



Edafología

PARA LA AGRICULTURA
Y EL MEDIO AMBIENTE

J. Porta
M. López-Acevedo
C. Roquero

MP

Introducción

El título de la obra, **Edafología para la agricultura y el medio ambiente**, expresa la voluntad de destacar la importancia que se confiere en este libro al estudio de los suelos en temas medioambientales, además del ámbito agrícola, más habitual.

En la preparación del plan de la primera edición del libro, en 1992, fueron de gran utilidad las discusiones mantenidas con el profesor Peter Bullock, director por aquel entonces del Soil Survey and Land Resources Centre y catedrático de Edafología del Silsoe College del Cranfield Institute (hoy Cranfield University) en el Reino Unido. Desde un principio fue quedando clara la orientación que debía tener el libro, para reflejar los avances de la Ciencia del Suelo y dar respuesta a todas aquellas personas que inician su formación o dedican su actividad profesional en temas en los que una adecuada comprensión de los suelos resulta imprescindible.

A lo largo de los diez años transcurridos desde la aparición de la primera edición del libro, éste ha sido objeto de revisiones y ampliaciones de actualización. En cada edición se ha profundizado en los aspectos medioambientales en los que los suelos son un factor destacable.

La estructura del libro comprende cuatro bloques temáticos, yendo desde la Morfología y descripción de suelos, al estudio de los Componentes y propiedades de los suelos, a la Génesis, clasificación (WRB y Soil Taxonomy), cartografía y uso de información de suelos, para dedicar finalmente una detallada atención al estudio de la Degradación y rehabilitación de suelos.

En cada tema se parte de un nivel introductorio y se llega a un tratamiento avanzado. De manera que, si bien no se requieren conocimientos previos de Edafología para poder utilizar la obra en un primer ciclo, ésta incluye igualmente un tratamiento destinado a estudiantes de segundo ciclo, de master y a profesionales que quieran actualizar sus conocimientos en la materia o estén interesados en un determinado aspecto concreto. Por ello, se utilizan tipografías de distinto cuerpo, de manera que se facilite la lectura a dos niveles. Además, el libro se complementa con un detallado índice alfabético al final de la obra, con el fin de facilitar su consulta.

Por otro lado, en cada capítulo se presentan múltiples **Estudios de casos**, la mayoría de ellos resueltos, o bien se dan las bases para su discusión en seminario o tutoría. Este enfoque debe ayudar a adquirir una sólida comprensión de las exposiciones teóricas, lo que sin duda despertará en los lectores el gusto por el estudio de los suelos. En esta edición se actualizan y amplían los casos expuestos.

Cabe destacar que, si bien hace unos años se decía que *la información es poder*, en un momento como el actual, en el que la información desborda toda posibilidad de ser leída y más de ser estudiada con detenimiento, la frase ha pasado a ser *la gestión de la información es poder*. En base a ello, en esta edición, el libro presenta al final de cada capítulo la bibliografía estructurada en Bibliografía básica y Bibliografía de referencia. Además, se incluyen algunos recursos para acceder a la información a través de internet. Se omiten en la bibliografía algunas referencias clásicas, ya antiguas, pero que por su valor se han mantenido en el texto y que el lector interesado puede consultar en ediciones anteriores de esta obra.

Para escribir este libro en su primera edición, fue muy importante haber podido trabajar en la Biblioteca de la Cranfield University en Silsoe (UK), a la que se ha tenido ocasión de regresar para la tercera edición. En el mantenimiento de la obra al día son de agradecer las estancias en la Biblioteca de la Facultad de Ciencias de la UNAM (México, DF), la Biblioteca de la University of Reading (UK), la Biblioteca del Centro de Ciencias Medioambientales del CSIC (Madrid), la Biblioteca de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona y la Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de la Universidad de Lleida (Cataluña, España). A todo su personal, nuestro agradecimiento.

Además, tanto en la primera edición como en las siguientes, los originales de cada capítulo se han sometido a la consulta y revisión de especialistas en cada uno de ellos. En esta tercera edición queremos destacar y agradecer en especial la ayuda prestada por el Dr. Gonzalo Almendros (CSIC, Madrid), en la revisión del capítulo referente a los Componentes orgánicos del suelo. Por otro lado, agradecemos igualmente a aquellos profesores universitarios que nos han hecho llegar sus comentarios y sugerencias, lo que ha permitido mejorar el contenido.

