ISSN 0188-7297

GENESIS, IDENTIFICACION Y USO DE LOS SUELOS DE MEXICO:

Distribución, Propiedades, Clasificación y Manejo de Suelos Residuales y Transportados con Aplicaciones a la Ingeniería Civil.

Instituto Mexicano del Transporte

Secretaría de Comunicaciones y Transportes

Documento Técnico No.19
Sanfandila, Qro., 1998

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
Secretaría de Comunicaciones y Transportes

GENESIS, IDENTIFICACION Y USO DE LOS SUELOS DE MEXICO:

Distribución, Propiedades, Clasificación y Manejo de Suelos Residuales y Transportados con Aplicaciones a la Ingeniería Civil.

Documento Técnico No.19
Sanfandila, Qro., 1998

Esta obra es resultado de un trabajo de investigación conjunta, entre el Instituto Mexicano del Transporte (I.M.T.) y el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.), coordinado por el Dr. Paul Garnica Anguas, Jefe de la División de Laboratorios de Infraestructura del I.M.T., y el M.C. Sergio Palacios Mayorga, Jefe del Departamento de Edafología del Instituto de Geología de la U.N.A.M.

El trabajo fue elaborado en detalle por el Dr. Jorge E. Gama Castro, la Dra. Dora C. Carreón Freyre, el M.C. Sergio Palacios Mayorga y la M.C. Elizabeth Solleiro Rebolledo, todos ellos investigadores del Instituto de Geología de la U.N.A.M., y revisado por el Dr. Paul Garnica Anguas.

Se destaca también la colaboración del Ing. José Antonio Hernández Guerrero, tesista de la Maestría en Vías Terrestres de la Universidad Autónoma de Chihuahua, quien realizó trabajo de campo y de laboratorio.

CONTENIDO

RESUMEN ____ xiii
ABSTRACT ____ xiii
RESUMEN EJECUTIVO ____ xiv
INTRODUCCION ____ xviii

PARTE I: CONCEPTOS BASICOS 1

Objetivos 1

1. EL SUELO Y SUS DEFINICIONES 2

1.1 DEFINICIONES DE SUELO ACEPTADAS EN DIFERENTES DISCIPLINAS 2
1.1.1 Ciencia del Suelo 2
1.1.2 Geología 2
1.1.3 Ingeniería Civil 3

1.2 El SUELO COMO UN CUERPO NATURAL ORGANIZADO 3

2 EL PERFIL DE SUELO 5

2.1 DEFINICION DEL PERFIL 5
2.1.1 Conceptos de Horizonte y Capa 5
2.1.2 Análisis Cuantitativo del Suelo 5

• FIGURA 1: EL PERFIL DEL SUELO 6
2.1.3 Análisis Cualitativo del Suelo 6

2.2 PERFIL MORFOLOGICO DEL SUELO 6
2.2.1 Definición de los Horizontes según el Sistema ABC 6

• FIGURA 2: EL PERFIL MORFOLOGICO DEL SUELO 7
2.2.1.1 Horizontes Orgánicos 8
2.2.1.2 Horizontes Minerales 8
2.2.2 Distinciones Subordinadas dentro de los Horizontes y Capas del Suelo 11

2.3 TERMINOS APLICABLES AL SUELO 13

3 **CLASIFICACION DE LOS SUELOS EN MEXICO** 15

Objetivos 15

3.1 **GENERALIDADES** 15
3.1.1 Sistema propuesto por la FAO-UNESCO 15
3.1.2 7ª. Aproximación (USDA,1988-1990) 16

3.2 **DEFINICION Y DESCRIPCION DE SUELOS RESIDUALES** 16

- **FIGURA 3**: CARACTERIZACION DE SUELOS RESIDUALES DE MÉXICO 17

3.3 **DEFINICION Y DESCRIPCION DE SUELOS TRANSPORTADOS** 19
3.3.1 Propuesta de Clasificación 19
3.3.2 Características de Diagnóstico 20

3.4 **UNIDADES DE SUELOS EN MEXICO** 20

- **FIGURA 4**: CARACTERIZACION DE SUELOS TRANSPORTADOS DE MEXICO 21

3.4.1 Diagnosis de las Unidades de Suelo (FAO-Unesco, 1990) y sus Relaciones Medioambientales para México 22

- **TABLA 1:** UNIDADES DE SUELOS FAO-UNESCO (1990) Y CONDICIONES MEDIO AMBIENTALES 26

- **FIGURA 5 A**: SUELOS NO CLIMATICOS 32
- **FIGURA 5 B Y 5 C**: SUELOS CONDICIONADOS POR EL MATERIAL PARENTAL Y SUELOS CON DESARROLLO INCIPIENTE 33
- **FIGURA 5 D:** SUELOS QUE MUESTRAN ACUMULACION DE SALES 34
- **FIGURAS 5E Y 5F**: SUELOS QUE MUESTRAN UNA ACUMULACION SIGNIFICATIVA DE MATERIA ORGANICA EN LOS HORIZONTES SUPERFICIALES Y SUELOS QUE ACUMULAN ARCILLA EN LOS HORIZONTES SUBSUPERFICIALES 35
- **FIGURA 5G**: SUELOS TROPICALES Y SUBTROPICALES DE CLIMA CALIDO-HUMEDO 36
- **FIGURAS 5H y 5I:** SUELOS ORGANICOS Y SUELOS HECHOS POR EL HOMBRE 37

PARTE II FACTORES FORMADORES DE SUELOS 38
Introducción 38
Objetivo 38

4. FACTOR CLIMA 40

4.1 MARCO TEORICO 40
4.1.1 Interacción Atmósfera - Litósfera 40

- **FIGURA 6**: METEORIZACION, INTEMPERISMO Y ALTERACION 41

4.1.2 Intemperismo 41

4.2 CLIMA, GEOGRAFÍA Y DINÁMICA DE LOS PROCESOS DE INTEMPERISMO 42

- **TABLA 2:** FACTORES CLIMATICOS COMO AGENTES DE INTEMPERISMO 43

4.2.1 Clima y distribución de los Minerales del Suelo 44

- **FIGURA 7**: EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA DISTRIBUCION DE MINERALES ARCILLOSOS
4.2.2. Índice de Weinert 45
4.2.3. Índice de Lixiviación 46
4.2.4. Índice de Alteración 47

4.3 CLIMAS EN MÉXICO 48
4.3.1 Tipos de Climas 48
4.3.1.1 Grupo de climas A 48

- **FIGURA 8**: REGIONES DE SUELOS Y ZONAS CLIMATICAS 49

4.3.1.2 Grupo de climas B, secos 50
4.3.1.3 Grupo de climas C, templados 50
4.3.1.4 Grupo de climas E, fríos 51

4.4 CLIMA DEL SUELO O EDAFOCLIMA 51
4.4.1 Cálculo del Balance de Agua en el Suelo. Método de Thornwhaite (1948) 52

- **FIGURAS 9, A, B, C:** BALANCE DE AGUA EN EL SUELO: REGIMEN DE HUMEDAD 54
4.4.2. Regímenes de Humedad del Suelo (USDA, 1990) 56
4.4.2.1 Régimen de humedad ácuico 56
4.4.2.2 Regímenes de humedad arídico y tórrico 56

4.4.2.3 Régimen de humedad údico 56
4.4.2.4 Régimen de humedad ústico 57
4.4.2.5 Régimen de humedad xérico 57
OBSERVACION 57

4.4.3 Regímenes de Temperatura del Suelo 57
4.4.3.1 Régimen de temperatura pergélico 57
4.4.3.2 Régimen de temperatura cryico 58
4.4.3.3 Régimen de temperatura frígido 58
4.4.3.4 Régimen de temperatura mésico 58
4.4.3.5 Régimen de temperatura térmico 58
4.4.3.6 Régimen de temperatura hipertérmico 58
OBSERVACIÓN 58

5 MATERIAL PARENTAL 59

5.1 CLASIFICACIONES PARA EL MATERIAL PARENTAL 60
5.1.1 Rocas Ígneas 60

- **TABLA 3**: TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS IGNEAS 60
5.1.2 Rocas Sedimentarias 61

- **TABLA 4:** TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS SEDIMENTARIAS 61
5.1.3 Rocas Metamórficas 62

- **TABLA 5:** TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS METAMORFICAS 62
OBSERVACION 62

5.1.4 Depósitos Formadores de Suelo 62

- **TABLA 6:** TIPOS PRINCIPALES DE DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS 63

5.2 DIAGNOSIS DEL SUELO EN FUNCION DEL MATERIAL PARENTAL 63
5.2.1 Unidades de Suelos de México formados a partir de Rocas 63
5.2.1.1 Suelos formados a partir de rocas sedimentarias 63
5.2.1.2 Suelos formados a partir de rocas ígneas 65
5.2.1.3 Suelos formados a partir de rocas metamórficas 66

5.2.2 Unidades de Suelos formados a partir de Depósitos no Consolidados 68
5.2.2.1 Depósitos de llanuras costeras 68
5.2.2.2 Dunas 68
5.2.2.3 Depósitos glaciares 69
5.2.2.4 Depósitos lacustres 69
5.2.2.5 Depósitos de loess 69

5.2.2.6 Depósitos volcánicos 70
OBSERVACIONES 71

- **LAMINA 1: ROCAS FORMADORAS DE SUELOS** 72

6 FACTOR RELIEVE 73
6.1 DINAMICA DEL RELIEVE 73

- **TABLA 7**: ACCIDENTES TOPOGRAFICOS Y SUS PROCESOS DE FORMACION 75

6.2 MODELOS DE RELIEVE UTILIZADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS SUELOS 75
- **FIGURA 10:** EL RELIEVE COMO FACTOR FORMADOR DE SUELOS 76

6.3 SECUENCIAS TOPOGRAFICAS Y CATENAS DE SUELOS 77
6.4 DESCRIPCION DE LOS SUELOS SEGUN EL RELIEVE 78

7 ORGANISMOS 79

7.1 INTEMPERISMO BIOLOGICO 79

- **TABLA 8:** BIOMASA APROXIMADA DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES MAYORES DE LA BIOTA DE UN SUELO TIPICO DE PRADERA DE CLIMA TEMPLADO (KILLHAM, 1994) 80

7.2 PARTICIPACION DE LA BIOTA EN EL DESARROLLO DE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE DIAGNOSTICO DEL SUELO 80
7.2.1. Microbiota 80
7.2.2. Macrobiota 81

- **FIGURA 11**: COMPARACION DE MODELOS DE PERFILES IDEALIZADOS PARA SUELOS FORESTALES 82
7.2.3. Bioperturbación 83

7.3 PAPEL DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS MAS IMPORTANTES DEL SUELO EN LA ACTIVIDAD MICROBIANA 83
7.3.1. Carbono 83
7.3.2. Nitrógeno 84
7.3.3. Fósforo 84
7.3.4. Azufre 84

7.4 RELACION DE LOS ORGANISMOS CON OTROS FACTORES AMBIENTALES 85
7.4.1. Humedad 85

7.4.2 Aeración 85
7.4.3 Concentración de iones Hidrógeno en la Solución del Suelo (pH) 86
7.4.4 Temperatura 86

7.5 LA MATERIA ORGANICA DEL SUELO 87
7.5.1. El Humus 87
7.5.2. Relación C/N 89

7.6 INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGANICA EN LAS CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL SUELO 89

- **FIGURA 12**: TRANSFORMACIONES DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES DE ALTO PESO MOLECULAR DE LOS ORGANISMOS (FAO,1977) 90

7.6.1. Efectos de los polímeros en relación a la "Fábrica" del Suelo 91
7.6.1.1. Coloides esféricos del suelo (ácidos húmicos) 91
7.6.1.2. Coloides lineares del suelo (polisacáridos y polielectrolitos) 92

7.7 INDICES RELACIONADOS CON LA INFLUENCIA DE LA VEGETACION EN EL DESARROLLO DE LOS SUELOS 92
7.7.1. Índice de Crecimiento Vegetal, **ICV** 92
7.7.2. Índice de Descomposición de la Materia Orgánica **I DMO** 92
7.7.3. Índice de Cobertura Vegetal, **COVE** 92

- **TABLA 9**: PORCENTAJE DE CUBRIMIENTO DEL SUELO 93

7.8 DEGRADACION BIOLOGICA DEL SUELO 93
7.8.1. Factores a considerar durante la Evaluación de la Degradación Biológica , (FAO,1980) 94
OBSERVACIONES 95

8 FACTOR TIEMPO 96

8.1 DINAMICA TIEMPO-SUELO 96

8.2 EDAD DE LOS SUELOS 97
8.2.1 Métodos Directos para Determinar la Edad del Suelo 98
8.2.1.1 Fechado Absoluto de los Horizontes de Suelos 98

- **TABLA 10:** ESTIMACIONES DEL INDICE DE FORMACION DE SUELOS 100

8.2.1.2 Índice de Formación de Suelos 100
8.2.1.3 Modelos Experimentales 102
8.2.2 Métodos Indirectos para Determinar la Edad del Suelo 102
8.2.3. Edad Evolutiva de los Suelos 103

• **FIGURA 13**: SECUENCIA DE SUELOS FORMADOS A PARTIR DE BASALTO 104

9 DRENAJE DEL SUELO 105

9.1 DEFINICIONES 105
9.1.1. Permeabilidad 105

• **TABLA 11:** CLASES DE PERMEABILIDAD EN LA CIENCIA DEL SUELO 105

9.1.2. Conductividad Hidráulica 105

• **TABLA 12**: CLASES DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN LA CIENCIA DEL SUELO 106

9.1.3. Drenaje Interno del Suelo 106

9.2 CLASES DE DRENAJE 107
9.2.1 Sin Drenaje Interno 107
9.2.2 Muy Lento 108
9.2.3 Lento 108
9.2.4 Medio 108
9.2.5 Rápido 109
9.2.6 Muy Rápido 109

9.3 AGUA FREATICA Y FLUCTUACION DEL NIVEL FREATICO 110

9.4 EFECTOS DEL DRENAJE SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS 111

PARTE III PERFILES DE SUELOS RESIDUALES 112

Introducción 112

Objetivos: 112

10 FORMACION DE LOS SUELOS RESIDUALES 113

10.1 MINERALOGIA DE SUELOS RESIDUALES 113

10.1.1 Condiciones Generalizadas para la Formación y la Persistencia de Minerales Arcillosos Comunes 113
10.1.1.1 Grupo de las Caolinítas 113
10.1.1.2 Grupo de las Esmectitas o de la Montmorillonita 114
10.1.1.3 Grupo de las Cloritas 115
10.1.1.4 Grupo de complejos arcillosos interestratificados 116
10.1.1.5 Minerales asociados a las arcillas 116
10.2 INTEMPERIZACION GEOQUIMICA 118
10.2.1 Oxidación 118
10.2.2 Reducción 118
10.2.3 Oxidación-Reducción 119
10.2.4 Hidratación 119

- **FIGURA 14**: ESTABILIDAD DEL HIERRO Y DEL MANGANESO, EN RELACION CON EL Eh y pH, EN SOLUCIONES DE CLORURO O.O1N (COLLINS 1968) 120

10.2.5 Carbonatación 121
10.2.6 Disolución 121
10.2.7 Hidrólisis 122

10.3 INTEMPERIZACION EDAFOQUIMICA 122
10.3.1 Ciclos de Oxidación-Reducción 122
10.3.2 Transferencia cíclica del Aluminio de las Estructuras Arcillosas a los Óxidos Hidratados, a través de los Sitios de Intercambio 123
10.3.3 Desplazamiento del Potasio de las Micas 123
10.3.4 Adición de Aluminio a las Capas Intermedias de Minerales Arcillosos del Grupo de las Esmectitas (denominados 2:1) 124

10.4 INDICES DE ESTABILIDAD Y SECUENCIA DE INTEMPERIZACION 124
10.4.1 Serie de Estabilidad Mineral de Goldich 124

- **FIGURA 15**: SERIE DE ESTABILIDAD DE GOLDICH 125

10.4.2 Modelo de Jackson 125
0BSERVACIONES 126

11 PERFIL DE INTEMPERISMO Y ZONAS DE ALTERACION 127

11.1 PERFIL DE INTEMPERISMO; CONCEPTO ADOPTADO POR LA GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE (USDA1988) 127
11.1.1 Zona que ocupa el "Suelo Residual", propiamente dicho, RS 127
11.1.2 Zona de Completa Alteración, PW 0/30 127
11.1.3 Zona de Alta Alteración, P/W 30/50 127
11.1.4 Zona de Alteración Moderada, PW 50/90 128
11.1.5 Zona de Alteración Ligera, PW 90/100 128
11.1.6 Zona con Ausencia de Alteración, UW 128

OBSERVACIONES 128

- **FIGURA 16:** ZONAS DE INTEMPERISMO EN EL PERFIL 129

11.2 PERFIL DE INTEMPERISMO: CONCEPTO GEOQUIMICO 130

11.2.1 Zona Superior 130

11.2.2 Zona Intermedia 130

11.2.3 Zona Inferior 131

OBSERVACIÓNES 131

11.3 DINAMICA DE LA FORMACION DEL PERFIL DE INTEMPERISMO 131

11.3.1 Etapas 1 y 2 131

- **FIGURA 17**: ETAPAS DE LA DINAMICA DE FORMACION DEL PERFIL DE INTEMPERISMO

11.3.2 Etapas 3 y 4 133

11.3.3 Etapa 5 133

- **FIGURA 18**: ETAPAS DE LA DINÁMICA DE FORMACIÓN DEL PERFIL DE INTEMPERISMO. ETAPA 2 134
- **FIGURA 19**: ETAPAS DE LA DINÁMICA DE FORMACIÓN DEL PERFIL DE INTEMPERISMO. ETAPAS 3 Y 4 135
- **FIGURA 20**: MICROMORFOLOGÍA DEL HORIZONTE B CÁMBICO. ETAPAS DE INTEMPERISMO 3 y 4 136

11.3.4 Etapa 6 137

11.4 **MEDICION DE LOS GRADOS DE INTEMPERISMO Y DE DESARROLLO DE LOS SUELOS** 137

11.4.1 Índice de Buntley-Westin 138

- **TABLA 13**: CARACTERISTICAS CROMATICAS DE UN PERFIL DE AGUAMILPA, NAYARIT 138

11.4.2 Índice de Hurst 138

- **FIGURA 21**: TABLAS DE COLOR MUNSELL 139

11.4.3 Índice de Harden 140

11.4.4 Índice de Desarrollo del Perfil de Bilzi-Ciolkosz 140

OBSERVACIÓN 140

12 PERFIL DE INTEMPERISMO EN SUELOS RESIDUALES DE ZONA TEMPLADA 141

12.1 PERFILES DE INTEMPERISMO FORMADOS A PARTIR DE CENIZAS VOLCANICAS Y BASALTOS 141

12.1.1 Suelos derivados de Ceniza Volcánica en Zona Templada 142

- **TABLA 14**: CARACTERES FISICOS Y QUIMICOS DE UN PERFIL DE INTEMPERISMO DERIVADO DE CENIZA VOLCANICA 142

FIGURA 22: SUELO DE ZONA TEMPLADA DERIVADO DE CENIZA VOLCANICA 143

12.1.2 Suelos derivados de Basalto en Zona Templada 144

- **FIGURA 23:** SUELO DE ZONA TEMPLADA DE ORIGEN POLICICLICO 145

12.2 PERFIL DE INTEMPERISMO 146

- **FIGURA 24:** PERFIL DE SUELO RESIDUAL 147
- **FIGURA 25:** SUELO DE ZONA TEMPLADA DERIVADO DE BASALTO 148
- **TABLA 15:** PRODUCTOS DE ALTERACION PRESENTES EN LAS CAPAS DE UN PERFIL DE INTEMPERISMO DERIVADO DE BASALTO 149

OBSERVACIONES 150

PARTE IV. DISCUSION, INTERPRETACION Y APLICACION DE LA INFORMACION 151

13. APLICACION DE LOS CONCEPTOS DE LA CIENCIA DEL SUELO EN INGENIERIA CIVIL 151

13.1 LIMITACIONES EN EL USO DE LAS DEFINICIONES SOBRE LOS SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS 151

13.2 LIMITACIONES PARA LA APLICACION DEL CONCEPTO DE SUELO RESIDUAL TROPICAL 152

14. EL ESTUDIO SISTEMATICO DE LOS SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS 154

14.1 ETAPA A. TRABAJO DE GABINETE PRELIMINAR 154

14.1.1. Fase A.1. Compilación de la Información Básica 154

14.1.2. Fase A.2. Empleo de Técnicas de Teledetección 154

14.1.3. Fase A.3. Análisis y Valoración de la Información 155

14.2. ETAPA B. TRABAJO O LEVANTAMIENTO DE CAMPO 155

14.2.1. Fase B.1. Inspección de Campo Preliminar 155

14.2.2. Fase B.2. Trabajo de Campo 155

14.3 ETAPA C. ANALISIS DE LABORATORIO 156

14.4 ETAPA D. PREPARACION DE RESULTADOS 157

14.4.1. Ordenamiento de la Información Compilada 157
14.4.2. Establecimiento de Conceptos Básicos 157

14.5 METODO Y PROCEDIMIENTO 158

14.5.1. Información Geográfica y Ambiental 158
14.5.2. Información sobre la Morfología del Perfil 159
OBSERVACIONES 159
14.5.3. Información sobre el Análisis de Laboratorio 160

14.6 INTERPRETACION DE LA INFORMACION CON FINES DE APLICACION 161

14.6.1 Consideraciones Previas 161

14.7 INTERPRETACION DE LA INFORMACION MEDIOAMBIENTAL 162
OBSERVACIONES 163

- **TABLA 17:** FICHA DE DESCRIPCION AMBIENTAL Y DEL SUELO 164

14.8 INTERPRETACION Y RELACIONES ENTRE LOS DATOS AMBIENTALES Y EL PERFIL DEL SUELO 165

14.9 INTERPRETACION DE LOS DATOS DE LABORATORIO 167

- **TABLA 18**: ANALISIS FISICOS Y QUIMICOS DEL SUELO EJEMPLO 167
  OBSERVACIONES 168
- **TABLA 19**: ESTIMACION DEL LIMITE LIQUIDO E INDICE DE PLASTICIDAD DE ACUERDO AL TIPO Y CONTENIDO DE ARCILLA 170
- **FIGURA 26**: GRAFICA DE PLASTICIDAD 171
  OBSERVACIONES 171
- **TABLA 20**: PORCENTAJE DE MATERIAL QUE PASA POR LOS TAMICES 172

15 APLICACION PRACTICA DE LA INFORMACION INTERPRETADA 173

15.1 NIVEL DE LIMITACION 173

15.2 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS PARA ESTABLECER EL NIVEL DE LIMITACION DE UN PROYECTO 174

15.2.1 EJEMPLO 1. Construcción de caminos y calles 175

Resumen Ejecutivo

Actualmente se reconoce que, para una adecuada clasificación ingenieril de los suelos, se requiere considerar los procesos que les dieron origen. Con este propósito, se ha identificado la existencia de varios factores ambientales (litológicos, topográficos, hidrológicos, etc.), características de un sitio, en la formación y evolución de un suelo y, en consecuencia, en sus propiedades índice e ingenieriles. Más aún, una correcta observación e interpretación de estos factores permitirá inferir en el campo el comportamiento probable de los materiales y su variabilidad en el tiempo y en el espacio. De una misma manera, permitirá optimizar los análisis y ensayos de laboratorio, los cuales se utilizaron principalmente para ratificar o rectificar las hipótesis establecidas en el campo.

