

Contenido

Prólogo	i
Presentación	iii
Grupo de trabajo	v
1. Introducción y conceptos preliminares	1
2. Tipos de modelos estadísticos lineales	19
<i>Caso 2.1</i>	20
<i>Caso 2.2</i>	26
<i>Caso 2.3</i>	30
3. El modelo de regresión lineal simple. Visión geométrica	35
3.1 Especificación del modelo de regresión lineal simple	36
3.2 Estimación de los parámetros β_1 y β_2 por el método de mínimos cuadrados ordinarios.....	36
3.3 Propiedades de la estimación MCO en el modelo de regresión simple	44
3.4 Descomposición de la variabilidad, bondad del ajuste y coeficiente de determinación en el modelo de regresión simple con estimación MCO.	46
<i>Caso 3.1</i>	48
4. El modelo de regresión lineal simple sin término constante	55
4.1 Especificación del modelo de regresión lineal simple sin término constante	57
4.2 Estimación del modelo por el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO).....	57
4.3 Sorpresas que depara la estimación mínimo-cuadrática en el modelo de regresión lineal simple sin término constante.	59
4.4 Descomposición de la variabilidad, bondad del ajuste y coeficiente de determinación en el modelo de regresión simple sin término constante y estimación MCO.	60

<i>Caso 4.1</i>	61
<i>Caso 4.2</i>	63
5. El modelo sin variable explicativa y con término constante	69
<i>Ejemplo 5.1</i>	71
6. El modelo de regresión lineal múltiple. Visión geométrica	75
6.1 Especificación del modelo de regresión lineal múltiple.....	75
<i>Ejemplo 6.1</i>	76
<i>Ejemplo 6.2</i>	77
6.2 Estimación de los parámetros beta de un modelo de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados ordinarios (MCO).	81
6.3 Propiedades de la estimación MCO en el modelo de regresión lineal múltiple	86
6.4 Descomposición de la variabilidad, bondad del ajuste y coeficiente de determinación en el modelo de regresión lineal múltiple con estimación MCO. ...	90
<i>Caso 6.1</i>	95
<i>Caso 6.2</i>	108
<i>Caso 6.3</i>	110
<i>Caso 6.4</i>	111
7. Hipótesis estadísticas básicas en el modelo de regresión lineal	117
7.1 Expresión del proceso de generación de datos.	118
7.2 Matriz de datos.	119
7.3 Vector de medias de la perturbación aleatoria.	120
7.4 Matriz de varianzas y covarianzas de la perturbación aleatoria.	121
7.5 Naturaleza de los regresores.	122
7.6 Distribución normal de probabilidad de la perturbación aleatoria.	125
7.7 Modelos de regresión lineal clásica y neoclásica normales.	126
7.8 Casos importantes de incumplimiento de las hipótesis estadísticas básicas.....	128
<i>Caso 7.1</i>	130
8. Propiedades estadísticas de la estimación mínimo-cuadrática	139
8.1 Análisis estadístico condicionado de los estimadores MCO.....	140
8.2 Análisis incondicional de los estimadores MCO.....	141
8.3 Propiedades estadísticas del estimador MCO en la regresión lineal simple.....	143