El original de la primera edición recibió los cuidados impecables de Clara Llena, que tuvo a su cargo el tratamiento de textos, demostrando una gran profesionalidad en todo momento, siendo Xavier Goñi, quien llevó a cabo el diseño gráfico con ordenador, con igual profesionalidad. F. Xavier Vilagrasa, con una gran destreza ha contribuido a plasmar gráficamente diversos aspectos en las diversas ediciones. A los tres nuestro reconocimiento.

También agradecemos la labor de Maribel Hernández e Isabel Hernández, de Ediciones Mundi-Prensa, por su paciencia y perseverancia y al Banco Santander Central Hispano (SCH) por sumarse a la difusión del libro.

Los autores agradecerán todas aquellas sugerencias y comentarios (jporta@macs.udl.es) que permitan mejorar una obra cuya finalidad ha sido desde el primer momento poner a disposición de los estudiantes y profesionales un libro de Edafología en español, que resulte del máximo interés y esté lo más actualizado posible.

Jaume Porta Casanellas

Silsoe (UK), julio de 2003

Huajuapán de León (Oaxaca, México), octubre de 1998

Figueras (Asturias, España), agosto de 1993

Índice

	<u>Págs.</u>
Introducción	V
Prólogo a la primera edición	IX
Prólogo a la tercera edición	XIII
1. Evolución histórica del conocimiento edafológico: síntesis	1
1. Los avances históricos en Química y en Edafología	1
2. Los precursores de la Edafología	3
3. El nacimiento de la Edafología: Dokuchaev	3
4. Época reciente	5
5. La Edafología en España	10
5.1. Emilio Huguet del Villar: una figura insigne	10
5.2. El Mapa Agronómico	11
5.3. La enseñanza de la Edafología	12
5.4. El Instituto de Edafología	13
5.5. El Servicio de Conservación de Suelos	14
6. Implantación de los estudios de suelos en países de habla española ...	14
7. Perspectivas de futuro	15
8. Bibliografía	18
2. El suelo como ente natural: Organización	21
1. Estudio del suelo en el campo: pedión y polipedión	21
2. Horizontes genéricos: Reglas de nomenclatura	23
3. Sequum	30
4. Horizontes de diagnóstico	30
5. Epipedión y endopedión	31
6. Solum	34
7. Sección control	34
8. Bibliografía	36
3. Morfología y descripción de suelos	37
1. Propiedades observadas y propiedades inferidas	37
2. Metodología para estudios macromorfológicos	40
3. Límites entre horizontes	41
4. Descripción de suelos en el campo	43

4.1. Estado de humedad	44
4.2. Color	45
4.3. Manchas	49
4.4. Estado de oxidación	49
4.5. Elementos gruesos	50
4.6. Textura	51
4.7. Fracción arena	52
4.8. Estructura	52
4.9. Ensayos de campo: componentes del suelo	53
4.10. Consistencia	54
4.11. Cementaciones	55
4.12. Materia orgánica	56
4.13. Actividad biológica	56
4.14. Actividad humana	56
4.15. Raíces	56
4.16. Porosidad	57
4.17. Grietas	57
4.18. Estudio de superficies	57
4.19. Acumulaciones	58
5. Descripción codificada de suelos y bases de datos	58
6. Características morfológicas y crecimiento de las plantas	58
7. Bibliografía	59
4. Estudios de suelos en el laboratorio	61
1. Continuum de observación: Enfoques metodológicos	61
2. Caracterización del suelo: Técnicas clásicas	62
3. Técnicas avanzadas en el estudio del suelo	64
4. Estudios micromorfológicos de suelos	65
4.1. Conceptos cristalográficos básicos para la identificación de com ponentes minerales: Microscopio polarizante	66
4.2. Conceptos básicos en micromorfología	69
4.3. Descripción de láminas delgadas	70
5. Aplicaciones de la micromorfología	75
5.1. Interpretación de las observaciones	75
5.2. Métodos micromorfométricos: análisis de imagen	76
5.3. Ámbitos de aplicación de la micromorfología	77
6. Bibliografía	
5. Cómo se denominan los suelos: Elaboración de una nomenclatura	83
1. Introducción	83
2. Criterios para dar nombre a los suelos: A modo de ejercicio	85
3. Información complementaria para establecer una nomenclatura	86
4. Proponiendo denominaciones para los suelos	87
5. Niveles jerárquicos en Soil Taxonomy	88
6. Niveles jerárquicos en la Base de Referencia Mundial para los Recursos de Suelos (WRB) (FAO,1998)	89
7. Bibliografía	90
6. Textura del suelo	91
1. El suelo como sistema de tres fases	91
2. Textura	93
2.1. Concepto	93
2.2. Fracciones granulométricas y su justificación	94
2.3. Clases texturales	96
3. Análisis granulométrico	100
3.1. Aspectos generales	100
3.2. Representación de resultados	102
3.3. Interpretación de resultados: Significación de las distintas frac ciones	106
4. Bibliografía	109