El objetivo principal de este documento es proporcionar las bases para una mejor comprensión de las propiedades de los suelos, que pueden tener implicaciones directas sobre la planificación y construcción de obras de ingeniería civil, particularmente de vías terrestres. Se hace resaltar el interés de que los conceptos incluidos en este trabajo sean analizados e interpretados en términos de su utilidad inmediata con un alto nivel de confiabilidad.

Este documento está dividido en cuatro partes que son las siguientes:

Parte I	Conceptos Básicos.
Parte II	Factores formadores de suelos.
Parte III	Perfiles de suelos residuales.
Parte IV	Discusión, interpretación y aplicación de la información.

Parte I : Conceptos Básicos

Objetivos:

- Conocer las principales definiciones aceptadas internacionalmente sobre el concepto de suelo.
- Unificar criterios y lenguaje técnico en relación a este recurso.
- Establecer una definición de suelo útil para los diferentes especialistas que basan parte de sus investigaciones en este recurso.
- Entender el concepto "perfil de suelo" y la manera en que la interpretación de las características de los suelos permita determinar su aptitud.
- Identificar y denominar los horizontes y capas que constituyen un perfil de suelo, para facilitar el conocimiento de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Parte del desconocimiento del suelo de debe a la diversidad de los conceptos y puntos de vistas sobre este importante recurso natural, quizás, el más frágil de todos los que conocemos (Velde, 1995). Por

15.2.2 EJEMPLO 2. Campo de Absorción para Pozos Sépticos 176

- **TABLA 22:** GUIA PARA INTERPRETAR SUELOS PARA CAMPOS DE ABSORCION PARA POZOS SEPTICOS 178

BIBLIOGRAFIA 180

GLOSARIO 187

ANEXO 1
TIPOS DE ESTRUCTURA 204

ANEXO 2
ETIMOLOGIA DE LAS PALABRAS USADAS PARA DENOMINAR LOS GRUPOS DE SUELOS, NIVEL 1 206

ANEXO 3
CALCULO DE ELEMENTOS CLIMATICOS 212

ANEXO 4
IDENTIFICACION DE ROCAS 214

ANEXO 5
CLAVE PARA LA DESCRIPCION DEL PERFIL 217

Resumen

Este documento presenta una visión general de los suelos para aquellos profesionistas que requieran un conocimiento básico de esta disciplina, como introductorio para aquellos que, en el futuro, requieran de información más profunda. El material que se ofrece abarca en un principio: conceptos y definiciones sobre los suelos y su origen, la clasificación taxonómica según el sistema FAO-UNESCO (1988-1990) y el análisis cualitativo y cuantitativo de las propiedades de los suelos, tanto en campo como en el laboratorio. Se indican las normas para realizar esos análisis y su interpretación en forma sencilla. En los siguientes capítulos, se procura tratar los conceptos y definiciones de perfiles, capas y horizontes, tanto de suelos residuales como transportados, así como las propiedades de diagnostico, características físicas, químicas, físico-químicas y mineralógicas que, si no se ubican dentro del contexto del desarrollo de un perfil, pueden resultar abstractas.

Abstract

This document present a general view of soils for professionals requiring a basic knowledge of the Soil Science. There are presented the concepts and definitions related with soils and their origin, the soil's classification according to the FAO-UNESCO system (1988-1990) and the soil's properties analysis at the field. A discussion is presented on residual and transported soil's profiles.

ejemplo, en geología se considera al suelo como la epidermis de las unidades geológicas, por la que deben pasar los productos de la erosión de la roca y sedimentos que de ella resultan hasta su deposito. En Biología se entiende al suelo como la parte del medio ambiente condicionada por los organismos y que, a su vez, influye sobre otros organismos. En la Ingeniería Minera, el suelo cubre las rocas y minerales siendo, en consecuencia, un estorbo que debe separarse. Para el ingeniero en vías terrestres, puede ser el material sobre el cual deba asentarse una carretera. Si sus propiedades son favorables será utilizado pero, en el caso contrario, habrá de ser removido y sustituido por materiales seleccionados.

En este trabajo, suelo es el continuo de espacio tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre, siendo el producto de la alteración de rocas y materiales, mediante los procesos pedogenéticos que operan a través del tiempo sobre el material parental y el propio suelo.

Parte II : Factores formadores de suelos

Objetivo:

- Suscitar una mejor comprensión de las relaciones existentes entre los factores medioambientales formadores de suelos, los procesos de intemperismo y el consecuente desarrollo de las propiedades de los suelos.

Actualmente los conceptos establecidos por Dokuchaer (1883) y Hilgard (1892), sobre la interacción de cinco factores en el desarrollo de los suelos, siguen teniendo validez y son utilizados por todas las escuelas de la Ciencia del Suelo en el mundo. Estos factores son: el clima, el material parental, la topografía o relieve, los organismos y el tiempo.

Algunos investigadores, en particular Jenny (1941), han tratado de demostrar, sin lograrlo, que esos factores son independientes; esto es que cada uno de ellos puede cambiar de un lugar a otro. Sin embargo solo el tiempo puede considerarse como una variable independiente, ya que los otros cuatro dependen, en mayor o menor grado, uno de otro, del suelo mismo o de algún otro factor como puede ser la acción del hombre.

En esta Guía sólo se incluyen las características de los factores formadores de suelos de importancia para México, así como las correspondientes a los suelos representativos formados bajo esas condiciones.

Parte III : Perfiles de los suelos residuales

Objetivos:

- Suscitar el entendimiento de las relaciones existentes entre los diferentes tipos de rocas, las características mineralógicas, los procesos de intemperismo y el desarrollo de las propiedades de los suelos residuales.
- Analizar los diferentes conceptos actualmente empleados para definir el PERFIL DE INTEMPERISMO, así como su dinámica.
- Presentar algunos perfiles de alteración modales para las condiciones de México, particularmente representativas de zonas templadas.

Los suelos residuales se forman a partir de la intemperización y alteración de rocas o de depósitos estabilizados. La intemperización de los materiales iniciales precede a la formación de los suelos, en el caso de rocas duras, y es simultanea a la formación de los mismos cuando se trata de rocas blandas o de materiales no consolidados.

Existen dos tipos principales de intemperismo: físico y químico. El primero, involucra la acción de procesos que determinan la ruptura del material parental en unidades más pequeñas mediante acciones mecánicas, de tal modo que las partículas o fragmentos derivados retienen la composición que tenía la roca original. Se considera, principalmente, la fragmentación por movimiento y el efecto abrasivo de las aguas y de la acción eólica (Besoain, 1985). El segundo comprende los complejos procesos que alteran las estructuras internas de los minerales como consecuencia de la remoción o adición de ciertos elementos.

Parte IV : Discusión, interpretación y aplicación de la información

Objetivos:

- Establecer las limitaciones prácticas que tienen las definiciones actuales sobre los conceptos de Suelo Residual y Suelo Transportado.
- Proponer un método simplificado para el estudio ordenado y sistemático de los suelos residuales.
- Indicar los métodos y procedimientos aceptados por la Ciencia del Suelo, para caracterizar e interpretar, con un mínimo de incertidumbre, las condiciones formadoras de suelos en general y, en particular, de los suelos de interés en el ámbito de la Ingeniería Civil.
- Establecer un modelo para la interpretación de los datos de investigación edifica, obtenidos en el campo, laboratorio y gabinete, a partir de este modelo.
- Proponer un sistema para el ordenamiento y aplicación de la información edifica a proyectos de Ingeniería Civil, Sanitaria y Agronómica, a través de ejemplos.

En México existen aproximadamente 417,000 km2 de zonas con climas tropicales y subtropicales (Gama, 1996). Sin embargo, debido a la variedad de eventos geodinámicos que se han presentado en estas regiones, los suelos que se han formado en ellas, evolutivamente no se pueden ajustar a los esquemas teóricos establecidos para las zonas ecuatoriales. Esto indica la necesidad de establecer conceptos y definiciones propios a los suelos de México, si se desea lograr una correlación adecuada entre las características de los mismos y una mejor comprensión de su comportamiento, particularmente con el objeto de conocer sus posibilidades de utilización en obras de Ingeniería Civil.

La metodología sobre la investigación básica y aplicada de los suelos se integra con las etapas siguientes:

Etapa A.- **Trabajo de gabinete preliminar**
Fase A.1.- Compilación de la información básica
Fase A.2.- Empleo de técnicas de Teledetección
Fase A.3.- Análisis y Valoración de la información

Etapa B.- **Trabajo o levantamiento de campo**
Fase B.1.- Inspección de campo preliminar
Fase B.2.- Trabajo de campo

Etapa C.- **Análisis de laboratorio**

Etapa D.- **Preparación de resultados**

A través de los temas desarrollados, se intenta dar una visión general de los suelos para aquellos profesionales que requieran un conocimiento básico de esta disciplina o como introductorio para aquellos que, en el futuro, requieran de información más profunda.

INTRODUCCION

El comportamiento ingenieril de cualquier clase de suelo y, por ende, sus propiedades geotécnicas, dependen de ciertas características físicas y químicas particulares. A su vez, dichas características y propiedades no se presentan de manera aleatoria, sino que son la respuesta a una serie de condiciones y factores ambientales propios del lugar en donde se localiza el suelo. Una vez que el ingeniero ha identificado las propiedades del suelo importantes para la realización de una obra civil en un determinado sitio, procede a la toma de muestras para llevar a cabo una evaluación cuantitativa de las mismas, por medio de los análisis y ensayes de laboratorio, basando su diseño en los resultados obtenidos. Este es el procedimiento fundamental para todo diseño geotécnico.

Sin embargo, en la práctica, la aplicación de este procedimiento no es tan simple como pudiera parecer. Por ejemplo, es común que se subestime la complejidad del comportamiento de un suelo, al evaluar las propiedades ingenieriles necesarias para el diseño, a partir únicamente de la determinación de algunas propiedades índice, las cuales se escogen por su mayor sencillez y menor costo, sin determinarlas realmente a través de una manipulación técnica apropiada. Esto se debe también a que un ingeniero, generalmente, para aplicar algún sistema de clasificación de suelos, considera para las evaluaciones la similitud de los suelos de un proyecto con los correspondientes a proyectos anteriores.

Actualmente se reconoce que, para una adecuada clasificación ingenieril de los suelos, se requiere considerar los procesos que les dieron origen. Con este propósito, se ha identificado la existencia de varios factores ambientales (litológicos, topográficos, hidrológicos, etc.), característicos de un sitio, en la formación y evolución de un suelo y, en consecuencia, es sus propiedades índice e ingenieriles. Más aún, una correcta observación e interpretación de estos factores permitirá inferir en campo el comportamiento probable de interpretación de los materiales y su variabilidad en el tiempo y en el espacio. De la misma manera, permitirá optimizar los análisis y ensayos de laboratorio, los cuales se utilizarán principalmente para ratificar o rectificar las hipótesis establecidas en el campo.

Con base en lo antes planteado, el objetivo principal de este documento es proporcionar las bases para una mejor comprensión de las propiedades de los suelos, que pueden tener implicaciones directas sobre la planificación y construcción de obras de ingeniería civil, particularmente de vías terrestres. Se hace resaltar el interés de que los conceptos incluidos en esta Guía sean analizados, comprendidos e interpretados en términos de su utilidad inmediata con un alto nivel de confiabilidad.

Dentro del presente documento no se pretende realizar un análisis exhaustivo de las propiedades de los suelos; dada la complejidad de estos sistemas. Es pues, interés de los autores despertar en el profesionista inquietudes y cuestionamientos en esta materia. El estudio a profundidad de sus propiedades requeriría el seguir cursos temáticos que cubren diversos aspectos sobre la Ciencia del Suelo.

No obstante, a través de los temas desarrollados, se intenta dar una visión general de los suelos para aquellos profesionistas que requieran un conocimiento básico de esta disciplina o como introductorio para aquellos que, en el futuro, requieran de información más profunda. El material que se ofrece abarca, en un principio: conceptos y definiciones sobre los suelos y su origen, la clasificación taxonómica según el Sistema FAO-Unesco (1988-1990) y el análisis cualitativo y cuantitativo de las propiedades de los suelos, tanto en campo como en el laboratorio. Se indican las normas para realizar esos análisis y su interpretación en forma sencilla. En los siguientes capítulos, se procura tratar los conceptos y definiciones de perfiles, capas y horizontes, tanto de suelos residuales como transportados, así como las propiedades de diagnóstico, características físicas, químicas, físico-químicas y mineralógicas que, si no se ubican dentro del contexto del desarrollo de un perfil, pueden resultar abstractas.

Cada capítulo, tema, definición y análisis tiene objetivos particulares. Consecuentemente, cada capítulo contiene una introducción donde se indica la importancia del tópico tratado que se complementa con la parte teórica del trabajo. En la parte final del texto se encuentra un glosario de términos edafológicos y definiciones sobre las unidades de suelos FAO-Unesco (1988-1990).

Resulta importante hacer notar que la mayoría de los ejemplos que se presentan en este documento, incluyendo figuras y datos contenidos en las tablas, son característicos de las condiciones prevalecientes en México. Además, cuenta con definiciones y especificaciones actualizadas. Un ejemplo de ello es la diagnósis que se establece con relación a los perfiles de alteración de suelos en zona templada.

Es también importante mencionar que, en toda la obra, se hace énfasis en la presentación simplificada de los conceptos y no en derivaciones rigurosas. Tales derivaciones se pueden encontrar en otros textos, referidos en la bibliografía presentada en este documento. La omisión de esas derivaciones ha permitido establecer una mejor comunicación técnica entre las áreas de la Ciencia del Suelo, la Geología y la Ingeniería Civil.

PARTE I : CONCEPTOS BASICOS

Objetivos:

- Conocer las principales definiciones aceptadas internacionalmente sobre el concepto suelo.
- Unificar criterios y lenguaje técnico con relación a este recurso.
- Establecer una definición de suelo útil para los diferentes especialistas que basan parte de sus investigaciones en este recurso.
- Entender el concepto "perfil del suelo" y la manera en que la interpretación de las características de los suelos permite determinar su aptitud.
- Identificar y denominar los horizontes y capas que constituyen un perfil de suelo, para facilitar el conocimiento de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Como lo estableció Buckman (1985), frecuentemente, los caracteres y aspectos comunes de los elementos de la naturaleza no son bien comprendidos y apreciados, el suelo es uno de ellos.

Parte del desconocimiento del suelo se debe a la diversidad de conceptos y puntos de vista sobre este importante recurso natural, quizás, el más frágil de todos los que conocemos (Velde, 1995). Por ejemplo, en geología se considera al suelo como la epidermis de las unidades geológicas por la que deben pasar los productos de la erosión de la roca y sedimentos que de ella resultan hasta su depósito. En Biología se entiende al suelo como la parte del medio ambiente condicionada por los organismos y que, a su vez, influye sobre otros organismos. En la Ingeniería minera, el suelo cubre las rocas y minerales siendo, en consecuencia, un estorbo que debe separarse. Para el ingeniero en vías terrestres, puede ser el material sobre el cual deba asentarse una carretera. Si sus propiedades son favorables será utilizado pero, en el caso contrario, habrá de ser removido y sustituido por materiales seleccionados.

Casi todos los agricultores consideran al suelo como un "hábitat" para sus plantas, y "éste es bueno si es blando y terroso". El punto de vista opuesto puede asociarse con el de la "tierra arcillosa" que se resiste a ser labrada y transformada en lecho de semillas o en un jardín.

A fin de mejorar el conocimiento del suelo, es necesario un concepto común que implique sus características esenciales con los puntos de vista del ingeniero civil, del geólogo, del biólogo y del agricultor. Para desarrollar este concepto, se partirá del concepto suelo tal y como se encuentra en la naturaleza.

1 EL SUELO Y SUS DEFINICIONES

1.1 DEFINICIONES DE SUELO ACEPTADAS EN DIFERENTES DISCIPLINAS

1.1.1 Ciencia del Suelo

La relación entre los suelos y las plantas ha sido reconocida tradicionalmente en los medios agronómicos. El hecho de que actualmente muchos científicos del suelo laboren en disciplinas o instituciones agrícolas, ayuda a explicar el concepto de suelo como medio para el crecimiento de las plantas. Las definiciones del suelo, establecidas por el Sistema Americano de Taxonomía de Suelos (USDA, 1993), se basan parcialmente en este concepto: suelo es la colección de cuerpos naturales sobre la superficie terrestre que pueden ser usados o modificados por el hombre, que contienen materia viva y que soportan o son capaces de soportar el crecimiento vegetal.

También, dentro de esta disciplina, se proponen otras acepciones para este sistema. Según Simmonson (1959), suelo es un cuerpo natural que se localiza sobre la superficie terrestre y se caracteriza por 4 procesos: adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones. Esta definición es considerada una de las más completas ya que implica los procesos fundamentales en la formación de suelos, entendiéndose por: (I) ***adición***, la incorporación de cualquier material, orgánico o inorgánico al suelo; (II) ***pérdida***, se relaciona con la noción de "lavado" de elementos constitutivos del suelo por efecto de drenaje; (III) ***transferencia***, se refiere a los movimientos debidos a procesos físico-químicos, principalmente de partículas de tamaño coloidal o arcilla dentro del suelo; (IV) la ***transformación*** comprende la formación de nuevos materiales, o compuestos secundarios, a partir del material original. De acuerdo a la morfología de los suelos Kaúrichev et al., (1984) define al suelo como una sucesión determinada de capas u horizontes genéticos en dirección vertical, estos horizontes se distinguen entre sí por su color, estructura, consistencia y otros índices morfológicos.

1.1.2 Geología

Dentro de la Ciencias de la Tierra se reconoce a los suelos, generalmente, como depósitos sedimentarios de edades recientes no consolidados, esto es, no litificados. En este ámbito, el sedimento es definido como un conjunto de partículas de diferente tamaño o de material precipitado, que han sido transportadas. Estos materiales pueden provenir de la erosión y/o alteración de las rocas, o resultar de alguna actividad órganica, como la acumulación de conchas o esqueletos de organismos (Foucault y Raoult, 1995).

El concepto de suelo, propiamente dicho en esta disciplina, corresponde al de Pedología, explicándose como una formación superficial resultante de la alteración *in situ* de la rocas debida al agua, aire y/u organismos. Pudiendo estar mezclados estos materiales con una proporción variable de materia orgánica.

1.1.3 Ingeniería Civil

En esta disciplina, se define al suelo como un conjunto de partículas minerales producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes (Rico y Del Castillo, 1996). Se enfatiza, además, al grado de cohesión de los materiales en el sentido de la susceptibilidad a la desintegración de la masa y a la disgregación mecánica. Por ejemplo, Juárez y Rico (1974) se refieren a los suelos como materiales terrosos y excluyen, dentro de este grupo, a los materiales que no se ablandan o desintegran rápidamente por efecto de la intemperie.

Dentro del sistema suelo, en esta disciplina se reconocen tres fases constitutivas principales: sólida, líquida y gaseosa. Los diferentes procedimientos de análisis, tratamientos y clasificación de los suelos en este ámbito, son función de las características y proporción de cada una de estas fases.

Para fines prácticos, en Ingeniería se consideran dos tipos fundamentales de suelos de acuerdo a su relación con el material subyacente. Así, los suelos son llamados ***residuales*** cuando se encuentran sobre el material que les dió origen, en la mayoría de los casos masas rocosas, y ***transportados*** cuando han sido desplazados de su lugar de origen por agentes diversos como: agua, aire, gravedad, etc.

1.2 EL SUELO COMO UN CUERPO NATURAL ORGANIZADO

El planteamiento de las definiciones arriba mencionadas, pone en evidencia la relatividad de una definición sobre el concepto suelo, en función del punto de vista de las diferentes especialidades. Para las áreas de Geología e Ingeniería Civil, a pesar de dicha relatividad, se hace referencia a las mismas características y diferencias de estos materiales en cuanto a su origen, en particular, si son formados *in situ* o han sido transportados. La Ciencia del Suelo contribuye a una concepción más completa al considerar la integración del estudio de los factores formadores de suelos y factores modificadores de sus propiedades.

Según Fanning (1989), la concepción del suelo como cuerpo natural organizado, implica que los horizontes del suelo, próximos a la superficie y diferentes a la roca subyacente, son el resultado de procesos pedogenéticos, esto es, de las interacciones del clima, los organismos, el material parental y el relieve a través del tiempo. Desde este punto de vista, el suelo se considera un complejo renovable de materias vivas, partículas originadas a partir de rocas y mezcladas con matería orgánica, agua y aire (USDA, 1990).