8.4 La precisión del estimador MCO de los parámetros del modelo de regresión lineal.	145
8.5 Estrategias de muestreo en los modelos de regresión lineal.	146
<i>Ejemplo 8.1</i>	149
8.6 El teorema de Gauss-Markov.....	153
8.7 Las formas lineales y cuadráticas de variables aleatorias normales y el estimador de la varianza de la perturbación aleatoria.	154
<i>Caso 8.1</i>	160
9. Inferencias sobre los parámetros del modelo de regresión lineal neoclásica normal	165
9.1 Caso particular: El modelo de regresión lineal neoclásica normal simple, RLNeoCNS	176
<i>Caso 9.1</i>	177
<i>Caso 9.2</i>	185
<i>Ejemplo 9.1</i>	194
9.2 Un resultado clave del modelo RLNeoCN: las distribuciones incondicionales o marginales de los estadísticos t	197
9.3 Inferencias sobre la varianza de la perturbación aleatoria.	199
<i>Caso 9.3</i>	200
9.4 Contraste de un conjunto de hipótesis lineales. Estadístico F	201
9.5 Caso particular: el contraste de significación global en un modelo RLNeoCN.....	205
<i>Caso 9.4</i>	207
<i>Ejemplo 9.2</i>	211
9.6 Regresión por bloques y su aplicación al contraste de significación global.	212
9.6.1 <i>Regresión en desviaciones en los modelos con término constante</i>	215
9.6.2 <i>Inclusión de una variable explicativa adicional en un modelo de regresión lineal</i>	216
9.6.3 <i>Otro enfoque del contraste de significación global</i>	217
<i>Caso 9.5</i>	219
<i>Ejemplo 9.3</i>	233
<i>Caso 9.6</i>	237
10. Predicción en el modelo de regresión lineal neoclásica, RLNeoCN	249
10.1 Predicción o estimación del valor medio condicionado de la variable explicada.	249

10.2 Predicción de la variable explicada o dependiente.....	255
<i>Caso 10.1</i>	260
<i>Caso 10.2</i>	272
11. Validación del modelo de regresión lineal	281
11.1 Los residuos MCO en los modelos de regresión lineal.	282
11.2 Las matrices idempotentes \mathbf{M} y $\mathbf{P} \equiv \mathbf{H}$ y su uso para la construcción de residuos especializados.	289
11.2.1 <i>Residuos estandarizados o internamente studentizados</i>	296
11.2.2 <i>Residuos studentizados o externamente studentizados</i>	297
<i>Caso 11.1</i>	299
<i>Caso 11.2</i>	307
<i>Caso 11.3</i>	314
11.3 Puntos extremos, observaciones atípicas y observaciones influyentes.	320
11.4 Detección de observaciones atípicas.	325
11.5 Detección de una extrapolación oculta en una predicción.	329
11.6 Identificación de observaciones influyentes.....	329
<i>Caso 11.4</i>	333
<i>Caso 11.5</i>	345
11.7 Los residuos y la hipótesis de normalidad de los errores.	351
11.7.1 <i>Comparaciones gráficas de las distribuciones empíricas y teóricas</i>	352
11.7.2 <i>El contraste de Lilliefors</i>	355
11.7.3 <i>Gráficos cuantil-cuantil o gráficos Q-Q</i>	356
11.7.4 <i>Contraste de correlación en un diagrama Q-Q</i>	363
11.7.5 <i>Contrastes de Shapiro-Francia y Shapiro-Wilk</i>	365
11.7.6 <i>Contraste de Bera-Jarque</i>	367
<i>Caso 11.6</i>	368
<i>Caso 11.7</i>	376
12. Transformaciones de variables	383
12.1 Transformaciones de Box-Cox.....	388
<i>Ejemplo 12.1</i>	391
13. Regresión polinómica	405
13.1 Ajuste mediante polinomios segmentados. Regresión «spline».	408
13.2 Regresión con polinomios de más de una variable.....	416