7. Componentes inorgánicos del suelo	111
1. Ciclo de las rocas y minerales petrogenéticos	111
2. Silicatos: principios estructurales	112
3. Materiales de partida en la formación del suelo: A modo de síntesis ...	114
3.1. Minerales formadores de rocas (MFR)	122
3.2. Fracciones granulométricas del suelo y mineralogía	126
4. Minerales del suelo	127
4.1. Minerales de arcilla del suelo	128
4.2. Principios estructurales	129
4.3. Origen de la carga eléctrica y sus implicaciones	130
4.4. Origen de las arcillas	133
5. Principales especies minerales en el suelo	134
5.1. Minerales laminares	134
5.2. Minerales fibrosos	145
5.3. Aluminio-silicatos amorfos y paracristalinos	148
5.4. Tectosilicatos: Zeolitas (del gr. zein, hervir y lithos)	149
5.5. Óxidos e hidróxidos del suelo	150
5.6. Minerales de medios edáficos especiales	151
6. Minerales de suelos de zonas semiáridas y áridas	152
6.1. Minerales de arcillas	153
6.2. Calcita y carbonates relacionados	153
6.3. Yeso (CaSO ₄ - 2H ₂ O)	154
6.4. Sales más solubles que el yeso	157
7. Técnicas de identificación de minerales del suelo	157
8. Bibliografía	159
8. Componentes orgánicos del suelo	165
1. Materia orgánica de los suelos	165
1.1. Materia orgánica y humus	165
1.2. Factores que condicionan el contenido de m.o. en los suelos	167
1.3. Función de la m.o. del suelo	168
1.4. Procedencia de los componentes orgánicos del suelo	170
1.5. Composición de los restos vegetales	170
2. Técnicas de estudio de los componentes orgánicos de los suelos	174
2.1. Una panorámica sobre un tema complejo	174
2.2. Modelos de agregación y morfología macromolecular de las sus tancias húmicas: Enfoque fractal	179
3. Evolución de la materia orgánica: descomposición y mineralización . .	183
3.1. Esquema general de la evolución de la m.o.	183
3.2. Descomposición y mineralización de la m.o.	183
3.3. Procesos y tasas de mineralización	185
3.4. Factores que condicionan la degradación y mineralización	186
3.5. Procesos específicos de alteración de la m.o.	188
3.6. Mecanismos de resistencia a la degradación y mineralización . . .	190
3.7. Modelización de la mineralización de la m.o.	191
4. Formación de sustancias húmicas: humificación	193
4.1. Sustancias húmicas: Enfoques basados en extracciones y fraccio namientos	193
4.2. Aspectos genéricos de los procesos de humificación	195
4.3. Formación de sustancias húmicas: Vías	195
4.4. Características y comportamiento de las sustancias húmicas: Grupos funcionales	196
4.5. Sustancias húmicas: Características y comportamiento	198
5. Interacciones entre componentes orgánicos e inorgánicos: Complejos órgano-minerales	199
6. La materia orgánica como componente de un ecosistema	202
6.1. Distribución de la m.o. en el perfil del suelo	202
6.2. Ciclos biogeoquímicos y ciclo (turnover) de la m.o.	203
6.3. Papel de los suelos en el secuestro de carbón y cambio global . .	206