Todas estas definiciones resultan aceptables para ubicar el concepto suelo. Sin embargo, de acuerdo a los objetivos específicos de esta Guía, se propone una definición con base en las anteriores:

"Suelo es el continuo de espacio-tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre, siendo el producto de la alteración de rocas y materiales, mediante los procesos pedogenéticos que operan a través del tiempo sobre el material parental y el propio suelo".

2 EL PERFIL DEL SUELO

2.1 DEFINICIÓN DEL PERFIL

2.1.1 Conceptos de Horizonte y Capa

La anisotropía vertical del perfil de un suelo está determinada por los horizontes y/o capas que lo constituyen, los cuales son aproximadamente paralelos a la superficie. Se entiende como perfil de suelo a la sección vertical de éste, y como **horizonte** a un estrato originado por el intemperismo. El concepto **capa** de suelo debe ser entendido como un estrato en el cual el grado de alteración del material es débil, por lo que se conservan varias de las propiedades inherentes al material parental.

El perfil del suelo puede ser estudiado desde varios puntos de vista, según sea la temática de investigación. Los más comunes son:

- Estudio ***morfológico*** del perfil del suelo. En éste, se consideran las propiedades de color, textura, estructura y consistencia, entre otras.
- Estudio ***evolutivo*** del perfil del suelo. Consiste en establecer, cuantitativamente, las diferencias que han alcanzado los horizontes y/o capas del suelo con respecto a la capa o roca que les dió origen. Normalmente se utiliza para ello el método de Bilzi y Ciolkosz (1989) o, más recientemente, el propuesto por Birkeland, et al (1991).
- Estudio del perfil de ***intemperismo*** del suelo. Se basa en las características físicas, químicas y mineralógicas que los horizontes y/o capas del perfil presentan bajo diferentes condiciones medioambientales.

En la Parte III de esta guía se amplía la información respecto a estos tipos de estudios.

En la figura 1, se presentan los principales horizontes que un suelo residual puede presentar teóricamente. Normalmente, los estudios para el reconocimiento adecuado del perfil del suelo se dividen en estudios cualitativos y cuantitativos. La clasificación correcta de un suelo dependerá, por tanto, de la aplicación de ambos tipos de análisis.

2.1.2 Análisis Cuantitativo del Suelo

Permite reconocer los horizontes y/o capas de diagnóstico indispensables para definir la jerarquía taxonómica de un suelo, es decir, su clasificación dentro de un sistema. Para la aplicación de esta metodología se requieren análisis físicos y químicos; la mayoría realizables solamente en laboratorio.

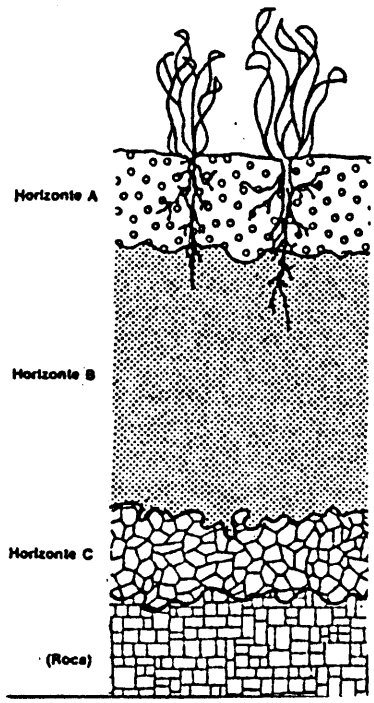


FIGURA 1: EL PERFIL DEL SUELO

2.1.3 Análisis Cualitativo del Suelo

Este tipo de análisis, denominado ABC, se aplica para definir y establecer la nomenclatura correspondiente a cada horizonte y/o capa, en términos cualitativos. Este sistema se utiliza especialmente en el campo para la descripción de perfiles. Por esta razón, prácticamente no requiere análisis de laboratorio para su aplicación. Los sistemas para la nomenclatura de los horizontes, a través de las observaciones de campo, permiten hacer notar tanto su morfología como el grado evolutivo de los horizontes y del perfil en su conjunto.

2.2 PERFIL MORFOLOGICO DEL SUELO

2.2.1 Definición de los Horizontes según el Sistema ABC

El sistema de clasificación FAO-Unesco (1988-1990) se basa, primordialmente, en el análisis cualitativo del suelo, es decir, en su morfología descrita en términos de sus horizontes y/o capas. Como se mencionó anteriormente, el conjunto de horizontes de un suelo determina la morfología del mismo e integra su perfil, el cual puede ser estudiado en un corte de terreno. En la figura 2, se observan dos ejemplos esquemáticos de suelos plenamente desarrollados y diferenciados.

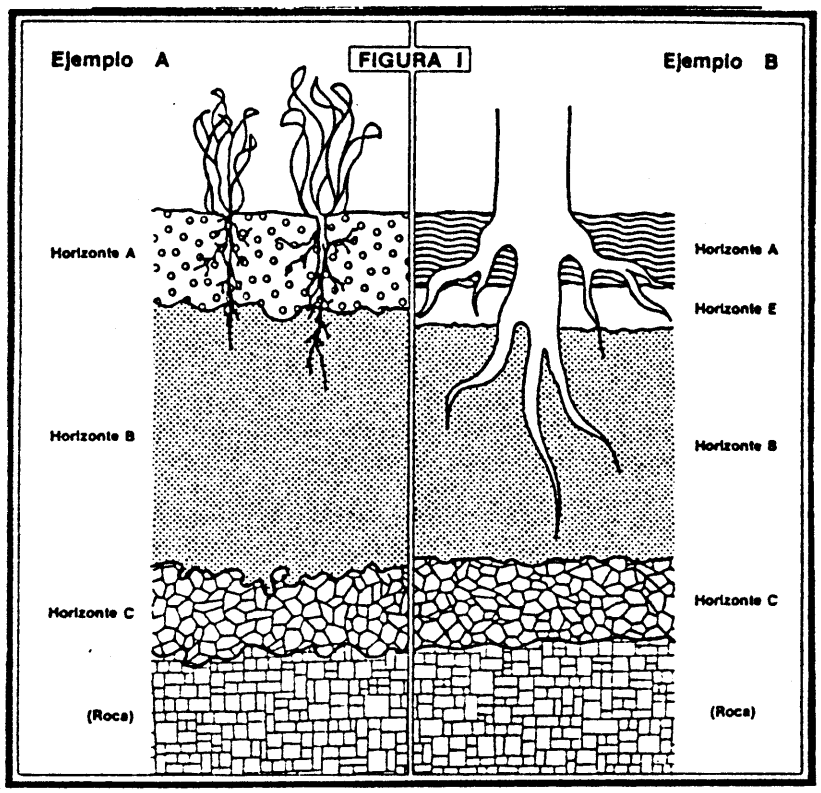


FIGURA 2: EL PERFIL MORFOLÓGICO DEL SUELO

En ambos ejemplos, se observa un horizonte superior denominado "A", el cual es poco más o menos rico en materia orgánica y, generalmente, de color más obscuro que los demás horizontes del perfil. Ambos suelos, presentan horizontes denominados "B" y "C" sobre "R", este último es el material geológico sobre el que descansa todo el perfil y, probablemente, el material que les dió origen. Los horizontes "B", que siempre subyacen a un "A", a no ser que éste se haya perdido por erosión, casi siempre contienen menos materia orgánica que los "A", y son en los que se acumulan materiales que migran hacia abajo desde el "A". Es por eso que, con frecuencia, aparecen en los horizontes "B" manchas blandas o duras de sustancias blancas, generalmente de carbonatos de calcio, manchones rojos de óxidos de hierro, o de otros tipos.

Los horizontes denominados "C", corresponden al material parental en proceso de descomposición y conversión á suelo, con abundancia de partículas de los minerales primarios, pero mezcladas éstos con las de minerales secundarios propios del suelo. En el ejemplo B de la figura 2, se observa un horizonte "E", llamado álbico, situado entre "A" y "B", que se presenta en ciertos suelos. Este es un horizonte que destaca por su color blanquecino o gris, y que se desarrolla debido a la pérdida de componentes minerales y orgánicos coloreados. Este horizonte generalmente se forma por efecto del drenaje interno en el suelo.

En la mayoría de los sistemas de clasificación de suelos, los horizontes "A", "B" y "C" han sido subdivididos en subhorizontes, con base en las características físicas, químicas y morfológicas que presentan. De acuerdo con la *Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo* (1994), los horizontes pueden ser divididos y diagnosticados de la siguiente manera:

2.2.1.1 Horizontes orgánicos

Son horizontes que contienen un porcentaje alto de materia orgánica que, generalmente, rebasa el 25% del contenido en peso del horizonte. Se subdividen en:

a. Horizonte O

Sus principales características son: (1) se forma en la parte superior de los suelos minerales; (2) está constituido por material orgánico fresco o parcialmente descompuesto (hojarasca) y (3) contiene más de 30% de materia orgánica (MO) si la fracción mineral tiene arcilla. Se divide en dos subhorizontes:

- **Oi**. En los que se aprecian, a simple vista, restos orgánicos fácilmente reconocibles.

- **Oa.** Aquellos en los que los restos orgánicos no pueden reconocerse a simple vista, por lo que es necesario utilizar una lente de 10X o un microscopio de disección.

2.2.1.2 Horizontes minerales

Contienen menos del 30% de materia orgánica (MO) si la fracción mineral tiene más de 50% de arcilla, o menos de 20% de MO, si la fracción mineral no tiene arcilla. Los principales horizontes son:

o

a. Horizonte A

Se caracteriza por: (1) acumulación de materia orgánica en la superficie; (2) pérdida de arcilla, hierro o aluminio, con una concentración de cuarzo u otros minerales resistentes como feldespatos potásicos y mica (muscovita), en las fracciones de arena y limo. Se puede subdividir en los siguientes subhorizontes:

- **A_1**. Subhorizonte que se forma en la parte superficial del perfil o adyacente a ella, si le sobreyace un horizonte Oi u Oa. La característica sobresaliente es una acumulación de materia orgánica muy alterada (también llamada materia orgánica humificada o simplemente humus), íntimamente asociada con la fracción mineral.

- **AB**. Subhorizonte transicional entre el A y el B, tiene una parte superior dominada por propiedades del A, y una parte inferior dominada por las propiedades del B, pero las dos partes no se pueden separar convenientemente en A3 y B1.

- **A_2 (también llamado horizonte E).** Sus características sobresalientes son: (1) pérdida severa de arcilla, (2) pérdida de fierro o aluminio, con la resultante concentración de cuarzo, feldespatos potásicos y mica (muscovita) entre otros minerales resistentes de las fracciones de arena y limo.

- **A_3 (también llamado horizonte EB).** Subhorizonte transicional entre A y B, dominado por las propiedades características de un horizonte A_2, pero que presenta, en segundo lugar, algunas de las propiedades de un B subyacente.

- **AC.** Sólo se presenta en suelos que carecen de horizonte B. Es transicional entre el A y el C, tiene propiedades secundarias de ambos, pero sin la dominancia de propiedades características de ninguno de ellos.

b. Horizonte B

En este horizonte domina una o varias de las características siguientes:
(1) Concentración de arcillas, hierro, aluminio y/o humus, solos o en combinación.
(2) Concentración *in situ* (residual) de óxidos de hierro, aluminio y titanio (llamados sesquióxidos), y arcillas silicatadas, solos o mezclados.
(3) Recubrimientos de sesquióxidos sobre partículas de arena y limo, en cantidad suficiente, para dar colores visiblemente más obscuros, más intensos y más rojos que los horizontes suprayacentes y subyacentes.
(4) Alteración de materiales a partir de su condición original en el suelo, la cual carece de las condiciones definidas en los numerales 1, 2 y 3, que destruyen la estructura de la roca original. Esta alteración forma arcilla silicatada, libera óxidos y forma agregados (estructura de forma principalmente granular, aunque puede ser en bloques o prismática).

Presenta los siguientes subhorizontes:

- **BA**. Es de transición entre B y A_1 o entre B y A_2. Está dominado por las propiedades de un Bw subyacente (B cámbico o de alteración) que tiene algunas de las propiedades subordinadas de un A_1 o un A_2 suprayacente.

- **B/E.** Es cualquier horizonte que se reconozca como B en más del 50% de su volumen, pero que incluye partes que lo califican como E.

- **Bw**. Constituye la parte del horizonte B donde las propiedades en las cuales se reconoce el B son diagnósticas, y no existe ningún indicio de que se trate de un horizonte transicional a un A o a un C inmediatamente subyacente. El subíndice w indica intemperismo, y proviene del inglés *weathering*. En algunos perfiles, la parte más fuertemente intemperizada del horizonte Bw corresponde a lo que se puede llamar un B_2.

- **BC**. Es de transición entre B y C, en el cual las propiedades de diagnóstico de un Bw suprayacente se expresan claramente, estando asociadas con propiedades características de un C. Un horizonte BC se designa únicamente si existe un Bw suprayacente.

c. Horizonte C

Corresponde a una capa de suelo generalmente rica en minerales primarios, que excluye la roca basal sana. Este horizonte está, relativamente, poco afectado por los procesos pedogenéticos, carece de propiedades diagnósticas de A o B, pero incluye materiales modificados por: (1) intemperización geoquímica fuera de la zona de mayor actividad biológica; (2) cementación reversible, desarrollo de fragilidad, densidad aparente alta y otras propiedades características de capas compactadas (*Fragipanes*); (3) puede presentar nivel freático y, consecuentemente, procesos de oxidación-reducción, que le dan un moteado característico (gleyización); (4) acumulación de carbonatos de calcio o magnesio o de sales más solubles; (5) cementación debida a la acumulación de carbonatos de calcio, magnesio o sales más solubles y (6) cementación por material silíceo, soluble en álcalis, o por hierro y silicio.

Se presentan muchos tipos de alteración en el material designado como horizonte C, éstas pueden ser físicas o químicas, excluyendo aquellas de origen biológico. El horizonte C ha sido llamado, a menudo, material parental del suelo. Esto es erróneo, es más correcto decir que es similar al material a partir del cual se presume que el horizonte A y B han sido formados.

d. Horizonte R

Es la roca madre consolidada y subyacente, como granito, arenisca o caliza por mencionar algunas. Si se presume que es semejante a la roca madre a partir de la cual se formó el horizonte o capa superior adyacente, se emplea el símbolo R, pero si es diferente al material suprayacente, la R debe ir precedida por un número romano que denote una discontinuidad litológica.

OBSERVACIONES:

1. Se acepta que un suelo puede clasificarse según el tipo y número de horizontes presentes en su perfil. Sin embargo, para ello se presentan innumerables dificultades, por lo que es necesario señalar que, hasta el presente, la identificación de los horizontes ha sido más un arte basado en la experiencia de campo, que una técnica fundada en algún grupo de principios definidos.

2. Esto último indica que los aspectos fundamentales de la identificación de horizontes y clasificación de los suelos, deben resolverse en campo y confirmarse en el laboratorio.

2.2.2 Distinciones Subordinadas dentro de los Horizontes y Capas del Suelo

La Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo hace una serie de observaciones con relación a los horizontes y capas proponiendo que, para contar con una expresión más completa de estos horizontes, se utilicen los siguientes sufijos, en letras minúsculas:

- **"a"- Material orgánico muy descompuesto**. Este símbolo se usa con "O" (horizonte orgánico) para indicar materiales orgánicos muy descompuestos (hojarasca muy humificada, restos animales muy alterados, etc.).

- **"b"- Horizonte genético enterrado**. Se aplica a suelos que han sido sepultados por un aluvión, coluvión o cualquier otro material transportado. Por ejemplo, un suelo puede presentar la siguiente secuencia de horizontes: A/AC/C/Ab. El símbolo Ab denota la presencia de un horizonte A sepultado.

- **"c"- Concreciones o nódulos**. Este símbolo se usa para indicar una acumulación significativa de concreciones o de nódulos de hierro, aluminio, manganeso o titanio. La cementación en este horizonte es una característica y el cementante no debe ser sílice.

- **"d"- Materiales o sedimentos densos (también llamado *Densipan*)**. Indica la ocurrencia natural o inducida por la actividad del hombre (agricultura, ganadería, etc.), sobre el perfil del suelo. Esta incidencia se manifiesta por la presencia de horizontes y/o capas compactadas, con alta densidad aparente, que impiden el paso de raíces y agua, excepto a lo largo de los planos de fractura.

- **"e"- Material orgánico con descomposición intermedia**. Se usa con "O" para indicar materiales orgánicos con un grado de descomposición que aún permite identificar su origen.

- **"f"- Suelo congelado**. Se usa para indicar que un horizonte o capa contiene hielo permanentemente.

- **"g"- Gleyización fuerte**. Se usa para indicar ya sea que el hierro haya sido reducido y removido durante la formación del suelo, o que la saturación con agua estancada en una parte del perfil lo haya preservado en estado reducido (Fe^{2+}). La mayoría de los horizontes afectados por la gleyización presentan colores grisáceos o verde olivo, así como moteado.

- **"h"- Acumulación iluvial de materia orgánica**. Se usa en el horizonte "B" para indicar la acumulación de sesquióxidos, materia orgánica y minerales amorfos que, en conjunto, forman complejos químicos muy estables que, frecuentemente, revisten partículas de arena y limo.

- **"i"- Material orgánico ligeramente descompuesto**. Este símbolo se usa en el horizonte "O" para indicar una mínima descomposición de los materiales orgánicos presentes, lo cual hace posible reconocer con seguridad el origen de estos.

- **"j"- Presencia de Jarosita**. Este símbolo es utilizado por varios investigadores para denotar la presencia del mineral denominado Jarosita ($K\ Fe_3\ [(OH)_6\ (SO_4)_2]$) en capas ricas en azufre que muestran gleyización.

- **"k"- Acumulación de carbonatos**. Indica la acumulación, comúnmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$).

- **"m"- Cementación o endurecimiento**. Se usa para indicar cementación en los horizontes de más del 90% de su volumen total, aunque pueden estar fracturados. Si el 90% o más del horizonte está cementado por carbonatos se usa "km"; por sílice "qm"; por hierro "sm"; por yeso "ym"; por carbonato y sílice "kqm", y por sales más solubles que el yeso "zm". Las raíces penetran en horizontes "m" sólo a través de grietas.

- **"n"- Acumulación de sodio**. Este símbolo se usa para indicar la acumulación de compuestos de sodio.

- **"o"- Acumulación residual de sesquióxidos.** Indica la acumulación, *in sit,u* de materia orgánica y sesquióxidos en un horizonte.

- **"p"- Labranza u otros disturbios**. Se usa para indicar labranza u otros disturbios de carácter antrópico sobre la capa superficial, por ejemplo: pastoreo, quema de vegetación, etc. Un horizonte orgánico disturbado es designado por Op. Un horizonte mineral disturbado es designado como Ap. Aún cuando pudiera corresponder a un horizonte E, B o C.

- **"q"- Acumulación de sílice**. Indica una acumulación de este mineral como producto de la alteración de la roca o material parental. Si el sílice cementa, de modo continuo, o casi continuo un horizonte o capa, se usa "qm".

- **"r"- Roca madre intemperizada o suave**. Este símbolo se asocia a "C" para indicar capas de roca madre (parental) de consistencia suave. Por ejemplo una saprolita.

- **"s"- Acumulación iluvial de sesquióxidos y materia orgánica**. Se usa para indicar la acumulación de complejos químicos de sesquióxidos, materia orgánica y amorfos en el horizonte B.

- **"ss"- Presencia de caras de fricción**. Este símbolo se utiliza para indicar una acumulación de arcilla expansible que se ha formado, generalmente, en el horizonte B y que puede ser movida por iluviación dentro de él. La arcilla puede estar en forma de recubrimientos sobre los agregados (estructura) o en los poros, laminillas o puentes entre los granos minerales.

- **"v"- Plintita**. Este símbolo se usa para indicar la presencia de un material rojizo, rico en hierro, pobre en humus, de consistencia firme o muy firme cuando húmedo y que presenta una dureza irreversible cuando se expone a la atmósfera y/o a repetidos humedecimientos y secados.

- **"w"- Desarrollo de color o estructura.** Este símbolo indica el desarrollo de color o estructura o ambos, debido a procesos de alteración en el horizonte B.

- **"x"- Carácter de *Fragipán*.** Se utiliza para indicar el desarrollo de capas altamente compactadas, que muestran diferentes grados de firmeza, fragilidad y alta densidad aparente. Los horizontes y/o capas que muestran tales características son denominados fragipanes.

- **"y"- Acumulación de yeso**. Indica acumulación de yeso en un horizonte o capa.

- **"z". Acumulación de sales más solubles que el yeso**. Indica acumulación de sales, más solubles que el yeso, en un horizonte o capa.

2.3 TERMINOS APLICABLES AL SUELO

Los términos que a continuación se presentan han sido definidos por el Soil Survey Staff, 1988. Su uso es internacional y vigente en la mayoría de las Escuelas de Suelos.

- **Pedón.** Se refiere al área más pequeña que puede ser descrita para identificar un suelo y representar la naturaleza y arreglo de sus horizontes, así como la variabilidad en las otras propiedades que lo caracterizan. Un Pedón es comparable a la celda unitaria de un cristal, ya que posee tres dimensiones. El área de un Pedón oscila de 1 a $10m^2$, dependiendo de la variabilidad del suelo.

- **Tessera.** Ha sido definida como la unidad tridimensional de una unidad de suelo. El concepto Ecotessera incluye, además del suelo, la vegetación que se desarrolla sobre éste

- **Perfil de suelo.** Es una sección vertical a través del suelo. Para que el perfil pueda representar un Pedón debe ser lo suficientemente amplio para mostrar variaciones laterales (Figura 1).

- **Horizonte del suelo.** Es un estrato originado por el intemperismo del suelo el cual está, aproximadamente, paralelo a la superficie del suelo.

- **Capa del Suelo.** Es un sustrato en el que se reconocen varias de las propiedades inherentes al material parental que formó al suelo. Con frecuencia, se aplica al horizonte C o al horizonte R.