<i>Caso 13.1</i>	417
14. Variables indicadoras	429
14.1 Concepto.	429
14.2 Modelo de regresión lineal para comparar las medias de dos subpoblaciones o grupos.	430
14.3 Modelo de regresión lineal para comparar las medias de varias subpoblaciones o grupos.	435
14.4 Un modelo de regresión útil: una variable explicativa cuantitativa y otra cualitativa indicadora.	438
14.5 Interacción de las variables explicativas cuantitativa e indicadora en el modelo simple estudiado en el epígrafe anterior.	441
14.6 Modelo de regresión con variables indicadoras y explicativas cuantitativas en número cualquiera y sin interacción entre ellas.	442
14.7 Modelo de regresión con una variable indicadora y p variables explicativas con interacción de la primera con las últimas.	445
14.8 Contraste de cambio estructural o de Chow.	446
<i>Caso 14.1</i>	448
15. Selección y validación de modelos	459
15.1 Errores de especificación por omisión de variables relevantes.	462
15.2 Inclusión de variables irrelevantes en la especificación.	466
15.3 Diferentes criterios para la selección de modelos.	468
15.3.1 <i>Coefficiente de determinación</i>	470
15.3.2 <i>Coefficiente de determinación corregido</i>	472
15.3.3 <i>Criterio de Mallows</i>	474
15.3.4 <i>Criterio de Akaike</i>	476
15.3.5 <i>Criterio de Schwarz</i>	477
15.3.6 <i>Criterio de la suma de los cuadrados de los residuos externos o predictivos</i>	478
15.4 Algoritmos para la selección eficiente de variables.	479
<i>Caso 15.1</i>	480
16. Multicolinealidad	505
<i>Caso 16.1</i>	509

17. El modelo de regresión generalizado. Heteroscedasticidad y autocorrelación	513
17.1 El estimador MCO bajo el modelo de regresión generalizado RLNeoCNG.....	515
17.2 El estimador MCG o de mínimos cuadrados generalizados.....	516
17.3 Propiedades del estimador MCG.....	517
17.4 Estimador del parámetro σ^2	518
17.5 Contrastes de hipótesis y coeficiente de determinación	519
17.6 Mínimos cuadrados generalizados factibles (MCGF).....	519
18. Heteroscedasticidad.....	523
18.1 Heteroscedasticidad pura o simple	523
18.2 Estimaciones MCG y MCGF en presencia de heteroscedasticidad simple.....	526
18.2.1 Parametrización de la heteroscedasticidad según el modelo $\sigma_i^2 = \sigma^2 x_{ik}^2$, con k fijo.	528
18.2.2 Parametrización de heteroscedasticidad según el modelo $\sigma_i^2 = \sigma^2 x_{ik}^2$, con k fijo y $x_{ik} > 0$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$	530
18.2.3 Parametrización de la heteroscedasticidad según el modelo $\sigma_i^2 = \sigma^2 [E(y_i \mathbf{x}'_i)]^2$	530
18.2.4 Parametrización de la heteroscedasticidad según el modelo $\sigma_i^2 = \alpha_0 + \mathbf{z}'_i \boldsymbol{\alpha}$	532
18.2.5 Parametrización de la heteroscedasticidad según el modelo $\sigma_i^2 = (\alpha_0 + \mathbf{z}'_i \boldsymbol{\alpha})^2$	533
18.2.6 Parametrización de la heteroscedasticidad según el modelo $\sigma_i^2 = \exp(\alpha_0 + \mathbf{z}'_i \boldsymbol{\alpha})$. Heteroscedasticidad multiplicativa.....	534
18.3 Contrastes de heteroscedasticidad.	535
19. Autocorrelación	539
19.1 Autocorrelación pura o simple.	539
19.2 La estimación MCO en presencia de autocorrelación simple.	544
19.3 Estimación por MCG cuando $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{P}_p$ es conocida.	545
19.4 La estimación por MCGF cuando $\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{P}_p$ es desconocida	548
19.5 Contrastes de autocorrelación	550
19.5.1 El contraste de Durbin-Watson	553