6.4. Agricultura sostenible y calidad de la materia orgánica	207
6.5. Gestión de la fertilidad de los suelos: Agricultura convencional y agriculturas alternativas	209
7. Aspectos ecológicos de la materia orgánica: Tipos ecológicos de humus .	216
8. Bibliografía	219
9. Reacciones de superficie: adsorción e intercambio iónico	227
1. Posición de los elementos químicos en el suelo	227
2. Fenómenos de adsorción	228
3. Distribución de iones en sistemas arcilla-agua	231
3.1. Doble capa difusa y solución externa	231
3.2. Modelos de distribución: Descripción cualitativa	232
4. Intercambio catiónico	233
4.1. Aspectos generales	233
4.2. Capacidad de intercambio catiónico	235
4.3. Cationes intercambiables	236
4.4. Ecuaciones de intercambio catiónico: Formulación y propiedades	238
4.5. Determinación de la CIC y cationes intercambiables	241
5. Intercambio aniónico.....	241
6. Estudio experimental de la adsorción	243
6.1. Formulación empírica	243
6.2. Adsorción de agroquímicos en el suelo	246
7. Bibliografía	247
10. Acidez, basicidad y reacción del suelo	251
1. Acidez, basicidad, propiedades del suelo y crecimiento de las plantas .	251
2. Acidez del suelo	256
3. Química de la acidez del suelo	259
3.1. Curvas de neutralización	260
3.2. Potenciales catiónicos	262
4. Acidificación del suelo	263
5. Implicaciones de manejo y recomendaciones: Necesidades de cal ...	264
6. Bibliografía	269
11. Estructura del suelo y propiedades relacionadas	271
1. Niveles de organización estructural	273
2. Mecanismos de formación de agregados	276
2.1. Fuerzas actuantes: Empaquetamiento y unidades de fábrica ...	276
2.2. Interacción entre partículas de arcilla	277
2.3. Agregación de partículas	283
3. Factores de control en la formación de agregados y en su degradación	286
4. Estabilidad de los agregados	287
5. Relaciones masa-volumen derivadas del grado de estructuración	290
5.1. Densidad real.....	291
5.2. Densidad aparente y volumen específico	291
5.3. Espacio de huecos: porosidad, un espacio vital para las raíces ..	293
6. Consistencia del suelo	296
7. Sellado y encostramiento del suelo	297
a) Conceptos y procesos	297
b) Métodos de estudio y predicción del riesgo	299
c) Prácticas contra el sellado y el encostramiento	300
8. Tixotropía	301
9. Bibliografía	302
12. Agua del suelo	307
1. Introducción al estudio del agua del suelo	307
2. Propiedades físicas del agua	308
3. Contenido de agua del suelo	311
3.1. Conceptos	311
3.2. Medida del contenido de humedad	312

4.	Estado energético del agua del suelo	316
4.1.	Fuerzas actuantes: Descripción cualitativa	316
4.2.	Potencial del agua del suelo	318
5.	Retención de agua en el suelo	333
5.1.	Curva característica de humedad	333
5.2.	Construcción de curvas características de humedad	335
5.3.	Histéresis en las relaciones entre potencial matricial y contenido de agua	337
5.4.	Interpretación de curvas características	339
5.5.	Capacidad de retención de agua disponible (CRAD)	341
6.	Bibliografía	345
13.	Propiedades hidrológicas del suelo: movimiento del agua	349
1.	El suelo como medio poroso	349
2.	Flujo del agua en el suelo	351
2.1.	Régimen saturado	352
2.2.	Régimen no saturado	358
3.	Ecuaciones del flujo de agua	360
3.1.	Ecuación de continuidad	360
3.2.	Ecuación general del flujo	362
4.	Infiltración.....	365
4.1.	Descripción cualitativa del proceso de infiltración	367
4.2.	Factores de control de la infiltración	368
4.3.	Modelos y ecuaciones de la infiltración	371
5.	Redistribución	375
6.	Determinación de las propiedades hidráulicas del suelo	377
6.1.	Medida de la conductividad hidráulica saturada	377
6.2.	Medida de la velocidad de infiltración	387
7.	Bibliografía	390
14.	Aireación del suelo	393
1.	Aireación del suelo	393
2.	Diagnóstico del estado de óxido-reducción de un suelo	395
3.	Mecanismos de intercambio de gases en el suelo	397
4.	Flujo de gases por difusión: Leyes de Fick	398
5.	Química de los procesos redox en el suelo	402
6.	Diagramas de estabilidad: Diagramas Eh pH	408
7.	Medidas del estado de aireación del suelo	411
8.	Bibliografía	414
15.	Flujo de calor y temperatura del suelo	417
1.	Régimen térmico del suelo	417
2.	Mecanismos de transmisión de calor en el suelo	418
3.	Propiedades térmicas del suelo	419
4.	Ecuación de flujo de calor por conducción	423
5.	Soluciones de la ecuación de flujo de calor por conducción	426
5.1.	Métodos analíticos	426
5.2.	Métodos numéricos	433
6.	Flujos acoplados	436
6.1.	Flujos de calor y agua	436
6.2.	Flujos de calor, agua y solutos	437
7.	Medida de la temperatura del suelo	437
8.	Representación de las medidas de temperatura	438
9.	Medida del flujo de calor	439
10.	Modificación de régimen térmico del suelo	439
11.	Bibliografía	440
16.	Ecología del suelo	443
1.	Ecología del suelo	443
2.	Tipos de organismos del suelo	444