- **Capa.** Es un estrato que, previamente, fue transportado y depositado y que carece de una alteración edafoquímica, o ésta es muy débil

- **Solum.** (Plural:*Sola*) Es la parte del perfil de suelo donde se pueden presentar los horizontes A y B. A veces, se incluyen perfiles con horizontes O, A, E y B, así como los horizontes de transición entre ellos (Figura 1).

- **Suelo sepultado.** Los suelos que se encuentran subyaciendo a una capa cuyo espesor es de más de 50 cm se denominan suelos sepultados; los cuales no necesariamente son paleosuelos.

- **Paleosuelo.** Suelo que se formó en condiciones ambientales diferentes a las actuales, principalmente en lo referente al clima.

- **Suelo superficial.** Ordinariamente, se refiere al suelo que puede ser removido por prácticas de cultivo. En los suelos agrícolas se le conoce como horizonte Ap.

- **Subsuelo.** Se refiere, normalmente, al horizonte B presente en el perfil del suelo. En suelos que carecen de horizonte B, este término se aplica al horizonte o capa que subyace al suelo superficial.

- **Sustrato.** (*Sustratum*) es cualquier capa del suelo que subyace al Solum. Normalmente se refiere al horizonte C o R (Figura 1).

- **Contacto lítico.** Este término se refiere al límite entre el suelo o regolita y la roca dura. Si la roca es blanda, este límite puede ser llamado Contacto Para-lítico.

3 CLASIFICACION DE LOS SUELOS DE MEXICO

Objetivos:

- Dar a conocer los suelos de México, sus características distintivas, sus relaciones medioambientales y los problemas relacionados con el uso aplicado de las 24 unidades existentes en el territorio nacional.
- Actualizar los criterios sobre estas unidades de suelos con base a la clasificación FAO-Unesco 1988-1990
- Diferenciar los suelos residuales de los suelos transportados a través de métodos sencillos y confiables.
- Proponer una clasificación práctica para los diferentes suelos transportados

3.1 GENERALIDADES

Los primeros intentos sobre la clasificación de los suelos, principalmente en el ámbito de la agricultura, tuvieron un carácter empírico, haciéndose referencia a sus características granulométricas (suelos arcillosos, limosos, arenosos). En un principio, las clasificaciones geológicas de los suelos se basaban en la naturaleza de los materiales que les dieron origen, de modo tan exclusivo que no consideraban, en absoluto, los procesos de pedogénesis y los factores ambientales que intervienen para transformar el material parental.

Actualmente, desde un punto de vista puramente pedológico, se utilizan en México dos sistemas de clasificación de los suelos: el sistema propuesto por la FAO-Unesco (1988-1990) y el de la 7a. Aproximación (Soil Taxonomy, 1988). A lo largo de esta Guía, se hará referencia a las dos clasificaciones, debido a que éstas pueden representar un apoyo de gran utilidad para lograr un mejor conocimiento de las características del suelo, así como la aplicación del mismo en el área de la Ingeniería Civil, particularmente en lo que concierne el desarrollo de Vías Terrestres.

3.1.1 Sistema propuesto por la FAO-Unesco

Los anteproyectos de este sistema se iniciaron en 1964, para la elaboración de un mapa mundial de suelos, y las modificaciones conceptuales más importantes se realizaron a partir de 1988. El aprendizaje y uso práctico del Sistema FAO-Unesco es relativamente sencillo ya que se basa, en gran parte, en las características morfológicas del perfil de suelo, por lo que se requieren pocos análisis de laboratorio. Además, una gran ventaja para su utilización, especialmente en el área de Ingeniería Civil, radica en la gran cantidad de información documental y cartográfica que se puede encontrar en México sobre suelos clasificados bajo este sistema; como es la cartografía editada por el INEGI.

3.1.2 7a Aproximación (USDA, 1988-1990)

Es el agrupamiento sistemático de los suelos propuesto por los Estados Unidos (USDA, 1988-1990) y es considerado como oficial en ese país desde 1965. Este sistema permite la realización de estudios profundos sobre la génesis de los suelos, y es uno de los sistemas más utilizados a nivel mundial por la comunidad científica de la Ciencia del Suelo. Los inconvenientes para una utilización práctica de este sistema consisten en la gran cantidad de datos medioambientales y de laboratorio que se requieren para un uso correcto; además de que se requiere una cantidad importante de experiencia y conocimientos en esta disciplina por parte del clasificador. Desafortunadamente, en México no se dispone de la información medioambiental necesaria ni de los elementos de laboratorio fuera del ámbito de la investigación, por lo que este sistema no puede ser considerado de utilidad práctica para los fines que persigue esta Guía. Sin embargo, dada la gran cantidad de información que puede dar este sistema sobre las características de los suelos, se hace frecuentemente referencia al mismo con el objeto de compararlo con el de la FAO-Unesco y de dar al lector las herramientas necesarias para una mejor comprensión de textos especializados en la Ciencia del Suelo.

De acuerdo con las ideas que privan en el área de la Ingeniería Civil, los suelos se pueden clasificar de acuerdo a su origen en dos grandes grupos: suelos residuales y suelos transportados. Esta agrupación es definida y comentada en los siguientes párrafos desde el punto de vista de la Ciencia del Suelo, a fin de compararla con la diagnosis de Suelos FAO-Unesco (1988-1990) y de establecer las relaciones medioambientales de las diferentes unidades de suelos.

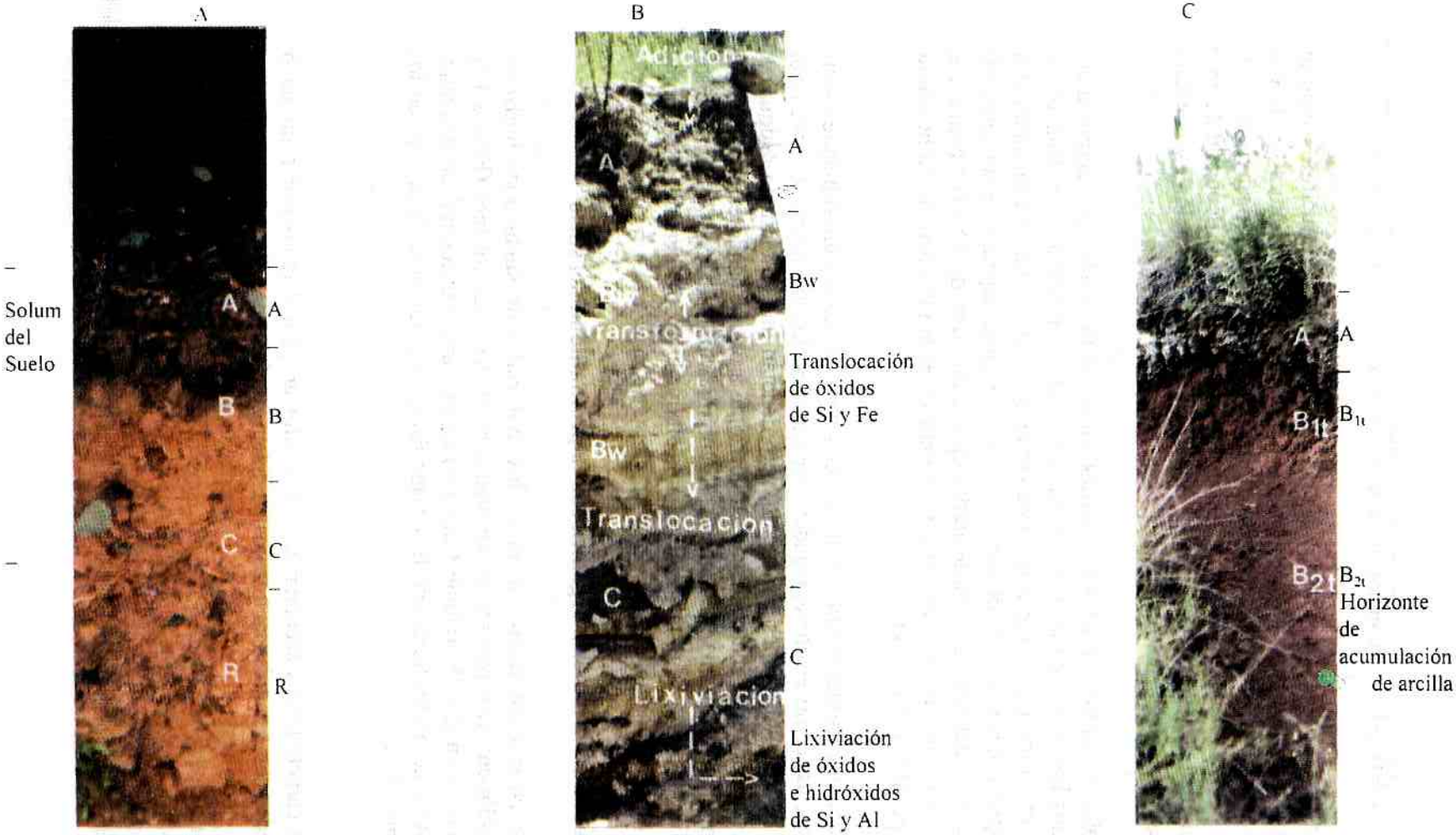
3.2 DEFINICION Y DESCRIPCION DE SUELOS RESIDUALES

Por definición, un suelo residual es aquél que se forma *in situ* a partir de una roca o material depositado y estabilizado, es decir, a partir de aquel material que ya no presenta el riesgo de ser nuevamente desplazado por los diferentes agentes geológicos. Este material estabilizado, puede o no estar consolidado y presentar diversos orígenes: aluvial, coluvial, coluvio-aluvial, eólico, etc. Así, los suelos residuales siempre son el resultado de la alteración de rocas y/o depósitos estabilizados y de los minerales contenidos en ellos, que no se encuentran en equilibrio en las condiciones de temperatura, presión y humedad del espacio entre la atmósfera y la litósfera.

Los factores formadores del suelo, que incluyen clima, material parental, relieve, organismos y tiempo (la acción de cada uno de estos factores es ampliamente discutida en la Parte II de esta Guía), confieren a los suelos residuales propiedades de diagnóstico como son:

Formación de horizontes "A" y, con frecuencia "B" que, en conjunto, constituyen el "*Solum*" del perfil de suelo (Figura 3A).

FIGURA 3 CARACTERIZACION DE SUELOS RESIDUALES DE MEXICO.



Clasificación :Cambisol

Clasificación:Arenosol

Clasificación:Nitosol

OBSERVACIONES:

- En la Figura 3A, se observa un perfil de suelo constituído por un horizonte A y B (Solum), una capa de suelo denominada C, y la roca que le dió origen: (R). Los cambios morfológicos entre los horizontes, como el color y la textura ,son graduales; lo cual es característico de los suelos residuales.
- La Figura 3B muestra un suelo transportado antiguo, donde la estratificación ha ido desapareciendo por efecto de los factores medio ambientales. Fenómenos como la adición, translocación, lixiviación y transformación de algunos minerales primarios lo hacen semejante, en la actualidad ,a un suelo residual. En la Figura 3C, se observa un suelo residual muy desarrollado, que se caracteriza por su acumulación de arcilla en el horizonte B (Bt_1 y Bt_2)

- **Cambios graduales e irregulares en el contacto entre los horizontes** (Figura 3A).

- **Formación de estructura.** Considerándose, en este caso, el concepto "estructura" como un arreglo ordenado de las partículas del suelo que tienden, de modo natural, a formar agregados. El **tipo** de estructura del suelo se determina por la forma de los agregados y la **clase** de estructura por el tamaño de los mismos. El **grado** de estructura es dependiente de la estabilidad o cohesividad de los agregados. En el Anexo 1, se da una definición esquemática de varios tipos de estructuras del suelo.

- **Ausencia de cambios abruptos entre los horizontes y/o capas del suelo.** Esto significa que entre el limite de dos horizontes de un suelo residual no existe, dentro de una distancia en profundidad de 7.5 cm o menos, un incremento mayor al 20 % de arcilla. Por ejemplo, si la capa u horizonte superior muestra 22 % de arcilla en su límite con la capa que le subyace, esta última no deberá de presentar más de 42 % de arcilla, en una distancia de 7.5 cm o menor con respecto a la capa u horizonte que le sobreyace. La excepción es la presencia de un horizonte E álbico dentro del perfil (c.f. Figura 1).

- **Presencia de películas o recubrimientos** de minerales y compuestos órgano-minerales sobre gravas, arena y limo, así como en los agregados estructurales. En los suelos jóvenes estos recubrimientos son escasos y de espesor reducido, pero denotan que en el suelo residual ya existen procesos de migración de materiales de un horizonte a otro. Cuando estos materiales se conservan y acumulan en el perfil, el fenómeno se denomina "translocación", y cuando son eliminados del perfil por efecto de drenaje, se le llama "lixiviación" o "lavado". Un ejemplo de translocación se presenta en la figura 3B.

- **Disminución ordenada de la materia orgánica con la profundidad del suelo**

- **Presencia de un horizonte de acumulación de los materiales de suelo.** Este horizonte puede estar muy débilmente desarrollado en los suelos residuales muy jóvenes (Figura 3B). Puede presentarse como un Bw (Horizonte Cámbico) en la etapa transicional de juventud-madurez (Figura 3A) o como un horizonte Bt (Acumulación significativa de arcilla) en los suelos maduros (Figura 3C).

Existen, además, otras características secundarias que se utilizan para diagnosticar a un suelo residual, las cuales pueden ser discutidas en trabajos complementarios a esta Guía.

3.3 DEFINICION Y DESCRIPCION DE SUELOS TRANSPORTADOS

En Ingeniería Civil se les considera como "Suelos"; en Geología se les considera "Formaciones Superficiales"; en la Ciencia del Suelo no se les considera como un suelo sino como un "Material Potencial Parental de un Suelo Residual"; una vez que se ha estabilizado como un "Material Potencial Parental Formador de Roca Sedimentaria" y se ha consolidado y litificado. En general se les conoce, además, como suelos secundarios o de acarreo. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos, incluye a los "Suelos Transportados" dentro del concepto de "Tierras Misceláneas" el cual, a criterio de los autores, es un término demasiado general, ya que incluye a muy diversos materiales.

En esta Guía se propone clasificar a los suelos transportados de acuerdo al agente que intervino en el transporte. Experiencias previas a esta propuesta (Gama, 1996), prueban que es posible reconocer el origen de un suelo transportado y, con ello, aumentar el conocimiento sobre sus características y comportamiento físico y mecánico.

3.3.1 Propuesta de Clasificación

Es posible distinguir y ordenar las características de, por lo menos, seis tipos de suelos transportados:

1. Suelo de origen coluvial. Se le reconoce fácilmente por su localización preferencial en zonas de fuertes pendientes y por su alto contenido en gravas y guijarros de forma angular y subangular. En este caso, la fuerza gravitacional es el factor principal en el desplazamiento de estos materiales.

2. Suelo de origen aluvial. Muestra una estratificación muy clara. En la zona de cauce fluvial, presenta cantos, gravas y guijarros en su mayor parte subredondeados y redondeados, de naturaleza rocosa muy heterogénea. En los márgenes fluviales (terrazas, meandros, llanuras de inundación, etc.) generalmente se observa una buena distribución granulométrica que varía de gravas y arenas gruesas a limos y algunas arcillas.

3. Suelo de aporte coluvio-aluvial. Se componen por lo elementos mencionados en los incisos 1 y 2 y son característicos de zonas de Piedemonte y Abanicos aluviales.

4. Suelo de litoral marino. En estos ambientes, se presentan zonas de características diversas y, por lo tanto, de materiales muy variables como son la zona de plataforma con arenas y restos de organismos (esqueletos calcáreos); la zona costera con arenas generalmente uniformes (poca distribución de tamaños); las zonas de deltas (desembocadura de los ríos hacia el mar) con graduaciones de materiales de gruesos a muy finos en las diferentes secciones del delta, y zonas de esteros y lagunas marginales con materiales predominantemente finos, con un contenido de arcilla importante.

5. Suelo de aporte eólico. Frecuentemente muestra capas con estructura de tipo laminar (c.f. Anexo 1). Se caracteriza generalmente por sus altos contenidos en partículas de tamaño limo, así como por la presencia de una gran cantidad de esporas de especies no nativas de la región. Se localizan principalmente en zonas costeras y desérticas.

6. Suelo de origen volcánico. Los suelos transportados de este origen comprenden, principalmente, materiales piroclásticos como cenizas y pómez. Estos últimos están compuestos, en su mayor parte, por vidrio volcánico, el cual, al alterarse, propicia la formación de materiales no cristalinos (amorfos) que confieren propiedades físico-químicas y mecánicas muy particulares a los suelos. Existe una variante para estos suelos denominada "aluvión vulcanogénico" que presenta más de 60% de vidrio volcánico, el cual es transportado, retrabajado y mezclado con materiales de otros orígenes.

Los nombres de las unidades de suelos mencionados se definen en la Tabla 1 y en el Anexo 2.

3.3.2 Características de Diagnóstico

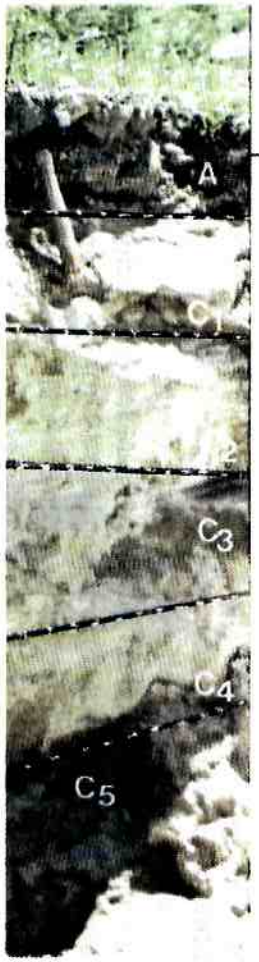
No obstante que el origen de un suelo transportado es diverso, estos suelos presentan características de diagnóstico que le son comunes (Figura 4). Las más sobresalientes son:

- Estratificación en el perfil del suelo.
- Posible formación de un horizonte A pero ausencia, en todos los casos, de un horizonte B.
- Cambios morfológicos claros o abruptos, así como contactos planos bien definidos entre capas, los cuales son, en ocasiones, ondulados.
- Ausencia de estructura (aspecto masivo y/o de "grano suelto"), en algunos casos se puede presentar una estructura laminar.
- Frecuentes cambios texturales abruptos entre las capas.
- Ausencia de películas o recubrimientos y, cuando éstas se presentan, son heredadas de un suelo residual que, por causas diversas, posteriormente fue transportado.
- Distribución caótica del contenido de materia orgánica con la profundidad.

3.4 UNIDADES DE SUELOS EN MEXICO

Para discutir la posición taxonómica que ocupan tanto los suelos residuales como los suelos transportados dentro del Sistema FAO-Unesco (1990), es necesario analizar y considerar los aspectos que a continuación se indican.

FIGURA 4 CARACTERIZACION DE SUELOS TRANSPORTADOS DE MEXICO.



MORFOLOGIA

Profundidad (cm)	Horizontes o Capas	Denominación Morfológica.	Taxonómica	Suelo
0-21	A	Horizonte Orgánico	Horizonte de Suelo	
21-43	C_1	Depósito de Ceniza	Capa	
43-73	C_2	Depósito de Ceniza	Capa	
73-94/100	C_3	Depósito de Ceniza	Capa	Sustrato
94/110-141	C_4	Depósito de Ceniza	Capa	
141	C_5	Depósito de Ceniza	Capa	

CLASIFICACION:
Regosol téfrico

OBSERVACIONES

- Perfil de suelo estratificado, no consolidado, masivo, con contactos planos entre las capas. Presenta un horizonte A pero carece de un horizonte B. En cada capa. la granulometría, su composición mineral y la distribución de la materia orgánica ,con la profundidad, son muy heterogéneas y caóticas. Todas estas características son diagnósticas para un suelo transportado.

a. Dentro del Sistema FAO-Unesco (1988-1990) se indica la presencia de 28 unidades diferentes de suelos y 153 subunidades en que se dividen. En México existen 24 unidades y 131 subunidades en total; lo que indica la enorme riqueza en diversidad de suelos que se presentan en el Territorio Nacional (Tabla 1, Figura 5: A, B, C, D, E, F, G, H, I).

b. Dentro de la clasificación de suelos propuesta por FAO-Unesco (1990) no se contempla a una de las unidades de suelos muy común en México, denominada Rendzinas la cual, en la mayoría de los casos, agrupa suelos de origen residual.

c. Dentro de las 24 unidades (o 25, si se considera a las Rendzinas) y 131 subunidades que se presentan en el País, sólo cuatro unidades denominadas Fluvisol, Regosol, Leptosol y Antrosol, podrían, en algunos casos, ser consideradas según las definiciones establecidas como de suelos transportados. El resto de las unidades se consideran como suelos residuales (Figura 5A).

d. Es necesario resaltar el hecho de que muchos de los suelos que son clasificados como residuales, pudieron no haberse formado a partir de una roca, sino a partir de un material previamente transportado que se depositó y estabilizó; como es el caso de muchos: Gleysoles, Regosoles, Leptosoles, Arenosoles, Vertisoles, Cambisoles, Calcisoles, Gypsisoles, Solonetz, Solonchaks, Kastanozems, Phaeozems, Luvisoles, e Histosoles (Figura 5).

e. Solamente en el caso de los suelos residuales tropicales y subtropicales (FAO-Unesco, 1990) pueden identificarse características que indiquen que estos suelos se formaron a partir de una roca, aunque no puede excluirse la posibilidad de que varios de ellos se originaron a partir de materiales transportados y, posteriormente, estabilizados. En esta clase se incluyen solamente 6 unidades de suelos: Lixisoles, Acrisoles, Alisoles, Nitisoles, Ferralsoles y Plintisoles (Figura 5G).

Del análisis de los factores arriba mencionados se puede concluir que, contrariamente a las acepciones clásicas de suelos residuales y transportados, las diferencias entre su origen no siempre pueden ser establecidas clara y seguramente. A partir de las consideraciones anteriores, cabe hacer notar que existe, aproximadamente, un 70% de unidades de suelos residuales cuyo origen es mixto, es decir, que se pueden formar tanto a partir de rocas como de materiales transportados y depositados.