19.5.2 <i>El contraste de Breusch-Godfrey</i>	557
20. Elementos básicos del diseño experimental	561
20.1 Introducción	561
20.2 Casos más importantes de diseños experimentales	566
20.2.1 <i>Diseños completamente aleatorizados</i>	567
20.2.2 <i>Diseños aleatorizados de bloques completos</i>	570
20.2.3 <i>Diseños jerarquizados o anidados</i>	571
21. El análisis de varianza en los diseños completamente aleatorizados con un solo factor	573
21.1 Introducción	573
21.2 Modelo unifactorial con efectos fijos y diseño equilibrado	573
21.2.1 <i>Inferencias de los parámetros del modelo</i>	577
Caso 21.1	579
21.3 Modelo unifactorial con efectos fijos y diseño equilibrado. Resolución mediante la técnica de la regresión lineal	587
21.3.1 <i>Modelo de regresión lineal de rango incompleto</i>	588
21.3.2 <i>Modelo de regresión lineal de rango pleno: modelo de las medias de las celdas.</i>	590
21.3.3 <i>Modelo de regresión de rango pleno por incorporación de una restricción lineal en el modelo de los efectos.</i>	592
21.3.4 <i>Modelo de regresión de rango pleno por eliminación de una variable explicativa en el modelo de los efectos</i>	594
Caso 21.2	596
21.4 Modelo unifactorial con efectos aleatorios y diseño equilibrado	600
21.4.1 <i>Estimación de los parámetros del modelo</i>	604
Caso 21.3	607
21.5 Introducción a los modelos lineales mixtos.	612
21.6 Modelo unifactorial de efectos fijos y diseño desequilibrado	615
Caso 21.4	618
21.7 Modelo unifactorial con efectos fijos y diseño desequilibrado. Resolución mediante la técnica de la regresión lineal.	623
Caso 21.5	624
21.8 Modelo unifactorial con efectos aleatorios y diseño no equilibrado	629
Caso 21.6	631

<i>Caso 21.7</i>	635
22. Diseños experimentales para los ensayos de intercomparación (I)	639
22.1 Introducción	639
22.2 Modelo simple de reproducibilidad de un ensayo.	641
<i>Caso 22.1</i>	646
22.3 Modelo simple de repetibilidad de un ensayo.	648
<i>Caso 22.2</i>	651
22.4 Modelo simple de las componentes de la precisión del ensayo.	653
22.4.1 <i>Modelo desequilibrado</i>	656
<i>Caso 22.3</i>	658
<i>Caso 22.4</i>	662
23. Inferencia estadística en los diseños experimentales con un factor	669
23.1 Introducción	669
23.2 Inferencia en el modelo de las medias de las celdas. Diseños equilibrados.	670
23.3 El enfoque de los multiplicadores de Lagrange en el modelo de las medias.	
Diseño equilibrado.	672
<i>Caso 23.1</i>	675
23.4 El enfoque del modelo restringido en los diseños equilibrados	677
<i>Caso 23.2</i>	683
23.5 Caso particular. Restricciones lineales de tipo <i>contraste</i>	686
<i>Caso 23.3</i>	688
23.6 Contrastes ortogonales en los diseños equilibrados	689
<i>Caso 23.4</i>	692
23.7 Intervalos y regiones de confianza con diseños equilibrados.....	696
<i>Caso 23.5</i>	698
23.8 Inferencia simultánea en el modelo de las medias de las celdas	702
23.8.1 <i>Intervalos de confianza simultáneos para las diferencias de medias de</i>	
<i>todos los tratamientos. Diseños equilibrados.</i>	706
<i>Caso 23.6</i>	713
23.8.2 <i>Pruebas de hipótesis simultáneas basadas en recorridos studentizados</i>	
<i>diferentes o múltiples. Diseños equilibrados.</i>	717
<i>Caso 23.7</i>	720
23.8.3 <i>Inferencia simultánea de combinaciones lineales de medias y</i>	
<i>contrastos de tratamientos. Diseños equilibrados</i>	723