2.1. Tipos de organismos según la fuente de energía	444
2.2. Tipos de organismos según el tamaño	445
2.3. Principales tipos de organismos: Características	446
3. Ciclos biogeoquímicos	453
3.1. Aspectos generales	453
3.2. Ciclo de elementos: Caso del carbono	454
4. Acciones de los organismos del suelo	456
4.1. Acciones y factores de control	456
4.2. Medida de la actividad biológica del suelo	460
5. Interacciones entre organismos del suelo	461
5.1. Interacciones entre microorganismos	461
5.2. Interacciones microorganismos-fauna del suelo	462
5.3. Interacciones planta-microorganismos: Rizosfera	462
5.4. Interacciones entre hongos y algas: Liqúenes	465
6. Organismos del suelo y calidad ambiental	465
7. Bibliografía	467
17. Procesos formadores	469
1. Formación de suelos: Enfoques conceptuales	469
2. Procesos de meteorización	471
2.1. Concepto	471
2.2. Meteorización: Esquema general	473
3. Procesos edafogénicos	489
3.1. Aspectos generales	489
3.2. Principales procesos formadores	492
4. Procesos y categorías de suelos	505
4.1. Procesos edafogénicos en los Entisoles	505
4.2. Procesos edafogénicos en los Inceptisoles	507
4.3. Procesos edafogénicos en los Andisoles	508
4.4. Procesos edafogénicos en los Vertisoles	509
4.5. Procesos edafogénicos en Alfisoles	510
4.6. Procesos edafogénicos en los Aridisoles	511
4.7. Procesos edafogénicos en los Mollisoles	512
4.8. Procesos edafogénicos en los Spodosoles	513
4.9. Procesos edafogénicos en los Ultisoles	514
4.10. Procesos edafogénicos en los Oxisoles	515
4.11. Procesos edafogénicos en los Histosoles	516
4.12. Procesos edafogénicos en los Gelisoles	516
5. Bibliografía	517
18. Factores formadores	521
1. Variabilidad espacial de los suelos	521
2. Factores formadores	521
3. Material originario y sus relaciones con el suelo	523
3.1. Información sobre el material originario	523
3.2. Características del material originario	523
3.3. Influencia del material originario sobre las características del suelo.	524
3.4. Tipos de rocas y características de los suelos	525
3.5. Grado de uniformidad del material originario	525
4. Relaciones suelo-clima	525
4.1. Información sobre el clima	526
4.2. Clima y regímenes de humedad del suelo	527
4.3. Tendencias regionales en la distribución de suelos	528
5. Relaciones suelo-paisaje	529
5.1. Escalas de observación	530
5.2. Formas del relieve	531
5.3. Procesos y formas de las laderas	533
5.4. Sistemas suelo-paisaje	533
5.5. Relaciones suelo-paisaje: Toposecuencia	533
5.6. Condiciones de drenaje y morfología de los suelos	534
5.7. Relaciones suelo-paisaje: Influencia del clima	536