3.4.1 Diagnosis de las Unidades de Suelo (FAO-Unesco, 1988-1990) y sus Relaciones Medioambientales para México.

Aunque uno de los principios generales, adoptados para la construcción de la Leyenda de Mapas Mundial de Suelos (Sistema FAO-Unesco, 1974-1976), fué el de no utilizar criterios climáticos para la definición de unidades de suelos, en esta Guía se hace una excepción.

Tradicionalmente, se les ha considerado como suelos asociados a una vegetación de estepa o de bosque-estepa, sin embargo, en México se presentan en áreas con diferentes tipos de vegetación que varían desde selva baja caducifolia a pastizal. En esta clase, que incluye a las unidades de Kastanozems y Phaeozems, el relieve es uno de los principales factores para su formación. De tal modo que los Kastanozems siempre ocupan pendientes planas o casi planas, en tanto que los Phaeozems se pueden presentar en diferentes tipos de relieve (Figura 5E).

- **Suelos que muestran una marcada acumulación de arcilla en los horizontes subsuperficiales.** Estos suelos presentan una amplia distribución en las zonas tropicales y templadas de México y, relativamente, son escasos en zonas áridas. Generalmente, se forman a partir de materiales o rocas constituídos por silicatos fácilmente alterables (asociados con Fe y Mg). En esta clase se incluye a los Luvisoles y Planosoles, ambos considerados como suelos maduros (bien desarrollados). Los primeros ocupan áreas de bosques y selvas que muestran relieves que oscilan de plano a fuertemente inclinado, los segundos se sitúan comúnmente en áreas de pastizales donde la pendiente varía entre 0 y 4% (Figura 5F).

- **Suelos que predominan en regiones tropicales y subtropicales.** En estos suelos, el intemperismo y la alteración del perfil son intensos. Para su clasificación, FAO-Unesco (1990) da un énfasis especial a la cantidad de bases (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+} y K^{+}) que estos suelos presentan, así como a la habilidad del suelo para retener e intercambiar estos cationes. Esta propiedad, conocida como Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT), se encuentra directamente relacionada con las partículas coloidales (arcillas y sustancias húmicas). Por definición, se trata de suelos que se desarrollan en un clima cálido-húmedo, lo que favorece la formación de selvas y bosques. La agresividad climática en estas zonas confiere una posición secundaria a la naturaleza del material parental y al relieve, el cual normalmente oscila de plano a fuertemente inclinado. En su mayoría, los suelos que se localizan en estas zonas presentan un perfil de alteración bien desarrollado. Se incluye, en esta clase, a las unidades de Lixisoles, Acrisoles, Alisoles, Nitisoles, Ferralsoles y Plintisoles (Figura 5G)

Suelos ricos en materiales orgánicos. El material orgánico constituye, aproximadamente, en los imeros 40 cm de profundidad, un horizonte denominado "*Hístico*" (Horizonte H). Este consiste principalmente en restos vegetales de la especie *Sphagnum* o de musgos; normalmente, tiene una densidad aparente menor que 0.1 mg/m^3. Existen algunas excepciones a la definición del Horizonte H, por ejemplo, puede incluir a una capa rica en materia orgánica menor de 25 cm de espesor; si presenta 30% o más de materia orgánica y la fracción mineral de esta capa contiene más de 60% de arcilla, o si presenta 20% de materia orgánica y no presenta arcilla. Se puede aceptar, también, que un Horizonte H, menor a los 25 cm de espesor, presente una cantidad proporcional intermedia de materia orgánica con respecto a los contenidos de arcilla.

Dicha excepción se basa en el hecho de que la mayoría de la unidades de suelos presentes en México, pueden ser regionalizadas desde un punto de vista climático. Aunque es necesario advertir que un mapa climático, en si mismo, nunca puede ser considerado un mapa de suelos.

En la tabla 1, se muestran algunas de las características medioambientales para las unidades de suelos (FAO-Unesco, 1990) que se presentan en México, se indican los elementos formativos de los nombres de los grupos principales de suelos y de las unidades de suelos que explican la etimología del nombre. En la figura 5, se ilustran las principales unidades de suelos representativos para las condiciones de México. Resulta importante resaltar que la información utilizada es específica para el territorio nacional.

Los suelos contenidos en el sistema FAO-Unesco pueden ser agrupados en 9 clases, de tal modo, que reflejen su contexto geográfico y evolutivo (sus características ambientales, posible origen y carácter diagnóstico están resumidas en la tabla 1):

- **Suelos no climáticos.** En este concepto, se incluyen aquellos suelos en los que el clima ambiental o el clima del suelo no tiene ninguna influencia para su desarrollo. Consecuentemente, se presentan bajo cualquier condición climática y diversos tipos de vegetación, sobre diversas clases de material parental y en cualquier tipo de relieve. Estos suelos pueden conserva sus características durante largos períodos por lo que su edad es muy variable. Se incluyen en esta clase a los siguientes suelos: Fluvisoles, Gleysoles, Regosoles y Leptosoles, En la figura 5A se muestran los perfiles representativos.

- **Suelos condicionados por el material parental.** En esta clase se coloca a los suelos cuya formación está condicionada principalmente por las características del material inicial (que puede ser una roca o material sedimentario estabilizado) y, de modo secundario, por los demás factores medioambientales. Comprende a las unidades de suelos denominadas Arenosoles, Andosoles, Vertisoles y Rendiznas (Figura 5B).

- **Suelos con desarrollo incipiente.** Incluye únicamente a los Cambisoles, los cuales son predominantes en zonas de clima templado. Su distribución geográfica es amplia ya que se presentan en cualquier tipo de relieve y contienen una gran variedad de tipos de vegetación. Se forman sobre cualquier clase de roca o material (Figura 5C).

- **Suelos que muestran acumulación de sales.** Se forman generalmente en condiciones arídicas, particularmente en zonas mal drenadas. Sostienen una vegetación capaz de resistir largas sequías y altos contenidos de sales (xerófita o halófita principalmente). En la mayoría de los casos, se forman a partir de materiales no consolidados sujetos a grandes adiciones de bases (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+} y K^{+}). Esta clase comprende las unidades de Calcisoles, Gypsisoles, Solonetz y Solonchaks (Figura 5D).
- **Suelos que muestran una marcada acumulación de materia orgánica y bases en el horizonte superficial.** Son suelos que se forman, preferentemente, en climas templados y semiáridos, en la mayoría de los casos, a partir de rocas o materiales ricos en bases.

Generalmente, estos suelos se presentan en climas tropicales cálido-húmedos, templado-húmedos y frío-húmedos, sobre relieves planos o casi planos. En sus primeras etapas de formación la vegetación es predominante acuática y, posteriormente, ésta puede ser sustituida por diversas especies de gramíneas, arbustos y árboles acidófilos. La fracción mineral que estos suelos presentan es, en la mayoría de los casos, de origen transportado. En esta clase los suelos denominados Histosoles son representativos (Figura 5H).

- **Suelos hechos por el hombre.** También denominados "Antrópicos", "Tecnogénicos" o "Entisolizados". Obviamente, se localizan en cualquier zona climática (aunque aún no son muy frecuentes en zonas muy frías) y están en relación con cualquier tipo de vegetación y relieve. Son conformados por una enorme gama de materiales, tanto naturales como artificiales (ladrillo, concreto, madera, vidrio). En general son muy jovenes, los más antiguos tienen probablemente menos de 2000 años. Los Antrosoles representan la unidad tipo de esta clase (Figura 5I).

OBSERVACIONES:

1. Los datos medioambientales que se muestran en la Tabla 1 son específicos para las condiciones de México. Fueron obtenidos de diversas fuentes especializadas, principalmente INEGI, Instituto de Geología y Facultad de Ciencias de la UNAM.
2. Las definiciones de las unidades de suelos que se presentan en dicha tabla, aunque simplificadas en su expresión, representan los conceptos básicos que establece FAO-Unesco, 1988-1990. Las definiciones originales pueden ser consultadas en el documento intitulado "Informe sobre Recursos Mundiales de Suelos 60", FAO-UNESCO, 1990, versión en español preparada por Tarsy Carballa y Colaboradores, España.
3. En el Anexo 2 se presenta la etimología de las palabras usadas para denominar las Unidades y Subunidades de suelos contenidos en el Sistema FAO-Unesco, 1988-1990.

TABLA 1. UNIDADES DE SUELOS FAO-UNESCO (1990) Y CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES

Unidades de suelo	Origen del material parental	Carácter diagnóstico	Ubicación climática	Relieve	Vegetación o uso actual	Material parental	Observaciones
FLUVISOLES (FL)			Climas:				FLUVISOLES. Suelos relacionados a depósitos aluviales recientes. Son suelos que muestran, claramente, estratificación en la mayor parte del perfil, el cual muestra poco desarrollo. En este caso, la distribución irregular de materia orgánica en el suelo revela el carácter de estratificación.
1. FL eútricos	Transportado	Estratificación	C, A y B	Plano a casi plano. Pendiente 0-4 %	Acg, Ppl, Mng, Agc, Me, AO, Psz, AH, Agc, Frut, Gan	1 y 3	
2. FL calcáricos	" "	" "	B, C y A			2	
3. FL dístricos	" "	" "	A y C			4	
4. FL móllicos	" "	" "	C y B			1 y 3	
5. FL úmbricos	" "	" "	C y A			3 y 4	
6. FL tiónicos	" "	" "	A y C			3 y 4	
7. FL sálicos	" "	" "	B, C y A			1, 2 y 3	
GLEYSOLES (GL)			Climas:				GLEYSOLES. Se caracterizan por presentar una saturación, temporal o permanente, con agua fréatica que da al suelo un moteado caractéristico. Estos suelos pueden ser diagnosticados por sus condiciones de reducción , que se reflejan en el logaritmo negativo de la presión de hidrógeno (rH) y o la presencia de Fe 2+.
8. GL eútricos	Transportado y residual	Presencia de un manto freático, dentro de los primeros 50 cm. de profundidad	C y A	Plano a cóncavo. Pendiente 0-0.5%	Acg, Sbn, Ppl, Mng, PS, Bde, Pn, Bc, BO, Sbec, Agc, Frut, Gan	3	
9. GL calcáricos			C, A y Bs			2	
10. GL dístricos			Af, Am, Cf			4	
11 .GL ándicos			Cf, Cw y A			1	
12. GL móllicos			Cw - Aw			2 y 3	
13. GL úmbricos			Af, Am y Cf			3 y 4	
14. GL tiónicos			A			3 y 4	
REGOSOLES (RG)			Climas:				REGOSOLES. Suelos constituidos de material no consolidado, bien drenado, de textura media. Son suelos minerales no diferenciados, no muestran horizontes subsuperficiales de diagnóstico.
15. RG eútrico	Transportado y residual	Suelos sin agregación en los primeros 100 cm. de profundidad.	C, A y B	Plano a muy escarpado. Pendiente 0->36%	Acg, Plm, Sbn, Sac, PS. Agc, Me, Amy AY, AO, AN, ME, Psz, AH, Ea, Pn, Bc, Zac, MJ, VP	1y 3	
16. RG calcárico			B, C y A			2	
17. RG gypsico			Bw y Bs			2	
18. RG dístrico			A y C			3 y 4	
19. GR úmbrico			A y C			3 y 4	
20. GR gélico			Et			1, 2, 3 y 4	
LEPTOSOLES (LP)							LEPTOSOLES. Suelos delgados o muy pedregosos, que sobreyacen a una roca dura, continua y coherente que se localiza a 30 cm o menos de profundidad.
21. LP eútricos	Residual y Transportado o producto de la erosión	Suelos con una profundidad efectiva ≤30 cm	B,C y A	Plano a muy escarpado. Pendiente 0->36%	PS,Sep, Agc, Me, Amy, AY, AO, AN, ME, Psz, AH, Bc, Zac, VP,Agc, Frut, Gan	2 y 3	
22. LP dístricos			A y C			4	
23. LP réndsicos			A, B y C			2	
24. LP móllicos			B y C			2 y 3	
25. LP úmbricos			A y C			3 y 4	
26. LP líticos			A, B, C y E			4	
27. LP gélicos			Ef y Et			1, 2, 3 y 4	

Unidades de suelos	Origen del material parental	Carácter diagnóstico	Ubicación climatica	Relieve	Vegetación o uso actual	Material parental*	Observaciones
ARENOSOLES (AR) 28.AR háplicos 29.AR cámbicos 30.AR lúvicos 31.AR ferrálicos 32.AR álbicos 33.AR calcáricos 34.AR gléicos	Residual y Transportado	Suelos de textura migajón arenosa ó más gruesa. No presentan más de 35% (por volumen) de gravas.	A, B y C A y C Af, Am, Cf Af, Am Am, Cf, Cw Bw, Cw, Aw Af, Am	Plano a ligeramente inclinado. Pendiente 0- 4%	Sasv, Acg Plm, Sbn, Sac, PS, Sbc, Sbec, Psz, Ea, Zac, Agc, Frut, Gan.	4 - 3 3 - 4 3 - 4 4 - 3 4 2 - 4 4	ARENOSOLES. Se caracterizan por su textura gruesa (diámetro de particula>2.0 mm) poco desarrollados. Generalmente se forman a partir de rocas resistentes a la alteración.
ANDOSOLES (AN) 35.AN háplicos 36.AN móllicos 37.AN úmbricos 38.AN vítricos 39.AN gléicos 40.AN gélicos	Residual	Suelos formados a partir de materiales ricos en vidrios volcánicos.	A, C y B C A y C A, C y B A, Cf Et	Plano a escarpado. Pendiente 0 - 36%	Sac, Sbc, Me, Psz, Bde, Ea, Pn, Bc, BO, Zac, VP, Agc, Frut, Gan	1 - 3 1 1 - 3 1 - 3 - 4 1 - 3 1 - 3 4	ANDOSOLES. Suelos de origen volcánico, Holocénico , rico en vidrios volcánicos facilmente alterables. Generalmente tienen un horizonte superficial oscuro.
VERTISLES (VR) 41.VR eútricos 42.VR dístricos 43.VR cálcicos 44.VR gypsicos	Residual	Autoinversión y riqueza en arcillas 2:1	C, A y B C, A C, B, A B, C	Plano a moderadamente inclinado. Pendiente 0 - 9%	Sasv, Acg, Sac, PS, Sbc, Sep, Sbec, Me, Psz, Agc, Frut, Gan.	3 - 1 - 2 3 1 - 2 - 3 2 - 3	VERTISOLES. Connotativo de movimiento de la superficie del suelo (Expansión - Contracción) Siempre presentan más de 35% de arcilla, pricipalmente de relación 2 : 1.
CAMBISOLES (CM) 45.CM eútricos 46.CM dístricos 47.CM húmicos 48.CM calcáricos 49.CM crómicos 50.CM vérticos 51.CM ferrálicos 52.CM gléicos 53.CM gélicos	Principalmente Residual	Suelos con desarrollo incipiente que presentan un horizonte B cámbico	A, C, y Bs A, Cw, y Cf A, Cf y Cw Cw, Cs y Aw Cw, Cs, Aw, Am Cw y Aw A y Cf A y Cf Et	Plano a escarpado. Pendiente 0- 36%	Sasv, Acg, Plm, Sbn Ppl, Sac, Sbc, Sep Agc, Sbec Amy, ME Psz, Bde Ea, Pn, Bc BO, Zac, Agc Frut, Gan	1 - 3 4 - 3 - 1 4 - 3 - 1 2 - 3 - 1 3 - 2 - 1 3 - 2 - 1 3 - 4 1 - 2 - 3 - 4 1 - 3	CAMBISOLES. Suelos jóvenes, donde el grado de alteración en el perfil, ha propiciado cambios de color, extructura y consistencia que los diferencían claramente de la roca o material parental que les dio origen.
CALCISOLES (CL) 54.CL háplicos 55.CL lúvicos 56.CL pétricos	Transportado y Residual	Suelos que muestran una acumulación **insitu** de CaC03	Bs, Bw y Cw Bw, Cw Bs, Bw y Cw	Plano a ligeramente inclinado. Pendiente 0 - 4%	Sbec,ME Amy,AY AO,AN Psz,AH Agc,Frut Gan	2 - 3 2 - 3 2 - 3	CALCISOLES. Suelos de zonas áridas y subáridas que se caracterizan por presentar una acumulación de Ca C03 equivalente al 15%

Unidades de suelos	Origen del material parental	Carácter diagnóstico	Ubicación climática	Relieve	Vegetación o uso actual	Material parental	Observaciones
GYPSISOLES (GY) 57.GY háplicos 58.GY cálcicos 59.GY lúvicos 60. GY pétricos	Transportado y Residual	Suelos que muestran una acumulación *In situ* de CaSO4	Bw, Bs y Cw Bw, Bs y Cw Bs, Bw y Cw Bs, Bw	Plano a ligeramente inclinado. Pendiente 0 - 4%	Me, Amy, AY, AO, AN, Psz, AH, Agc, Frut, Gan	2 - 1 - 3 2 - 3 3 - 2 2	GYPSISOLES. Suelos de zonas áridas y semiáridas que se caracterizan por presentar una acumulación de yeso , del 5% o mayor, en el horizonte C.
SOLONETZ (SN) 61.SN háplicos 62.SN móllicos 63.SN cálcicos 64.SN gypsicos 65.SN estágnicos 66.SN gléicos	Residual y Transportado	Suelos con estructura columnar o prismática Tienen una saturación con sodio > 15%	Cw, Bs, Bw, A Cw, Bw Bw, Bs, Cw Bw, Bs Am, Aw, Cf Am, Aw, Cf, Cw	Plano a casi plano 0 - 2% , drenaje deficiente	Me, AY Psz, AH Gan	2 - 3 - 1 2 - 3 2 - 3 2 2 - 3 - 1 2 - 3 - 1	SOLONETZ. Suelos que muestran claramente un horizonte de acumulación de NaCL (horizonte B nátrico) dentro de los primeros 100cm de profundidad.
SOLONCHAKS (SC) 67.SC háplicos 68.SC móllicos 69.SC cálcicos 70.SC gypsicos 71.SC sódicos 72.SC gléicos 73.SC gélicos	Transportado y Residual	Tienen una conductividad eléctrica en extracto saturado > 15dsm -1 a 25° C	A, C, B Cw, Bs, Cw, Bs, Bw Bs, Bw Bs, Bw A,C Et	Plano a casi plano. Pendiente : 0 - 2% drenaje deficiente	Ppl, Acg Me, Amy AY, AO AN, Psz AH, Agc Gan	2- 3 - 1 2 - 3 2 - 3 2 2 - 3 2 - 3 - 1 2 - 3 - 1	SOLONTCHAKS. Suelos que muestran claramente un horizonte de acumulación de sales más solubles que el yeso. Este horizonte se presenta dentro de los primeros 100cm de profundidad.
KASTANOZEMS (KS) 74.KS háplicos 75.KS lúvicos 76.KS cálcicos 77.KS gypsicos	Residual y Transportado	Suelos con un horizonte superficial muy oscuro. Son ricos en CaC03	Cw, Cs, Bs Cw, Cs Bs, Cw, Cs Bs, Bw, Cs	Plano a casi plano. Pendiente: 0 -2%	AY, ME Psz, Bde Agc, Frut, Gan.	2 - 3 2 - 3 2 - 3 2	KASTANOZEMS. Suelos de color pardo o castaño ricos en materia órganica (> 2.0%) y bases (Ca++, Mg++, Na+ y K+=)
PHAEOZEMS (PH) 78.PH háplicos 79.PH calcáricos 80.PH lúvicos 81.PH estágnicos 82.PH gléicos	Residual y Transportado	Suelos con un horizonte superficial muy oscuro. Son ricos en bases.	A, C, B C, B A, C A, C A, C	Plano a muy escarpado. Pendiente: 0 - > 36%	Sbc, Sep Sac, Sbec ME, Psz Bde, Ea Agc, Frut, Gan.	3 - 2 - 1 2 - 3 3 - 2 - 1 3 - 2 - 1 3 - 2 - 1	PHAEOZEMS. Suelos siempre de color oscuro, ricos en materia orgánica y bases .
LUVISOLES (LV) 83.LV háplicos 84.LV férricos 85.LV crómicos 86.LV cálcicos 87.LV vérticos 88.LV álbicos 89.LV estágnicos 90.LV gléicos	Residual y ocasionalmente transportado	Suelos con un horizonte de acumulación de arcilla. Son ricos en bases intercambiables (Ca++, Mg++, Na+, K+)	Am, Aw, Cw, Bs Am, Aw, Cf, Cw Cf, Cw, Aw, Am Cw, Aw, Bs Aw, Cf, Cw Af, Am, Cf Af, Am Cf Af, Am, Cf	Plano a fuertemente inclinado. Pendiente: 0-18%	Sasv, Acg Plm, Sbn Sac, PS Sbc, Sep Agc, Sbec AY, ME Psz, Bde Pn, Bc, Agc Frut, Gan	3 - 1 - 2 3 - 4 - 1 3 - 4 - 1 2 - 3 - 1 2 - 3 3 - 4 2 - 3 - 4 2 - 3 - 4	LUVISOLES. Suelos que denotan una acumulación iluvial de arcillas y bases (B argílico).

