedimiento objetivo de evaluación de los datos, y al diseñar un experimento hay que pretender reducir en lo posible el error experimental para magnificar las posibles diferencias entre los tratamientos.

Al planificar un experimento hay que tener presente que las consideraciones estadísticas son importantes, pero no las únicas. El diseño del experimento debe hacer practicable los trabajos experimentales y no añadir variabilidad que aumente el error experimental. Por ejemplo, en una experimentación con árboles estos deben disponerse a marcos adecuados si han de plantarse para el experimento, no a marcos más estrechos para ahorrar espacio o se provocará un crecimiento anormal de los mismos que alterará los datos experimentales. Salvado esto, el diseño debe ser correcto estadísticamente; en este sentido hay que evitar la actitud de pensar que cualquier diseño es válido porque cualquier experto en estadística o cualquier programa informático es capaz de resolverlo todo. La falta de repetición y de aleatoriedad es, con frecuencia, un aspecto de un mal diseño estadístico, lo que a veces se justifica por cuestiones prácticas.

La simplicidad es un aspecto que hay que considerar al planificar un experimento. Algunos investigadores se empeñan en emplear diseños complejos porque piensan que les proporcionarán mayor grado de información. Sin embargo, la información hay que obtenerla de la forma más sencilla y fácil posible y aumentar

la complejidad en caso necesario, por requerimiento de la planificación del experimento o de los objetivos perseguidos, no para argumentar mayor precisión o mejor planteamiento del experimento. En adición a ello, el experimento debe tener precisión y sensibilidad para distinguir las posibles diferencias entre los tratamientos y evitar errores sistemáticos, es decir, que determinadas unidades experimentales que reciban un tratamiento difieran sistemáticamente de las que reciben otro tratamiento. Por último, hay que tener presente que la repetición de un experimento de campo en el tiempo y/o en el espacio permitirá aumentar la validez de las conclusiones que puedan obtenerse del mismo. En muy pocas ocasiones los resultados procedentes de un único experimento de campo pueden ser concluyentes.

Como conclusión, Pearce (1976) sugiere que un buen experimento debe responder a las siguientes cuestiones: ¿es practicable?, ¿es estadísticamente correcto?, ¿son los tratamientos realmente lo que se proponen ser? Cualquier fallo en alguno de esos aspectos puede ser desastroso para la investigación que se pretende desarrollar.

## ■ EXPERIMENTOS EN EXPLOTACIONES COMERCIALES

Idealmente los experimentos deberían realizarse en fincas experimentales propias de centros de investigación y desarrollo. En estas explotaciones, el investigador puede controlar no solamente lo que sería la parte experimental, sino también todas las facetas relativas al manejo del cultivo. El personal que trabaja en esas fincas experimentales conoce lo que es un experimento, lo que puede representar un bloque, distingue el cultivo de una planta experimental de lo que sería el cultivo en una explotación comercial, está familiarizado con la toma de datos en cada parcela experimental y, en definitiva, forma parte de un equipo investigador.

En muchas ocasiones, sin embargo, los experimentos han de realizarse en explotaciones comerciales. Los motivos son variados, pero hay dos razones generales que hacen obligada la experimentación en esas explotaciones. La primera es que en las fincas experimentales no existan las condiciones de medio necesarias para cubrir el objetivo de la experimentación. En muchos estudios sobre fertilización se requiere cultivar las plantas en suelos que sean pobres en un determinado elemento, por ejemplo, potasio; si no se dispone de una finca experimental con suelos deficientes en ese elemento, la única alternativa es buscar una explotación comercial con suelos de esas características.

Los experimentos de transferencia de tecnología constituyen la segunda y, a veces, la principal razón para realizar experimentos en explotaciones comerciales. En este tipo de experimentos se persigue, por lo general, evaluar y divulgar una nueva técnica que ha de ser comparada con la práctica habitual en la zona. Esto obliga a realizar los experimentos fuera de las fincas experimentales y repetirlos en varias localidades o zonas, con el objetivo de obtener mayor cobertura sobre la zona de trabajo y conseguir mayor divulgación de la técnica al establecer ensayos demostrativos con varios agricultores de la zona.

En cualquiera de los casos, existen diferencias sustanciales entre los experimentos realizados en fincas experimentales y los realizados en explotaciones co-

merciales. En primer lugar, estos se desarrollan con la participación del agricultor que es quien controla el manejo de la parcela experimental en lugar del investigador o de su equipo. Esto puede contribuir más a la variabilidad que la misma planta o el suelo en el que se cultiva, por lo que la selección del agricultor es esencial para que el experimento pueda finalizar satisfactoriamente. Han sido muchos los experimentos abandonados por el que escribe estos párrafos debido a la falta de interés del agricultor por el ensayo o a su excesivo entusiasmo con el mismo, que le ha llevado en ocasiones a tratar también las plantas testigo antes de finalizar el experimento. En la selección del agricultor es importante que este sea cooperativo con el experimento, que lo entienda y comprenda los objetivos, de manera que pueda identificarse con ellos y los vea de utilidad en su explotación. Asimismo, sería aconsejable que estuviera al corriente de los resultados, en la conciencia de que son parciales y no concluyentes hasta que se dé por finalizado el experimento, pero esto le haría sentirse, como de hecho lo es, parte del equipo investigador.

Otra diferencia sustancial de los experimentos en explotaciones comerciales, fundamentalmente los de transferencia de tecnología, es que por lo general el número de tratamientos es más limitado y la parcela experimental es de mayor tamaño, idealmente de un tamaño tal que permita realizar las operaciones habituales de cultivo. Parcelas de entre una y 15 ha, han sido utilizadas en ensayos de este tipo.

En los ensayos de transferencia de tecnología, normalmente se elige una zona objetivo y dentro de ella se selecciona un número de explotaciones comerciales, cuyos criterios de selección variarán en función de los objetivos del experimento. Como todos los factores no están controlados, es conveniente aumentar en lo posible el número de explotaciones que participen en el experimento, lo que además permite soportar la posibilidad de anular una de ellas sin que peligre el experimento completo. Se ha sugerido (Petersen, 1994) que el número de explotaciones a seleccionar en un ensayo básico con dos tratamientos (nueva técnica frente a la habitual en la zona) sea tal que los grados de libertad del error en el análisis de varianza sea, al menos, de 10. Conforme aumente el número de tratamientos puede disminuir el número de explotaciones seleccionadas, que nunca deberían ser inferiores a cuatro. En cada explotación se realizará una única repetición de cada tratamiento y los datos experimentales se analizarán como un diseño en bloques al azar en el que cada explotación representa un bloque. De esta forma, las diferencias entre tipo de explotaciones, incluidas las debidas al manejo diferente de cada una, se acumularán en los bloques y no en los tratamientos. En este tipo de experimentos las parcelas elementales suelen ser grandes, como se ha indicado; deben ser iguales en tamaño y forma en todos los tratamientos de cada explotación y estar lo más cerca posible, aunque no hay necesidad de que sean adyacentes. Los tratamientos se sortean, como de costumbre, para asignarles una parcela a cada uno de ellos.

La técnica de disponer un bloque en cada explotación se pone en práctica en la asunción de que los resultados esperados sean similares en las distintas explotaciones, algo que puede extenderse a experimentos en distintas localidades. Si en estos se esperase y se observase una interacción entre la localidad y el tratamiento, sería necesario establecer un experimento completo en cada localidad.