6.	Factores bióticos y antrópicos de la edafogénesis	538
6.1.	Actividad de la fauna y efectos sobre el suelo	538
6.2.	Relaciones suelo-vegetación	540
6.3.	Indicadores de la vegetación pasada	542
6.4.	Acción antrópica y formación de suelos: Sostenibilidad y edafotecnología	543
7.	Dimensión temporal de los suelos	546
7.1.	Datación de suelos	547
7.2.	Ciclos evolutivos: Suelos monocíclicos y policíclicos	548
8.	Enfoque factorial en génesis de suelos: Perspectivas	551
9.	Bibliografía	552
19.	Soil Taxonomy	555
1.	Clasificación de suelos: Criterios científicos y criterios utilitarios	555
2.	Taxonomía de suelos: Antecedentes	556
3.	Principios de Soil Taxonomy	557
4.	Estructura del sistema	559
4.1.	Diferencias entre suelos minerales y suelos orgánicos	559
4.2.	Horizontes y características de diagnóstico	560
4.3.	Categorías taxonómicas y reglas de nomenclatura	569
5.	Metodología para clasificar un suelo	570
6.	Soil Taxonomy (SSS, 1999): Una panorámica	571
7.	Modificaciones de Soil Taxonomy	577
8.	Bibliografía	578
20.	Base de referencia mundial para los recursos de suelos: World Reference Base (WRB).....	579
1.	Leyenda de un mapa versus clasificación de suelos.....	579
2.	Base de referencia mundial (WRB) versus Soil Taxonomy.....	580
3.	Principios de la Base de referencia mundial para Recursos de Suelos(WRB)	581
4.	Estructura de la Base de Referencia Mundial (WRB)	582
4.1.	Horizontes, propiedades y materiales de diagnóstico.....	582
4.2.	Grupos de suelos de referencia.....	583
4.3.	Unidades de suelos.....	585
5.	Grupos de suelos: Síntesis	586
6.	Bibliografía.....	588
21.	Cartografía de suelos y sistemas de información geográfica.....	591
1.	Inventario y cartografía del recurso de suelo.....	591
2.	Finalidad de un levantamiento de suelos	593
3.	Principios de cartografía de suelos	597
4.	Variabilidades especiales de los suelos: Unidades taxonómicas cartográficas y de manejo.....	599
5.	Modelos de relación de suelos: Clases de unidades cartográficas	603
6.	Metodología de trabajo en cartografía de suelos: Formulación y contraste de hipótesis.....	604
7.	Modelos de representación de la cubierta edáfica: De la serie de suelos a las unidades morfoedáficas	607
7.1.	Cartografía basada en las series de suelos.....	608
7.2.	Modelo basado en unidades morfoedáficas	609
8.	Extrapolación e interpolación: Cartografía libre y cartografía geoestadística	612
9.	Información contenida en un mapa de suelos: Leyenda del mapa	612
10.	Instrumentos de apoyo a la cartografía de suelos.....	614
11.	Intensidad de la cartografía y tipos de mapas.....	615
12.	Bases de datos electrónicas de suelos: Información en soporte..... informático en red	618
13.	Gestión de información de suelos: Sistemas de información geográfica	619
14.	Criterios para evaluar la calidad de un mapa de suelos.....	621
15.	Bases para elaborar el presupuesto de una cartografía de suelos.....	624
16.	Bibliografía.....	626