Unidades de suelos	Origen del material parental	Carácter diagnóstico	Ubicación climática	Relieve	Vegetación o uso actual	Material parental *	Observaciones
PLANOSOLES (PL) 91.PL eútricos 92.PL dístricos 93.PL móllicos 94.PL úmbricos	Principalmente residual	Suelos que presentan un horizonte E álbico *.	Aw, Cw, Bs Am, Af, Cf Aw, Cw, Cs, Bs Am, Aw, Cs, Cw	Plano a casi plano. Pendiente: 0-4%	Plm, Sbn PS, Psz AH, Bc Agc, Frut Gan.	3 - 4 - 1 4 - 3 3 - 1 - 2 3 - 4	PLANOSOLES. Suelos desarrollados generalmente en una posición topográfica horizontal o en una depresión con encharcamiento superficial estacional.
LIXISOLES (LX) 95.LX háplicos 96.LX férricos 97.LX plínticos 98.LX álbicos 99.LX estágnicos 100.LX gléicos	Residual	Suelos que acumulan arcillas de baja CICT *. Su contenido en bases es > 50%	A y Cf Af, Am Af, Am, Cf Af, Am, Cf Af, Am, Cf Af, Am, Cf	Plano a ligeramente inclinado. Pendiente: 0-4%	Sasv, Acg Sbn, Sac PS, Psz Agc, Frut Gan	3- 4 4 - 3 3 - 4 4 - 3 4 - 3 4 - 3	LIXISOLES. Suelos que acumulan arcilla con una CICT menor de 24cmol (+) Kg-1, y que presentan una alteración fuerte en su fracción mineral.
ACRISOLES (AC) 101.AC háplicos 102.AC férricos 103.AC húmicos 104.AC plínticos 105-AC gléicos	Residual	Suelos que acumulan arcilla de baja CICT. Su contenido en bases es < 50%	Aw, Am, Cf, Cw Af, Am, Cf Af, Am, Cf Am, Aw, Cf, Cw Af, Am, Cf	Plano a fuertemente inclincado. Pendiente: 0-18%	Sasv, Acg Plm, Sbn Sac, Psz Bde, Ea, Pn Bc, BO, Agc Frut, Gan.	3 - 4- 1 - 2 4 - 3 - 1 4 - 3 - 1 3 - 4 - 1 3 - 4 - 1 - 2	ACRISOLES. Suelos muy ácidos con baja saturación de bases (Ca++, Mg++, Na+, K+=<50%).
ALISOLES (AL) 106.AL háplicos 107.AL férricos 108.AL úmbricos 109.AL plínticos 110.AL estágnicos 111.AL gléicos	Residual	Suelos tropicales con alto contenido en aluminio, pobres en bases	Af, Am Af, Am Af, Am Af, Am Af, Am Af, Am	Plano a ligeramente inclinado. Pendiente: 0-4%	Sasv, Acg Sbn, Sac Sbc, Agc Frut, Gan.	4 - 3 - 1 - 2 4 - 3 4 - 3 3 - 4- 2 - 1 4 - 3 - 2 4 - 3	ALISOLES. Suelos que acumulan arcillas con CICT>24cmol (+) Kg-1, que presentan una saturación de bases <50%. Sus contenidos en aluminio son altos.
NITISOLES (NT) 112.NT háplicos 113.NT ródicos 114.NT húmicos	Residual	Suelos con acumulación de arcilla que no decrece con la profundidad	A, Cf, Cw A, Cf, Cw A, Cf	Plano a moderadamente inclinado (0-9%)	Sasv, Acg Sac, Ea, Pn, Bc BO, Agric, Frut Gan.	3 - 4 - 2 - 1 3 - 4 4 - 3	NITISOLES. Suelos que muestran superficies brillantes en sus unidades estructurales (agregados).
FERRALSOLES (FR) 115.FR háplicos 116.FR xanticos 117.FR ródicos 118.FR húmicos 119.FR plínticos	Residual	Suelos que muestran un horizonte rico en sesquióxidos*	Af, Am Af, Am Af ? Af ? Af ?	Plano a moderadamente inclinado. Pendiente: 0-9%	Sasv, Acg, Sbn, Sac Agc, Frut Gan.	4 - 3 - 2 - 1 4 - 3 4 - 3 - 2 4 - 3 4 - 3	FERRALSOLES. Se caracterizan por presentar contenidos elevados de hierro ,aluminio, titanio y arcillas caoliníticas. Sus contenidos en bases son muy pobres.

Unidades de suelos	Origen del material parental	Carácter diagnóstico	Ubicación climática	Relieve	Vegetación o uso actual *	Material parental*	Observaciones
PLINTOSOLES (PT) 120.PT eútricos 121.PT districos 122.PT húmicos 123.PT álbicos	Residual	Suelos con plintita bien desarrollada	Am, Aw, Cf Af, Am Af, Am, Aw Af, Am	Plano a casi plano. Pendiente: 0-4%	Sasv, Acg Sbn, Sac Sbc, Agc Frut, Gan.	3 - 4 - 2 - 1 4 - 3 4 - 3 4 - 3 - 2	PLINTISOLES. Suelos que presentan materiales arcillosos abigarrados, que se endurecen cuando se exponen a la intemperie.
HISTOSOLES (HS) 124.HS fólicos 125-HS térricos 126.HS fíbricos 127.HS tiónicos	Residual y Transportado	Suelos orgánicos constituidos por restos vegetales.	Aw, Cw, Et Aw, Cw, Et Aw, Cw, Et Aw	Plano a casi plano. Pendiente: 0 - 0.5%	Ppl, Psz Agc, Frut	Material orgánico	HISTOSOLES. Suelos que se caracterizan por presentar una acumulación significativa de material orgánico, fresco o parcialmente descompuesto.
ANTROSOLES (AT) 128.AT áricos 129.AT cumúlico 130.AT fímico 131.AT úrbico	Transportados	Suelos formados por el hombre	A, C, B	Plano a muy escarpado. Pendiente: 0->36%	Agrícola Urbano Confinamiento	todos	ANTROSOLES. Suelos que muestran características que denotan el efecto de las actividades humanas.

* Material parental : 1 Cenizas volcánicas, piroclásticos y otros materiales volcánicos retrabajados (Aluvión o coluvión vulcanogénico) de rápida alteración . 2. Materiales (Rocas y sedimentos)
ricos en bases intercambiables y solubles, principalmente carbonato de calcio. 3. Materiales constituidos por silicatos fácilmente alterables. 4. Materiales con silicatos difícilmente alterables.

* 3 Vegetación: (Clima A)
Sasv= Selva alta siempre verde; Acg= Acahuales. Plm= Palmeras; Sbn= Sabana; Ppl= Popal; Mng= Manglar
Sac= Selva alta subcaducifolia; PS= Palmeras de sabal; Sbc= Selva baja caducifolia; Sep= Selva espinosa perennifolia;
Agc= Agrupaciones de crasicaules.

* 3 Vegetación: (Clima B)
Sbec= Selva baja espinosa caducifolia; Me= Matorral espinoso; Amy= Asociación de magueyes
AY= Asociación de Yucas, AO= Asociación de Ocotillo; AN= Asociación de Nopales; ME= Matorral de encinos;
Psz= Pastizal y AH= Asociación halófitas.

* Vegetación: (Clima C)
Bde= Bosque de cedros o enebros; Ea= Encinares altos; Pn= Pinares; Bc= Bosque caducifolio
BO= Bosque de Oyameles; Zac= Zacatonal.

Vegetación: (Clima E)
MJ= Matorral de Juníperus; VP= Vegetación de páramo.

USO: Agc= Agrícola; Frut= Frutícola; Gan= Ganadero.

Climas:

A: Clima tropical lluvioso. Af: clima de selva; Aw: clima de sabana.
B: Clima seco; Bs: clima de etapa; Bw: clima de desierto.
C: Clima templado lluvioso; Cw: clima sínico; Cs: clima mediterraneo; Cd: clima templado.
D: Clima frio; ET: clima de tundra; EF: clima de hielos perpetuos.

OBSERVACIONES:

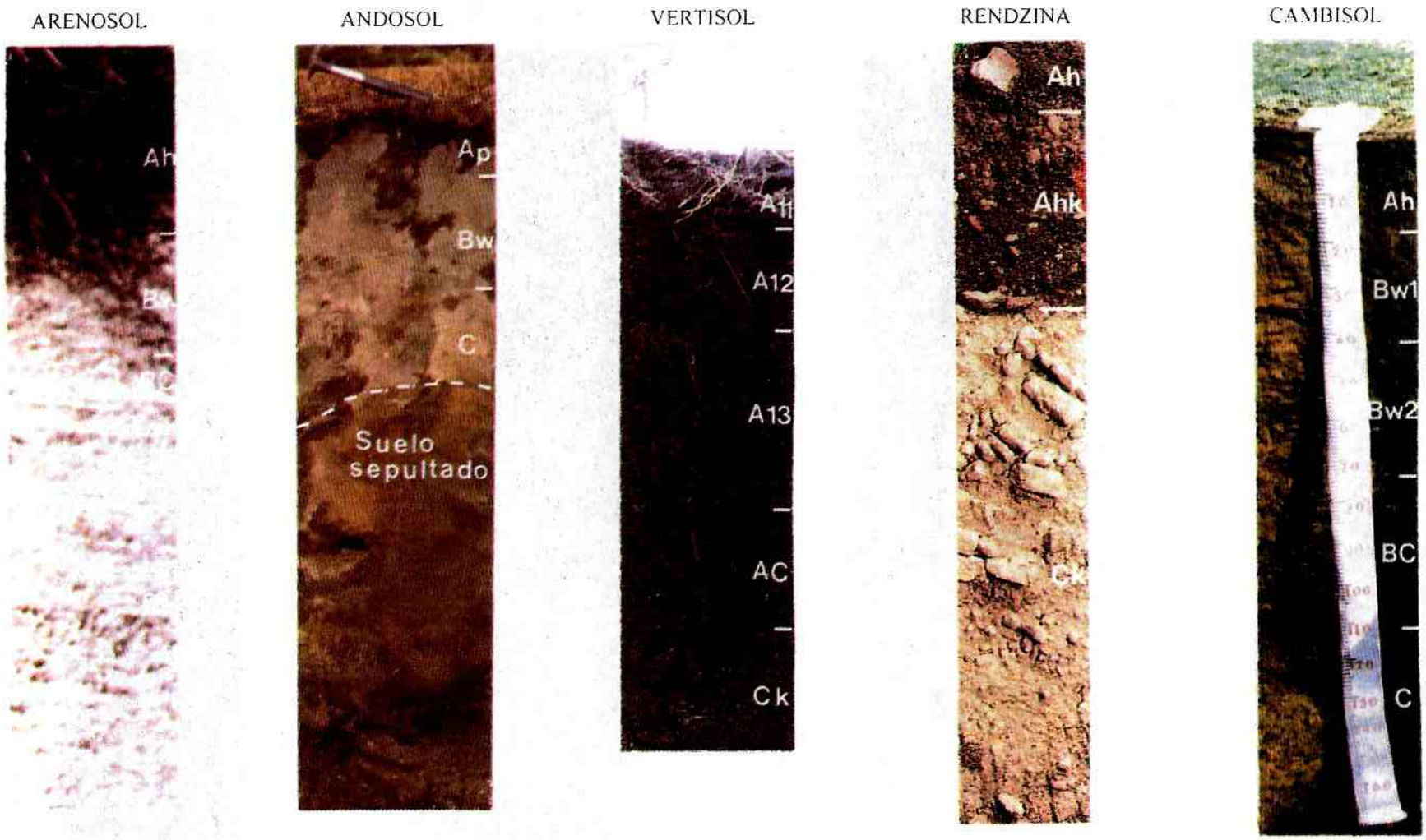
En relación al Suelo de Rendzina, la FAO-UNESCO (1990) lo ha clasificado como Leptosol réndsico, sin considerar un criterio adecuado a las condiciones de México. En vista de que existen en el país amplias áreas con Suelos de Rendzinas, como es el caso de varias sierras localizadas en las zonas áridas o en la península de Yucatán, se propone, en este texto guía, incluirlos como otra Unidad de Suelo dragnóstica.

FIGURA 5 A. SUELOS NO CLIMATICOS

OBSERVACIONES:

Se trata de suelos muy poco desarrollados que pueden formarse bajo cualquier condición climática. Estos suelos, con excepción de algunos Leptosoles y Regosoles son, en su mayoría transportados, es decir, se han formado a partir de depósitos no consolidados y estratificados. Dadas las características tan heterogéneas del material parental del cual se forman, sus propiedades mecánicas, químicas y mineralógicas son sumamente variables.

FIGURAS 5B y 5C. SUELOS CONDICIONADOS POR EL MATERIAL PARENTAL Y SUELOS CON DESARROLLO INCIPIENTE.

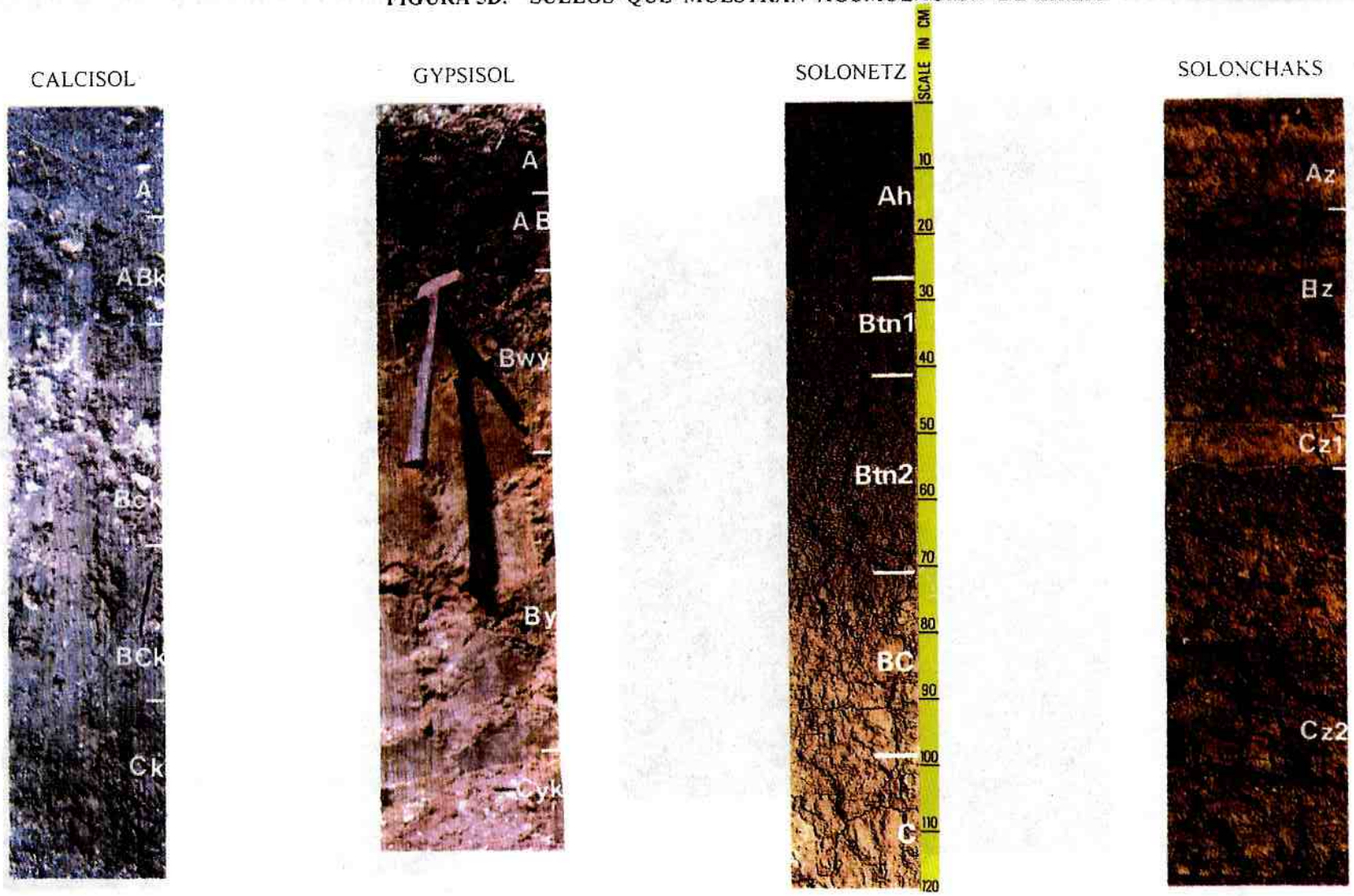


OBSERVACIONES:

- Estos suelos, en particular, muestran varias de las características físicas, químicas y mineralógicas similares a la roca o material parental del cual se formaron. La naturaleza del material de origen, en este caso, es predominante sobre los otros factores medio ambientales formadores de suelo.

- El Cambisol es el mejor ejemplo de un suelo con desarrollo incipiente. Siempre se considera como un suelo residual debido a que presenta un horizonte Bw. Cualquier suelo que muestre dicho horizonte es residual por definición; aunque pudo formarse de un depósito originalmente no consolidado.

FIGURA 5D. SUELOS QUE MUESTRAN ACUMULACION DE SALES.



OBSERVACIONES:

En su mayoria, estos suelos se forman a partir de depósitos no consolidados, aunque estabilizados. Su principal caracteristica es la presencia de un horizonte de acumulación iluvial en los que se incluyen: el carbonato de calcio (Calcisol), el sulfato de calcio (Gypsisol), el cloruro de sodio (Solonetz) y sales más solubles que el yeso (Solonchaks). A estos dos últimos suelos se les considera como corrosivos.

FIGURAS 5 E y F. SUELOS QUE MUESTRAN UNA ACUMULACION SIGNIFICATIVA DE MATERIA ORGANICA EN LOS HORIZONTES SUPERFICIALES Y SUELOS QUE ACUMULAN ARCILLA EN LOS HORIZONTES SUBSUPERFICIALES.

KASTANOZEM

PHAEOZEM

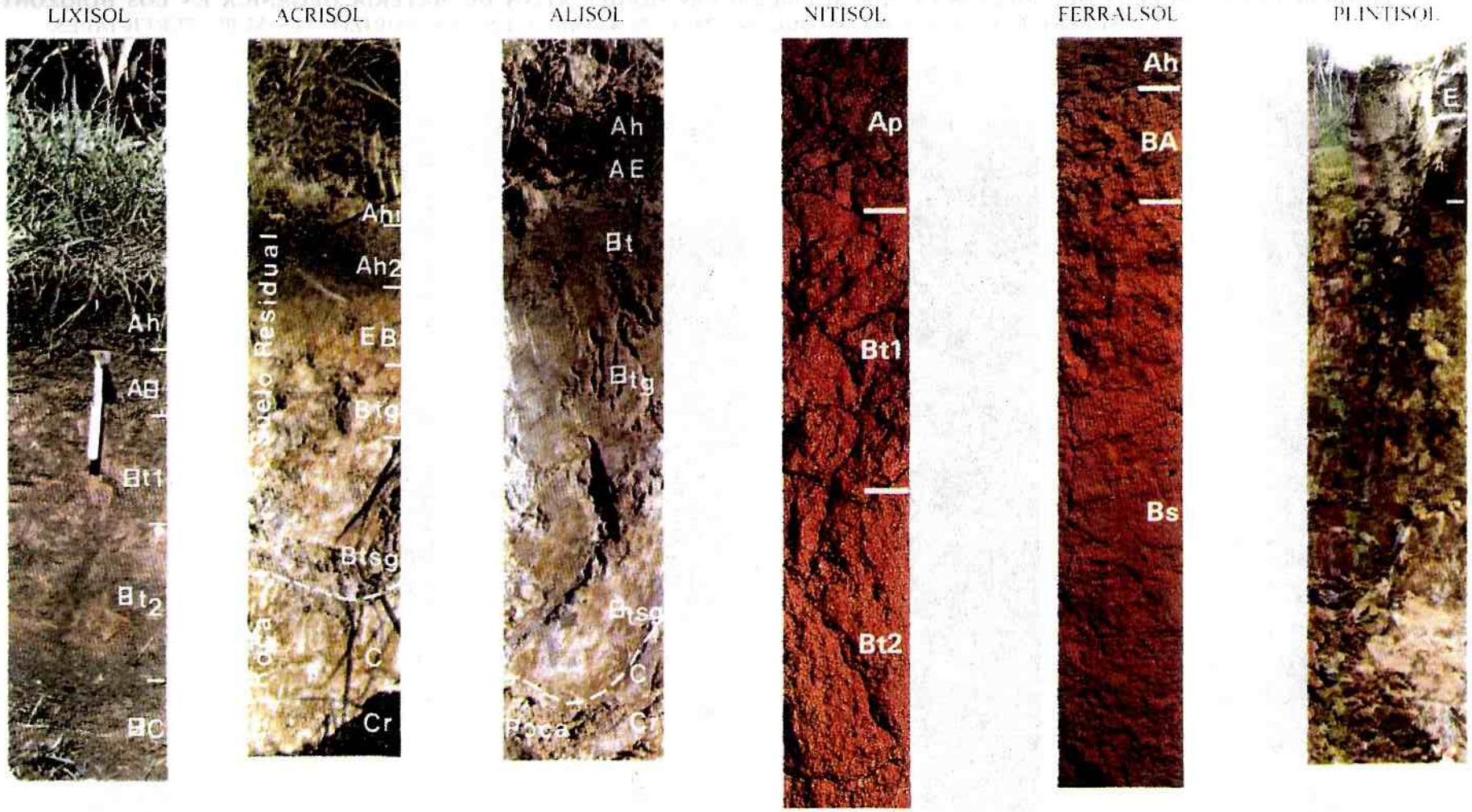
LUVISOL

PLANOSOL

OBSERVACIONES:

- Los Kastanozem y Phaeozem se caracterizan por una aptitud de uso agricola conferida por sus altos contenidos en M.O. y bases (Ca^{++},Mg^{++},Na^{+},K^{+}). Desafortunadamente, son escasos en Mexico. Los Luvisoles y Planosoles son suelos con aptitudes forestales. En el primero de ellos dominan las arcillas de tipo haloisitico, en tanto que en el segundo las de tipo montmorillonítico. Ambos suelos se caracterizan por presentar un horizonte B donde se acumula la arcilla iluviada.
- Es importante recordar que muchos de estos suelos tuvieron como material parental depósitos no consolidados (suelos transportados). Sin embargo, al desaparecer, através del tiempo, las evidencias de estratificación y formarse horizontes en el perfil del suelo, su comportamiento es el de un suelo residual.

FIGURA 5G. SUELOS TROPICALES Y SUBTROPICALES DE CLIMA CALIDO-HUMEDO.