<i>Caso 23.8</i>	725
23.9 La Inferencia en los diseños unifactoriales desequilibrados de efectos fijos.	729
<i>Caso 23.9</i>	731
23.10 La Inferencia en los diseños unifactoriales equilibrados de efectos aleatorios.	
Modelo ANOVA	734
<i>Caso23.10</i>	741
23.11 La inferencia en los diseños unifactoriales no equilibrados de efectos aleatorios.....	745
24. Introducción al análisis de la covarianza. Diseños con un factor y una covariable	747
24.1 Modelo ANCOVA —análisis de la covarianza— con un factor fijo y una covariable. Diseño equilibrado	747
<i>Caso 24.1</i>	750
25. Validación del modelo de diseño de experimentos unifactorial	757
25.1 Validación de los modelos ANOVA con un factor fijo	757
25.2 Transformaciones estabilizadoras de la varianza	761
25.3 Validación de los modelos ANOVA con un factor aleatorio.....	762
<i>Caso 25.1</i>	763
26. El análisis de varianza en los diseños completamente aleatorizados con dos factores	775
26.1 Introducción	775
26.2 Poblaciones y muestras en los diseños con dos factores.....	776
26.3 Efectos fijos. Modelo aditivo y diseño equilibrado	782
26.4 Un efecto fijo y otro aleatorio. Diseño equilibrado y ausencia de interacción. Modelo aditivo mixto.....	785
26.5 Modelo aditivo con dos factores de efectos aleatorios en ausencia de interacción. Diseño equilibrado.....	787
26.6 Efectos fijos e interacción. Diseño equilibrado.....	788
<i>Caso 26.1</i>	792
<i>Caso 26.2</i>	800
<i>Caso 26.3</i>	806
26.6.1 <i>Una observación por celda</i>	809
<i>Caso 26.4</i>	811

26.7 Dos factores con efectos aleatorios e interacción. Diseño equilibrado	817
26.8 Un factor fijo y otro aleatorio con interacción. Diseño equilibrado.....	819
26.9 El modelo de las medias de las celdas cuando los dos factores son fijos.	
Diseño equilibrado	822
<i>Caso 26.5</i>	827
26.10 Efectos fijos y diseños desequilibrados.....	833
26.10.1 <i>Modelo aditivo cuando el diseño es desequilibrado</i>	838
26.10.2 <i>Métodos de resolución aproximada cuando el desequilibrio</i>	
<i>es pequeño</i>	838
<i>Caso 26.6</i>	842
27. Diseños experimentales basados en la formación de bloques	867
27.1 Bloques completos	867
27.2 Bloques incompletos	872
27.3 Cuadrados latinos	877
28. Diseños experimentales para los ensayos de intercomparación (II)	881
28.1 Programa de ensayos con <i>a</i> niveles de ensayo y un resultado por celda.	881
28.1.1 <i>Caso particular: dos niveles de ensayo.</i>	883
28.1.2 <i>Niveles de ensayo aleatorios.</i>	884
28.2 Programa de ensayos con <i>m</i> réplicas por casilla.....	884
28.2.1 <i>Modelo aditivo mixto</i>	886
28.2.2 <i>Niveles de ensayo aleatorios</i>	887
<i>Caso 28.1</i>	888
28.3 Variabilidad de los resultados en los programas de ensayos interlaboratorios	
generales.....	902
28.4 Modelos con coeficientes de variación interlaboratorios e intralaboratorio	
constantes.	904
28.5 Uso de la distribución normal bivalente en los programas de intercomparación	
con dos resultados por laboratorio.	910
28.5.1 <i>Programa de intercomparación con un único nivel de ensayo y dos</i>	
<i>réplicas efectuadas por cada laboratorio.</i>	913
28.5.2 <i>Programa de intercomparación con dos niveles de ensayo y una sola</i>	
<i>réplica por laboratorio y nivel. Hipótesis de varianzas constantes</i>	920
28.5.3 <i>Programa de intercomparación con dos niveles de ensayo y una</i>	
<i>sola réplica por laboratorio y nivel. Hipótesis de coeficientes</i>	

<i>de variación constantes</i>	924
28.5.4 Programa de intercomparación con dos niveles de ensayo y una sola réplica por laboratorio y nivel. Varianzas relacionadas con el nivel de ensayo	928
Caso 28.2	936
Anejos	959
Bibliografía	969