22. Usos y aplicaciones de la información de suelos	631
1. Interpretación y usos de la información de suelos	631
2. Modelización de las cualidades del terreno	632
3. Utilización directa de un mapa de suelos para la toma de decisiones en una explotación agrícola	634
4. Evaluación de suelos y evaluación del terreno	637
5. Principales sistemas actuales de evaluación	638
6. Método de clases de capacidad agrológica	640
7. Sistema del US Bureau of Reclamation (USBR): Aptitud para el riego ..	645
8. Sistema de evaluación de terrenos agrícolas de alta calidad: «prime farmlands» y «unique farmlands»	649
9. Sistema Riquier-Bramao-Cornet (1970)	651
10. Esquema de la FAO (1976) de evaluación del terreno	653
11. Utilización de Mapas de Suelos con fines catastrales: Método del Valor índice	659
12. Evaluación del potencial para el uso agrícola de grandes áreas: Método de las zonas agro-ecológicas (AEZ)	663
13. Método del índice de potencialidad del suelo	666
14. Bibliografía	666
23. Degradación de suelos por erosión hídrica: Conservación de suelos y aguas	669
1. Erosión del suelo	669
1.1. Concepto y percepción	669
1.2. Agentes, formas e intensidades	671
1.3. Procesos de erosión hídrica	672
2. Factores de control de los procesos erosivos	676
2.1. Principales factores	676
2.2. Estudio de los factores hidrológicos	678
3. Técnicas de medida y modelos de evaluación de las pérdidas de suelo ..	699
3.1. Procesos de erosión por salpicadura: Cuantificación	699
3.2. Procesos de erosión por escorrentía superficial concentrada: Cuantificación	701
3.3. Procesos de erosión laminar y por arroyaderos: Cuantificación ..	702
4. Medidas de conservación de suelos y aguas	713
4.1. Técnicas generales de cultivo	714
4.2. Técnicas especiales de cultivo	716
4.3. Infraestructuras y obras para conservar el suelo y el agua	719
5. Bibliografía	722
24. Salinización y sodificación: Suelos de regadío	727
1. Salinidad, sodicidad y alcalinidad	727
2. Origen de las sales solubles: Ciclos de salinización	729
2.1. Ciclos continentales	730
2.2. Ciclos marinos de acumulación de sales	731
2.3. Ciclos deltaicos de acumulación de sales	732
2.4. Ciclos artesianos	732
2.5. Ciclos antropogénicos	732
3. Sales solubles en suelos y aguas de zonas semiáridas y áridas	734
3.1. Principales minerales evaporíticos	734
3.2. Principales tipos de sales en suelos y aguas	735
4. Química del boro en los suelos	739
4.1. Comportamiento de los cultivos en relación al boro	739
4.2. Formas del boro en los suelos: Adsorción	741
5. Salinidad, sodicidad y crecimiento de las plantas	744
5.1. Sintomatología	744
5.2. Efectos de la salinidad y de la sodicidad	744
5.3. Adaptación de las plantas a la salinidad. Comunidades indicadoras	746
5.4. Tolerancia de los cultivos a la salinidad	747
5.5. Tolerancia de los cultivos al sodio intercambiable (ESP)	759

6.	Calidad del agua de riego: Criterios de evaluación y predicción	762
6.1.	Calidad agronómica del agua	762
6.2.	Riesgo de sodicidad	763
6.3.	Criterios para interpretar la calidad de un agua para riego	764
6.4.	Efectos de la salinidad y sodicidad sobre las propiedades físicas del suelo	766
7.	Medida de la salinidad	771
7.1.	Medidas de laboratorio	771
7.2.	Medidas de campo	771
8.	Bibliografía	771
25.	Degradación de la fertilidad física del suelo	777
1.	Aspectos físicos de la fertilidad del suelo	777
2.	Agromepánica: Importancia e impactos	779
3.	Sistema radicular y medio edáfico	780
3.1.	Diagnóstico de problemas en el crecimiento radicular	781
3.2.	Metodología para el estudio de la rizosfera	784
3.3.	Condiciones físicas y crecimiento de la planta	785
4.	Compactación del suelo	788
4.1.	Proceso de compactación	788
4.2.	Descripción y medida del estado de compactación	789
4.3.	Efectos de la compactación sobre la estructura del suelo	790
4.4.	Comportamiento mecánico del suelo en la compactación	790
5.	Sellado y encostramiento superficial	792
6.	Modelos del comportamiento físico del suelo	792
7.	Manejo del suelo y compactación	792
8.	Bibliografía	793
26.	Degradación del territorio en zonas áridas	797
1.	Estudio de zonas áridas	797
2.	Escala y extensión del problema	799
2.1.	Criterios de delimitación de zonas áridas	999
2.2.	Distribución mundial de las zonas áridas	801
2.3.	Factores meteorológicos determinantes de la distribución de las zonas áridas	804
2.4.	Criterios edáficos: Régimen arídico	806
3.	Suelos de zonas áridas	807
3.1.	Características generales	807
3.2.	Mineralogía de suelos de áreas desérticas	810
3.3.	Uso del suelo en regiones áridas	811
4.	Degradación del territorio	812
4.1.	Aridez y sequía	812
4.2.	Desertización y desertificación	813
4.3.	Indicadores edáficos de la aridificación	816
4.4.	Causas y procesos de la desertificación	816
5.	Dimensión global del problema: Ejemplos	817
5.1.	Procesos de degradación ligados al nomadismo y al pastoreo sedentario	817
5.2.	Procesos de degradación ligados a la intensificación del uso del riego con tecnología inadecuada	818
5.3.	La crisis de la región Sahelo-Sudanesa: 1967-70	818
6.	Medidas de control frente a la desertificación	819
7.	Bibliografía	821
27.	Degradación de suelos y calidad ambiental	825
1.	Calidad de un suelo	825
2.	Residuos y sustancias peligrosas	826
3.	Áreas misceláneas: Terrenos contaminados y terrenos abandonados ..	829
4.	Contaminación de suelos	830
5.	Contaminación por elementos traza	832
5.1.	Fondo geoquímico	832