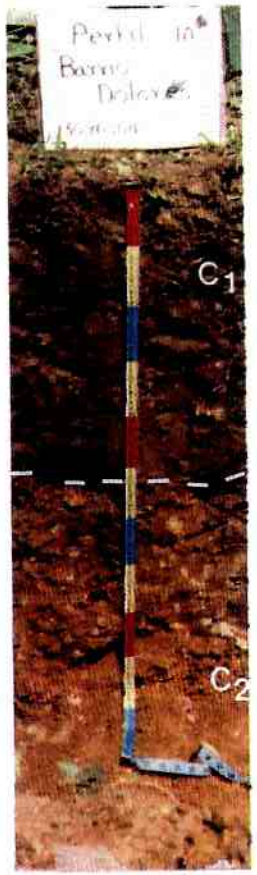
OBSERVACIONES:

- Estos son los suelos que, en general se consideran residuales, ya que son los únicos que pueden ajustarse a las definiciones establecidas por la Geotechnical Office (1988) sobre el "perfil de intemperismo".
- Como puede observarse en los perfiles del Acrisol y Alisol, los conceptos de roca "alta" (Pw 30/50) y "completamente alterada" (Pw 0/30) resultan evidentes. Sin embargo, existen muchas variantes de estos suelos en las cuales no es posible aplicar tales conceptos.

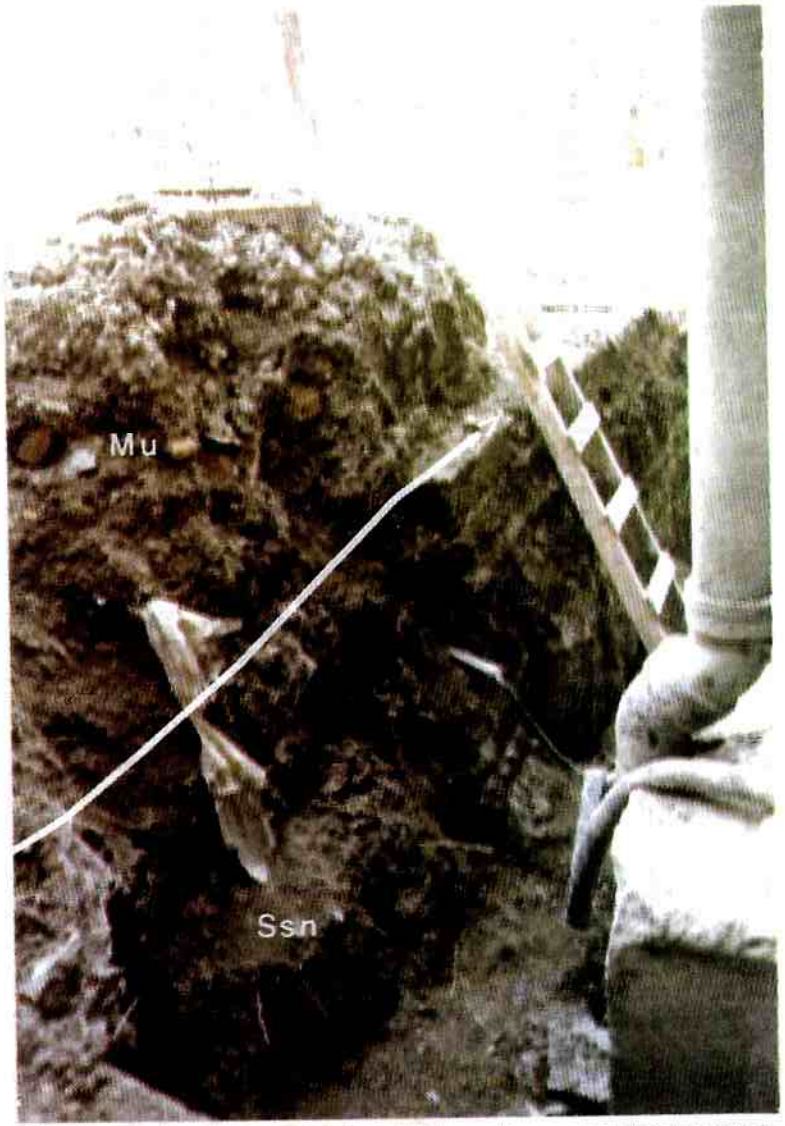
FIGURAS 5H y 5I. SUELOS ORGANICOS Y SUELOS HECHOS POR EL HOMBRE

HISTOSOL

ANTROSOL



ANTROSOL



OBSERVACIONES:

- El Histosol en este caso, está constituido por una secuencia de restos orgánicos (Horizonte H) y capas de cenizas volcánicas (c). Los altos contenidos de materia orgánica presentes (>30%) hacen que el suelo sea problemático para realizar casi cualquier obra de infraestructura de Ingeniería Civil.
- Los Antrosoles son suelos hechos por el hombre. Un ejemplo es el perfil 10, el cual muestra una capa de 50cm de espesor, depositada después de la realización de obras de dragado. En el otro ejemplo, se muestra un suelo salino-sódico (Ssn), sobre el que se están depositando, intencionalmente, diferentes materiales de origen antrópico (Mu) con el propósito de utilizar estos materiales, libres de sales, como un sustrato para construir espacios verdes.

PARTE II : FACTORES FORMADORES DE SUELOS

INTRODUCCION

Objetivo:

- Suscitar una mejor comprensión de las relaciones existentes entre los factores medioambientales formadores de suelos, los procesos de intemperismo y el consecuente desarrollo de las propiedades de los suelos.

Actualmente, los conceptos establecidos por Dokuchaev (1883) y Hilgard (1892) sobre la interacción de cinco factores en el desarrollo de los suelos, siguen teniendo validez y son utilizados por todas las escuelas de la Ciencia del Suelo en el mundo. Estos factores son el clima, el material parental, la topografía o relieve, los organismos y el tiempo.

Algunos investigadores, en particular Jenny (1941), han tratado de demostrar, sin lograrlo, que esos factores son independientes; esto es, que cada uno de ellos puede cambiar de un lugar a otro sin influencia de ninguno de los otros. Sin embargo, sólo el tiempo puede considerarse como una variable independiente, ya que los otros cuatro dependen, en mayor o menor grado, uno de otro, del suelo mismo o de algún otro factor como puede ser la acción del hombre. Jenny (op cit.) establece, con base en los trabajos de Dokuchaev (1883) en Rusia e Hilgard (1892) en Estados Unidos, la siguiente relación para explicar la génesis de un suelo de acuerdo a la acción dinámica de los factores ambientales:

$$S = f(cl, o, r, p, t) \qquad (1)$$

donde: cl = clima; o = organismos; r = relieve; p = material parental; t = tiempo

En esta Guía sólo se incluyen las características de los factores formadores de suelos de importancia para México, así como las de los suelos representativos formados bajo esas condiciones.

- ***El clima y los organismos***

Han sido considerados como factores activos o bioclimáticos, según Duchaufour (1977) y, según Fanning (1989), son "las fuerzas directrices que promueven los procesos que causan cambios en los suelos o en los ecosistemas durante el curso de la pedogénesis".

- ***El material parental***

En contraste con el clima y los organismos, éste ha sido considerado como un factor pasivo. Duchaufour (1977) lo define, junto con el relieve local y las condiciones de drenaje (medio "lixiviante o confinado"), como un factor estacional. No obstante, existen muchos suelos cuya génesis y propiedades han sido determinadas por la naturaleza del material parental, por ejemplo: las Rendzinas, los suelos de origen volcánico recientes, y los de origen antrópico.

- ***El relieve o topografía***

Modifica, entre otras cosas, la distribución de la humedad, además de determinar los patrones de erosión y eluviación. El clima y la distribución, tanto de los suelos como de la vegetación, están también íntimamente relacionados con las formas de relieve. Resulta congruente considerar que este factor influye en el efecto de los otros factores formadores del suelo.

- ***El tiempo***

Este factor ha sido definido por Fanning (1989) como el intervalo a través del cual se integra el efecto de los otros factores. Comúnmente, este intervalo comienza después de un evento catastrófico, propiciando el nacimiento de un suelo en un espacio determinado. Ejemplos de eventos catastróficos pueden ser glaciaciones, el emplazamiento de lava o de cenizas, la acumulación de materiales de origen antrópico, un cambio en el relieve que origine la exposición de depósitos o de una secuencia sedimentaria a la erosión. "El Tiempo Cero" ha sido definido como el momento en que el desarrollo de un suelo se inicia. Papadakis (1980) considera que la edad de un suelo es la misma que tiene la roca o material que lo originó, cuando ésta es sometida a la alteración pedogenética.

La acción del ***hombre*** puede ser considerada como un factor formador, ya que puede modificar la evolución natural de los suelos, ya sea directamente interviniendo de manera brusca al someter un suelo a cultivo, o bien, indirectamente de manera lenta y progresiva, al influir en la vegetación. Si la vegetación primaria es destruida progresivamente y sustituida por una vegetación secundaria, se da lugar a una transformación del suelo denominada "degradación". En ambos casos, el tipo de humus original se modifica, lo que genera un nuevo tipo de edafogénesis en el perfil del suelo. Es frecuente observar en México, que la deforestación sistemática de zonas templadas y tropicales, propicia la pérdida total del suelo por erosión hídrica y/o eólica.

4 FACTOR CLIMA

4.1 MARCO TEORICO

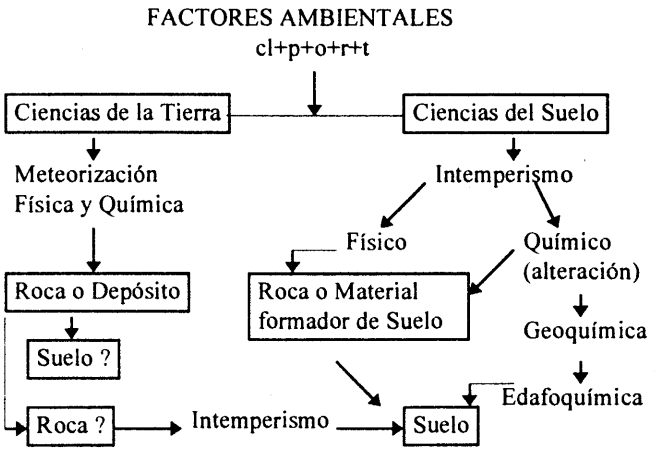
4.1.1 Interacción Atmósfera - Litósfera

Por definición, el clima es "el estado medio de la atmósfera, determinado a partir de datos recopilados durante un intervalo representativo de tiempo que generalmente, oscila de 30 a 50 años". El clima depende de tres elementos esenciales: presión, grado de humedad y temperatura del aire; y se caracteriza a través de dos parámetros: precipitación pluvial y temperatura. La primera corresponde a la cantidad de lluvia que se expresa como la altura de una capa de agua que se forma sobre un suelo completamente horizontal e impermeable, suponiendo que sobre dicha capa no se produzca ninguna evaporación. En tanto que la temperatura se refiere a la medida de la temperatura del aire en una caseta meteorológica de doble fondo, a una altura de 2 m y orientada al norte (Hemisferio Norte). Desde un punto de vista objetivo, se considera al Clima como el factor medioambiental que más influye en las características del suelo, a través de la precipitación pluvial y de la temperatura. Ambos parámetros actúan en conjunto y propician cambios físicos y químicos sobre los materiales de la superficie terrestre.

Al conjunto de cambios que se producen en las rocas y suelos se le ha denominado, según las diferentes escuelas, como meteorización, intemperismo o alteración (Figura 6). Aunque existe cierta anarquía en la utilización de estos términos, se pueden considerar las siguientes acepciones. El término ***meteorización*** se refiere, generalmente, al ataque físico, geoquímico y químico que sufren los materiales geológicos por influencia del medioambiente. En la Ciencia del Suelo, son de uso más común los términos ***intemperismo*** y alteración. El primero denota que, tantro la roca como el suelo que se está formando a partir de ella, han sufrido cambios físicos y químicos importantes en su naturaleza original, debido a la influencia de los agentes formadores de suelos. La ***alteración*** es un término supuestamente más específico, ya que sólo se refiere a los cambios químicos, bioquímicos y geoquímicos que se producen a lo largo del tiempo en los materiales constitutivos tanto orgánicos como inorgánicos de la roca y del suelo.

En esta Guía, la utilización del término intemperismo se refiere a la desintegración física y a la transformación química de la roca o material parental y del propio suelo. El término alteración solamente denota los cambios y transformaciones químicas y bioquímicas, tanto de la roca como de los minerales presentes en los diferentes horizontes del suelo, así como en la fracción orgánica de los mismos.

FIGURA 6: METEORIZACIÓN, INTEMPERISMO Y ALTERACIÓN



4.1.2 Intemperismo

El clima es, en ocasiones, determinante de la intensidad y velocidad de las transformaciones de rocas y suelos, así como de las características de los productos resultantes (Buol, 1990). El ***Intemperismo Físico*** (*mechanical weathering*) que predomina en climas secos, subpolares y polares, consiste en la ruptura y disgregación de las rocas y partículas minerales en partículas de menor tamaño como son las arenas y limos gruesos. Los agentes más comunes que propician este tipo de intemperismo son: (1) cambios bruscos de temperatura (termoclastía-exfoliación); (2) presión de las raíces de las plantas sobre las rocas (bioclastía); (3) congelamiento y expansión del agua en fisuras o fracturas contenidas en las rocas (crioclastía); (4) erosión (abrasión-deflación); y (5) crecimiento de cristales de sales depositadas en las rocas.

El ***Intemperismo Químico*** (*chemical weathering*) que es típico del clima caliente húmedo y templado húmedo, incluye la disgregación y ruptura de rocas y minerales generada por la actividad química, principalmente debida a la presencia de agua y elementos atmosféricos. Este tipo de intemperismo produce nuevos componentes minerales. La actividad química (alteración) puede presentar dos aspectos: el geoquímico y el edafoquímico.

- **Intemperismo geoquímico**. Está caracterizado por la alteración de los minerales primarios, que permite la eliminación progresiva de los cationes básicos (Ca^{++}, Mg^{++}, K^{+} y Na^{+}) y de la sílice, que es casi tan móvil como los anteriores (Tardy, 1969). Por otra parte, los óxidos de hierro y aluminio se acumulan permaneciendo casi en su totalidad. En medios muy lixiviantes, sobre todo en climas tropicales, la alteración es prácticamente total, mientras que en medios semiconfinados, con menor lixiviación (clima templado), la sílice y la alúmina se recombinan para formar arcillas.

La intemperización geoquímica se manifiesta bajo dos circunstancias:

a. Sin presencia del suelo. ("Tiempo Cero"). Su acción es directa sobre el material o roca que al descomponerse formará, a través del tiempo, un suelo (meteorización).

b. Con presencia del suelo. Se manifiesta en el subsuelo, principalmente en los horizontes C y R. Convencionalmente, se considera que la alteración geoquímica predomina después de los dos primeros metros de profundidad, o antes si existe una limitante lítica o paralítica. En este ámbito, las reacciones de oxidación y reducción son de mucha importancia. Sin embargo, la alteración geoquímica incluye también otras reacciones importantes como hidratación, hidrólisis, disolución y carbonatación.

- **Intemperismo Edafoquímico**. Tiene lugar en el momento en que la alteración geoquímica, a través de sus reacciones, actua sobre la roca o depósito inicial, constituyendo un "protosuelo" (material o roca intemperizada que se considera como un precursor del suelo). La alteración edafoquímica continúa con la desintegración y modificación química de los minerales primarios, hasta constituir minerales secundarios. Se caracteriza porque sólo se produce en el interior del suelo, principalmente en los horizontes A y B (c.f. Figura 1).

Es importante mencionar que las reacciones químicas del suelo, en presencia de agua, duplican su intensidad por cada 10°C que se incremente la temperatura (Indice Q_{10}). También cabe aclarar que ambos procesos, geoquímico y edafoquímico, siguen actuando durante toda la evolución del suelo. En ocasiones, los procesos geoquímicos interactuan con los procesos edafoquímicos y los procesos diagenéticos, resultando muy difícil establecer una división dinámica entre ellos. En la Parte III de esta Guía se amplía la información sobre los tipos de intemperismo geoquímico y edafoquímico.

La tabla 2 corresponde a una síntesis de los procesos de disgregación física y de alteración química y geoquímica ejercidos por los principales agentes de intemperismo de rocas y suelos.

4.2 CLIMA, GEOGRAFIA Y DINAMICA DE LOS PROCESOS DE INTEMPERISMO

FAO (1981) realizó un inventario climático dirigido a los países en vías de desarrollo. Este inventario, que forma parte del "FAO Agro-Ecological Zones Project" (FAO 1978-1981), trata de establecer parámetros climáticos para diferenciar zonas tropicales, subtropicales y templadas, con la finalidad de establecer métodos y técnicas de investigación básica, manejo y conservación de recursos específicos para cada zona.

TABLA 2: FACTORES CLIMATICOS COMO AGENTES DE INTEMPERISMO

I. Acción del calor solar y de las variaciones de temperatura.	1. Aumento de la temperatura del suelo y aceleración del ritmo de la descomposición (especialmente hidrólisis). 2. Calentamiento diferencial de las rocas de color específico diferente (disgregación diferencial). 3. Alternancias de calor y frío (termoclastía). 4. Fenómenos térmicos transmitidos por la atmósfera (véase II) y por las aguas pluviales (Véase III).
II. Acción de la atmósfera.	1. Rayo: acción de disgregación. 2. Acción oxidante (alteración) limitada a la capa superficial de las rocas. 3. Acción corrosiva del viento. 4. Acción de oxidación y de carbonatación ejercida por las aguas de lluvia.
III. Acción del Agua [lluvia]	1. Hielo: alternancias de calor y frío. 2. Acción disolvente. 3. Acción hidratante. 4. Acción hidrolizante. 5. Acción oxidante. 6. Acción carbonatante. 7. Acción catalizante.

Desde un punto de vista práctico, el estudio arriba mencionado se basó, en gran parte, en el reconocimiento de los siguientes factores, que son fundamentales para iniciar cualquier investigación de campo en donde se involucre el suelo.

- Tipo de clima.
- Temperaturas mínimas, medias y máximas.
- Precipitación media anual.
- Duración en meses de la época seca.
- Duración y frecuencia de los períodos de humedad excesiva.
- Agresividad climática.

Para las condiciones específicas de México, esta información puede ser obtenida a través de las siguientes fuentes documentales:

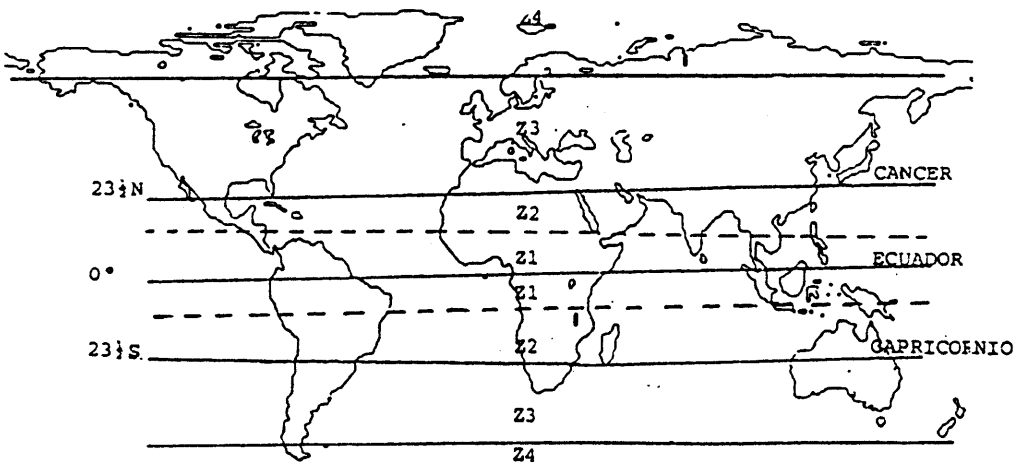
- García, Enriqueta, 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana): Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 246 p.
- FAO-PNUMA, 1980, Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 86 p.

- SARH, 1987, Instructivo para el análisis de la información agroclimática- Método de Sved-Eisenhart: México, D.F., Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaria de Desarrollo y Fomento Agropecuario y Forestal.

4.2.1 Clima y Distribución de los Minerales del Suelo

Los minerales arcillosos de los suelos cambian de modo predecible su naturaleza y comportamiento, a nivel mundial, con respecto a la distancia que guardan con el Ecuador (Figura 7). Uehara (1982) sostiene que en las áreas próximas al Ecuador, las altas temperaturas y abundantes precipitaciones favorecen la formación de arcillas cristalinas y no cristalinas de baja actividad (definida como la relación entre el índice de plasticidad y el porcentaje de arcilla) como son la Caolinita y los Oxidos, respectivamente. A medida que se incrementa la distancia hacia el Ecuador (más de 10° Latitud N, y más de 5° Latitud S) la precipitación decrece y se establece un clima tropical con dos estaciones (Latitud de 15° a 20°C en el hemisferio Norte y de 5^{0} a 10°C, en el Sur). Bajo estas condiciones, las arcillas esmectíticas de alta actividad predominan, desarrollándose Vertisoles y/o suelos con propiedades vérticas (suelos expansibles). Las características y condiciones de formación de los minerales arcillosos mencionados, se indican en la Parte III de esta Guía.

FIGURA 7: EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA **DISTRIBUCION DE MINERALES ARCILLOSOS**



Z1 ZONA ECUATORIAL. Trópico cálido-húmedo. Minerales dominantes: Caolinita -Gibbsita.

Z2 ZONA TROPICAL Y SUBTROPICAL. Con estaciones climáticas contrastantes. Mineral dominante: Esmectita.

Z3 ZONA TEMPLADA. Minerales dominantes: Haloisita, arcillas integradadas, Vermiculita.

Z4 ZONA FRIA. Minerales dominantes: Ilita-Clorita.