5.2. Distribución y especiación de los elementos traza a partir de la solución del suelo	833
5.3. Cargas críticas	834
5.4. Suelos contaminados por Pb, Zn, Cd	836
5.5. Aplicación de la geoestadística y los SIG al estudio de los suelos contaminados	837
6. Riesgos derivados de la contaminación	838
6.1. Componentes del riesgo	840
6.2. Biodisponibilidad	841
6.3. Riesgos para los ecosistemas	842
6.4. Riesgos para los suelos	842
6.5. Evaluación de riesgos	843
7. Evaluación ambiental del terreno	844
8. Estrategias frente a la contaminación de suelos	845
8.1. Manejo de residuos y sustancias peligrosas	845
8.2. Estrategias de agricultura sostenible/sustentable	846
8.3. Acciones en la relación fuente-vía-receptor	847
8.4. Estudio detallado de una técnica: Biorremediación	848
8.5. Toma de decisiones frente a problemas de contaminación	851
9. Bibliografía	851
28. Degradación de suelos en relación con prácticas agrícolas inadecuadas .	855
1. El suelo como sistema depurador: Procesos	855
2. Capacidad de aceptación de residuos de un suelo	858
3. Agroquímicos y medio ambiente	859
3.1. Tipos de agroquímicos y registro de nuevos productos	860
3.2. Criterios de seguridad en los fitosanitarios	861
3.3. Mecanismos de control de los fitosanitarios en el suelo	862
4. Contaminación por nitratos	867
4.1. De nutriente de las plantas a contaminante de las aguas: Problema del N-NO ₃ en el medio ambiente	867
4.2. Ciclo del nitrógeno	868
4.3. Procedencia de los N-NO ₃ en las aguas	871
4.4. Movimiento y transformaciones de N-NO ₃ en el suelo: Modelos .	872
4.5. Medidas para el control N-NO ₃ en el medio	872
4.6. Evaluación de la capacidad de un suelo para aceptar purines . . .	874
5. Aguas superficiales, fosfatos y eutrofización	877
6. Utilización agrícola de lodos residuales de depuradora	879
7. Bibliografía	882
29. Degradación de suelos: Áreas con actividades extractivas y mineras.	
Áreas periurbanas y urbanas	885
1. El paisaje colectivo	885
2. Actividades extractivas y mineras	886
2.1. Panorámica general	886
2.2. Tipos de explotaciones	887
3. Rehabilitación de suelos tras actividades extractivas	889
3.1. Aspectos legales	889
3.2. Condicionantes de la rehabilitación	891
3.3. Capaceo: Una acción preventiva para conservar el material edáfico.	892
3.4. Proceso de rehabilitación	894
3.5. Relleno de excavaciones	895
3.6. Proyecto de rehabilitación	900
4. Áreas periurbanas: Degradación de las tierras más fértiles	902
5. Suelos de áreas urbanas: Actuaciones en Arquitectura del paisaje . . .	903
6. Denominación de los suelos de áreas degradadas por acción antrópica . .	906
7. Bibliografía	907
Notaciones y unidades	911

índice alfabético

917