A continuación se describen, de manera general, los minerales arcillosos referidos en la figura 7 (las características detalladas se exponen en la parte III de esta Guía):

- CAOLINITA. Arcillas también llamadas minerales 1:1, compuestas por una capa de tetraedros de sílice formando una lámina y por una capa de octaedros de aluminio, con la cual comparten oxígenos.
- HALOISITA. Muestra características similares a la Caolinita pero, además, presenta hasta 4 moléculas de H_2O en su composición.
- GIBSITA. Oxido de Aluminio ($Al(OH)_3.4\ H_2O$)
- ESMECTITA. Se denominan arcillas 2:1 debido a que están constituidas por dos capas de tetraedros de sílice y una capa de octaedros de aluminio. La Montmorillonita es la representante más importante del grupo.
- ARCILLAS INTEGRADADAS. Arcillas que aún no muestran una estructura cristalina suficientemente desarrollada para ubicarla en un grupo mineralógico determinado.
- VERMICULITA. Se le conoce como una mica hidratada, y es precursora de la formación de Montmorillonitas.
- ILLITA. Primer mineral secundario derivado del intemperismo de las micas. Con frecuencia se muestra interestratificado, por lo que su composición química es muy variable.
- CLORITA Gran parte de estos minerales son heredados al suelo a partir de las rocas metamórficas e ígneas, aunque también puede sintetizarse en el suelo.

4.2.2 Indice de Weinert

Uno de los problemas a los que se enfrenta el investigador de las áreas de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, es la determinación de la influencia de la temperatura y la humedad en el intemperismo (meteorización) de las rocas. A este respecto, el índice propuesto por Weinert (1974) resulta útil, confiable y sencillo de manejar ya que, para su estimación, sólo se requiere de los datos de las medias mensuales de precipitación y temperatura, así como del cálculo del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite (explicado posteriormente en este mismo capítulo).

Para su estimación se requiere utilizar la siguiente fórmula:

$$N = 12\ Ej / Pa \qquad (2)$$

donde: N = Indice de Weinert,
Ej = * Evaporación durante junio, el mes más cálido en el hemisferio norte (mm).
Pa = Precipitación anual (mm).

* La evaporación se calcula utilizando el Sistema Thornthwaite (1948), descrito en esta Guía (inciso 4.4.1).

- Un valor de N=5 marca la transición de condiciones cálido subhúmedas (en las que el intemperismo químico predomina) a condiciones semiáridas cálidas y áridas (en las que el intemperismo físico es predominante).

- Cuando N<5, los suelos residuales se desarrollan normalmente, debido a que las condiciones climáticas permiten una alteración intensa, pudiendo alcanzar espesores de varios metros de profundidad.

- Cuando N>5, el espesor de los suelos residuales es menor (suelos delgados).

Por ejemplo, en Altar, Sonora, la evaporación durante el mes de junio excede los 150 mm, y la precipitación anual es de sólo 274 mm. Aplicando la fórmula 2 se obtiene.

$$N = \frac{12 \times 150 \text{ mm}}{274 \text{ mm}} = 6.57$$

Este valor indica la presencia de suelos residuales de poco espesor y desarrollo, que tienden a acumular sales, en donde predomina el intemperismo físico sobre el intemperismo químico.

En contraste, se tiene el caso de Villahermosa, Tabasco, en donde la evaporación registrada en junio es de 500 mm, y la precipitación anual es de 1918 mm. De acuerdo con la fórmula de Weinert (1974) se obtiene:

$$N = \frac{12 \times 500 \text{ mm}}{1918 \text{ mm}} = 3.13$$

El valor obtenido (3.13), sugiere la presencia de suelos residuales con un perfil de gran espesor, alta lixiviación, acumulación de hierro, aluminio y otros óxidos. Estos suelos, denominados "Suelos Tropicales", se caracterizan por el predominio del intemperismo químico y geoquímico sobre el intemperismo físico.

Para el caso de suelos tropicales de origen residual, con valores de N=<5, Blight (1990) considera que el clima tiene, además, un efecto determinante en el comportamiento físico y mecánico de las capas no saturadas.

4.2.3 Indice de Lixiviación

Existen, además, otros índices que permiten valorar cuantitativamente el grado de intemperismo químico (alteración) que actúa sobre rocas y suelos. Por ejemplo, el índice de lixiviación (Ln) llamado también "lluvia de lavado" (Papadakis, 1980) permite pronosticar las características físicas, químicas y mineralógicas de los suelos que se localizan en un lugar geográficamente determinado.

La fórmula es:

$$Ln = Ph - Eh + (Pa/10) \qquad (3).$$

donde: Ln = Indice de lixiviación [lluvia de lavado] (mm).
Ph = Lluvia durante la estación húmeda (mm).
Eh = Evapotranspiración potencial durante la misma estación (mm).
Pa = Lluvia anual (mm).

Por ejemplo: los índices de lixiviación para las ciudades de Querétaro, León, San Blas y Tapachula son de 84, 188, 1162 y 1852 mm, respectivamente. En estos sitios, la roca basáltica es común, sin embargo, debido a los diferentes índices de lixiviación que se presentan en cada ciudad, el grado de alteración de la roca y del suelo que de ésta se origina son muy diferentes. Así, en el caso de Querétaro y León, los índices bajos de lixiviación facilitan la formación de suelos arcillosos, ricos en esmectitas (suelos expansibles). En el caso de San Blas, este índice permite la formación de suelos ricos en arcillas de relación: 1:1 (Caolinita-Haloisita) no expansibles. Finalmente, en Tapachula, la roca basáltica sometida a un índice de lixiviación alto, generó suelos muy profundos, ricos en Caolinita y sesquióxidos.

Se debe tener en cuenta que el grado de lixiviación en el suelo depende también del drenaje. Si no hay drenaje no hay lixiviación o ésta se limita a los horizontes superiores. Además, es necesario conocer el tipo del material que dió origen al suelo, ya que dependiendo de la naturaleza mineralógica de éste, serán los productos resultantes del intemperismo. Una roca pobre en cationes básicos, proporcionará al suelo escasos elementos, aún cuando el índice de lixiviación sea alto.

4.2.4 Indice de Alteración

Existe también un índice de alteración específico para las rocas (intemperismo químico). Su fórmula es:

$$AL = T\,Ln/10^2 \qquad (4)$$

donde: AL = Indice de alteración.
T = Temperatura máxima media anual (°C).
Ln = Lluvia de lavado (mm).

En este caso, los valores de alteración calculados para las cuatro ciudades citadas en el ejemplo anterior son: 21, 51, 329 y 600 respectivamente. Como se puede observar, el valor de alteración que se presenta en Tapachula, es casi 30 veces mayor al que se presenta en Querétaro.

4.3 CLIMAS EN MEXICO

4.3.1 Tipos de Climas

Con base en García (1988) las características y distribución de climas en México son las siguientes:

4.3.1.1 Grupo de climas A

Este grupo comprende a los climas calientes húmedos, con temperatura media mayor de 18°C, en el mes más frío. Se extienden a lo largo de las vertientes mexicanas de ambos océanos. En el Pacífico, desde el paralelo 24°N hacia el sur, abarcando desde el nivel del mar hasta una altitud de 800 a 1200 m. Por el norte, se internan desde la base de la Sierra Madre Occidental, hasta el paralelo 26°N.

Por el lado del Golfo de México, comprenden desde el paralelo 23°N hacia el sur, a lo largo de la llanura costera y de la base de los declives de la Sierra Madre Oriental y de las montañas del norte de Chiapas. Se encuentran, también, en la mayor parte de la Península de Yucatán, Cuenca de Balsas y la Depresión Central de Chiapas, en donde se extienden hasta altitudes de 1300 m.

Los climas A comprenden tres tipos principales:

- Af, caliente, húmedo con lluvias todo el año.
- Am, caliente húmedo con lluvias en verano.
- Aw, caliente subhúmedo con lluvias en verano.

Utilizando la información de la figura 8, se puede inferir la distribución de los diferentes tipos de climas A en México:

- Las zonas con clima **Af** se sitúan al Sur del paralelo 20°N, a lo largo del declive Este de la Sierra Madre Oriental, y a lo largo del pie septentrional de las montañas del norte de Chiapas.

- Las zonas con clima **Am** corresponden a los lugares húmedos situados al sur del Trópico de Cáncer. Se localizan, también, en la llanura tabasqueña, en la base del declive Este de la Sierra Madre Oriental, al sur del paralelo 22°N, y en el declive del Pacífico de la porción sureste de la Sierra Madre de Chiapas.

FIGURA 8. REGIONES DE SUELOS Y ZONAS CLIMÁTICAS

OBSERVACIONES

Se muestran, los tipos climáticos que se tienen en las tres grandes zonas climáticas de México:

- Semiárida a muy árida. Incluye los climas Bw, BS y CS.
- Subhúmedas. Comprende los tipos climáticos Cf, Cw y Aw.
- Húmeda. Agrupa los climas Af, y Am.

Las Regiones de Suelos representadas en ésta figura están determinadas, en gran parte, por las zonas climáticas.

- Las zonas con clima **Aw** se extienden a lo largo de la vertiente del Pacífico, desde el paralelo 24°N hacia el sur, y abarcan desde el nivel del mar hasta una altitud de 800 a 1000m. Por el norte, se internan desde la base de la Sierra Madre Occidental hasta los 26° de latitud Norte. Por el lado del Golfo de México se les encuentra al Sur del paralelo 23°N; en algunas de las partes más bajas de la llanura costera del Golfo y, también, en la mayor parte de la Península de Yucatán, así como en algunas zonas interiores tales como la cuenca del Balsas y la Depresión Central de Chiapas.

4.3.1.2 Grupo de climas B, Secos

Debido a la situación de México con respecto a la zona subtropical de alta presión, y a la orientación general de sus principales formaciones montañosas, existen en el territorio, especialmente en su porción septentrional, amplias zonas con climas muy secos o desérticos y con climas secos o esteparios.

- *Climas muy secos **BW**.* Se localizan en la parte norte de la Altiplanicie Mexicana a una altitud menor a 1500 m, así como en la porción de la llanura costera del Pacífico situada al norte del paralelo 25°N, y en las zonas litorales de la Península de Baja California, exceptuando el extremo noroeste en donde el clima es BS (Figura 8).

- *Climas secos o esteparios **BS**.* Se encuentran bordeando a los climas BW en la parte Norte de la Altiplanicie, así como en los declives de la Sierra Madre Occidental que se elevan de la llanura costera del Golfo de California, en la porción central y noroeste de la Península de la Baja California, y en la parte norte de la Llanura Costera del Golfo de México. Se extienden, además, en las zonas interiores del centro y sur del país, en donde se encuentran menos expuestos a la acción de los vientos húmedos del mar, por ejemplo: parte sur de la Altiplanicie y partes más bajas de la Cuenca del Balsas, región de la Mixteca y extremo noroeste de la Península de Yucatán (Figura 8).

4.3.1.3 Grupo de climas C

Corresponde a los climas templado húmedos, con temperatura media del mes más frío entre 3 y 18°C, y la del mes más caliente mayor de 10°C. En este grupo estan incluidos los climas denominados semifríos.

En México, según García (1988), este grupo de climas se localiza en las áreas montañosas cuya altitud es menor a 4000 m, o en mesetas de altitudes de 800 a 1000 m. En estos lugares, la temperatura media de un mes, generalmente es inferior a 18°C. Köppen (1948) divide los climas en tres tipos principales que son:

- *Clima **Cf**.* Templado húmedo, con lluvias todo el año. Muy pocas estaciones resultan con clima Cf en México. Estas estaciones se localizan en las vertientes del Atlántico de la Sierra Madre Oriental y en las montañas del Norte de Chiapas (Figura 8).

- *Clima **Cw**.* Templado subhúmedo, con lluvias en verano. Se localiza en la mayor parte de las montañas del centro y sur de México y en la porción sur de la Altiplanicie Mexicana (Figura 8).

- *Clima **CS**.* Templado húmedo, con lluvias en invierno (clima mediterráneo). Se localiza únicamente en una especie de cuña que se extiende de Norte a Sur sobre la parte más alta de las sierras del norte de Baja California, Sierras de Juárez y de San Pedro Mártir; (Figura 8).

4.3.1.4 Grupo de climas E, Fríos

Se caracterizan porque la temperatura media del mes más caliente es menor de 10°C. Se localizan en altitudes superiores a 4000 m (por su escasa extensión estos climas no pueden ser presentados en el mapa de la figura 8). Hay dos tipos de clima frío E:

- *Tipo climático **ET**.* Cuando la temperatura del mes más caliente está comprendida entre 0 y 10°C. En este clima, hay una breve estación de crecimiento de algunas plantas como helechos, líquenes y musgos.

- *Tipo climático **EF**.* La temperatura media de todos los meses se conserva por debajo de 0°C. Debido a esto, el terreno permanece cubierto de nieve durante todo el año y no hay ninguna vegetación.

Como se observa en el mapa de la figura 8, en amplias zonas del territorio nacional están representados los grupos de climas A, B y C de Köppen. Los climas D no existen (García, 1988) y los climas E se encuentran sólo en áreas reducidas a las montañas de altitud superior a los 4000 m.

4.4 CLIMA DEL SUELO O EDAFOCLIMA

El suelo es un sistema natural organizado, cuyas características están íntimamente relacionadas con las condiciones del medio ambiente. Sin embargo, las condiciones ambientales que se presentan en su interior, no son necesariamente las mismas que las del medio externo. Es por ello que resulta esencial comprender lo que ocurre en el suelo a través del concepto de edafoclima o clima del suelo, el cual está representado por el régimen de humedad y temperatura presentes en el mismo.

La importancia de definir ambos regímenes se debe a que, en la taxonomía de suelos actual, cada unidad de suelo toma un nombre diferente, de acuerdo al edafoclima que se presente. Asimismo, para las interpretaciones genéticas es esencial establecerlo, con el fin de contar con interpretaciones más confiables. De hecho, las condiciones de humedad son una parte esencial en la historia de un suelo. El contenido de agua está directamente asociado a la génesis del suelo y determina muchas de sus características, ya que el agua puede remover materiales solubles, permitir la acumulación de sales y dirigir la distribución de la materia orgánica, entre otros procesos.

4.4.1 Cálculo del Balance de Agua en el Suelo. Método de Thornwhaite (1948)

Este método consiste en tomar los valores promedio mensuales de temperatura y precipitación procedentes de las estaciones climatológicas para, a partir de ellos, calcular los valores de evapotranspiración, deficiencia, demasía y humedad del suelo con los que, a su vez, se obtienen los índices necesarios para establecer la fórmula climática. Los cálculos que se efectúan son los siguientes:

1. Indice de calor mensual (i_n):

$$i_n = (T/5)^{1.514} \qquad (5)$$

donde: T= temperatura media mensual (°C).

2. Evapotranspiración potencial mensual sin corregir (EP'):

$$EP' = 1.6\,(10T / I)^{a} \qquad (6)$$

donde:

I = índice de calor anual ($\sum i_n$)

$a = [(6.76\text{x}10^{-7})\, I^3 - (7.71\text{x}10^{-5})\, I^2 + (17.92\text{x}10^{-3})\, I + 0.49289]$

3. Evapotranspiración potencial (EP):

$$EP = EP' \text{ x } F \qquad (7)$$

donde F es un factor de corrección por latitud (obtenido a partir de tablas).

4. Movimiento de humedad en el suelo (MHS):

$$\text{Si } EP>P \rightarrow MHS = 0 \qquad (8)$$
$$\text{Si } EP<P \rightarrow MHS = P - EP$$

donde: P = Precipitación media mensual (cm),
MHS representa la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

5. Humedad almacenada en el suelo (HA), al final de cada mes:

$$HA_n = HA_{n-1} + \sum MHS \text{ del mes correspondiente} \qquad (9)$$

Nota: el valor máximo de MHS debe ser siempre 10 cm (valor obtenido experimentalmente).

6. Demasía de agua (s): $s_m = |P-EP|-|MHS|$ (10)

donde: s_m es la demasía de agua mensual y:

s_{an} es la demasía de agua anual, $s_{an} = \sum s_m$

7. Deficiencia de agua (d): $d = EP-EPR$ (11)

donde EPR es la evapotranspiración real:

$EPR = EP$ cuando $P>EP$
$EPR = P+MHS$ cuando $P<EP$

8. Escurrimiento mensual (E_n): $E_n = (s_m / 2) + (E_{n-1} / 2)$ (12)

(el valor mínimo de este parámetro debe ser 10 cm, según los cálculos de laboratorio).

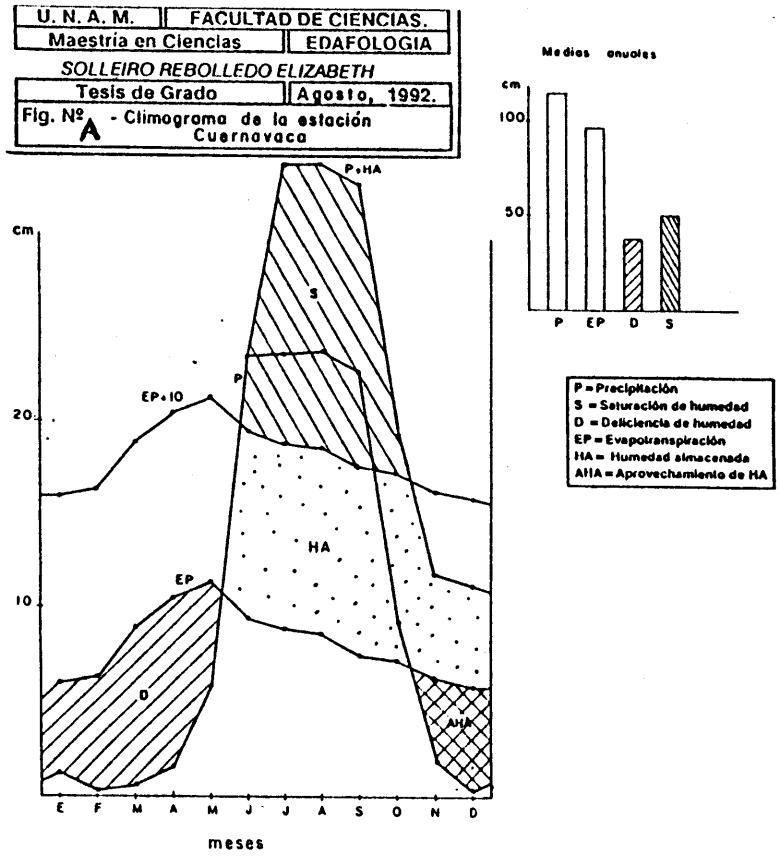
9. Relación pluvial (RP): $RP = (P-EP)/EP$ (mm) (13)

Los cálculos anteriores permiten la construcción de un diagrama de balance hídrico que, en este caso, llamaremos **"Climograma"** donde, fácilmente, es posible observar las áreas que corresponden con los períodos de saturación de humedad, los de déficit de humedad, los de movimientos de agua en el suelo y los de almacenamiento (Figura 9: A,B,C). En el Climograma se grafican, en el eje horizontal, los meses del año y, en el vertical, la precipitación media mensual, la evapotranspiración media mensual, la evapotranspiración más 10 y la precipitación más la humedad almacenada calculados en cm.

- El área comprendida entre la curva de precipitación y la de evapotranspiración corresponde al ***período de deficiencia de humedad***;
- El área localizada entre la curva de evapotranspiración, la curva de evapotranspiración más 10 y la de precipitación más la humedad almacenada se refiere al ***periodo en el que el agua se almacena en el suelo***;
- La zona ubicada entre la línea de evapotranspiración más 10 y la precipitación más humedad almacenada corresponde al periodo del año en el que el suelo está ***saturado***;
- El área comprendida entre las líneas de precipitación, precipitación más humedad almacenada, por debajo de la evapotranspiración es la correspondiente al período en el que el agua almacenada puede ser ***aprovechada por las plantas***.

Como ejemplo, se presentan los cálculos correspondientes y climogramas de las estaciones climatológicas Cuernavaca, Temixco y Tres Cruces (Figura 9: A, B y C).

FIGURA 9. BALANCE DEL AGUA EN EL SUELO: REGIMEN DE HUMEDAD



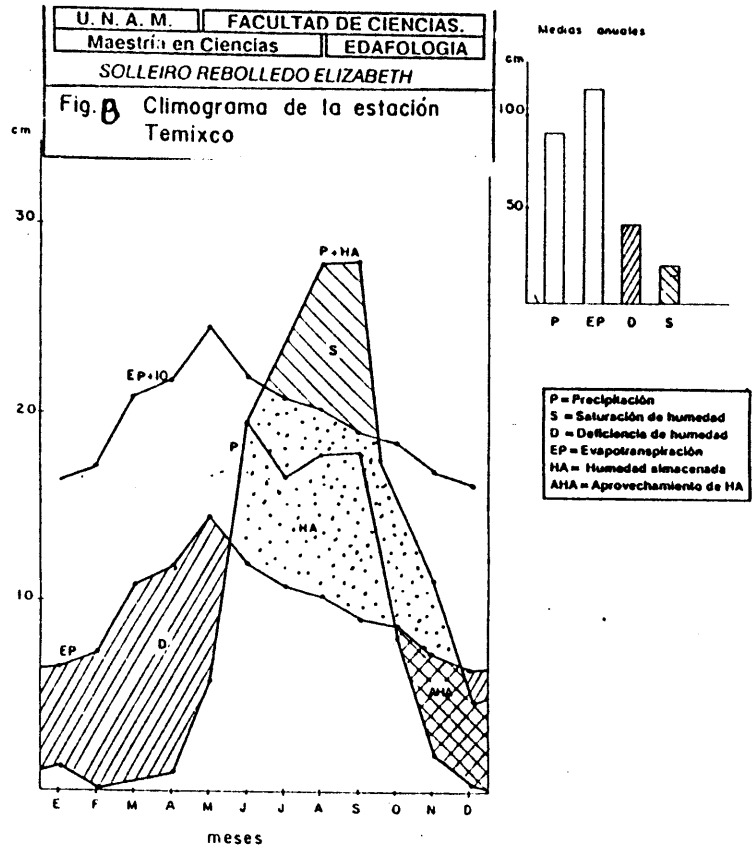
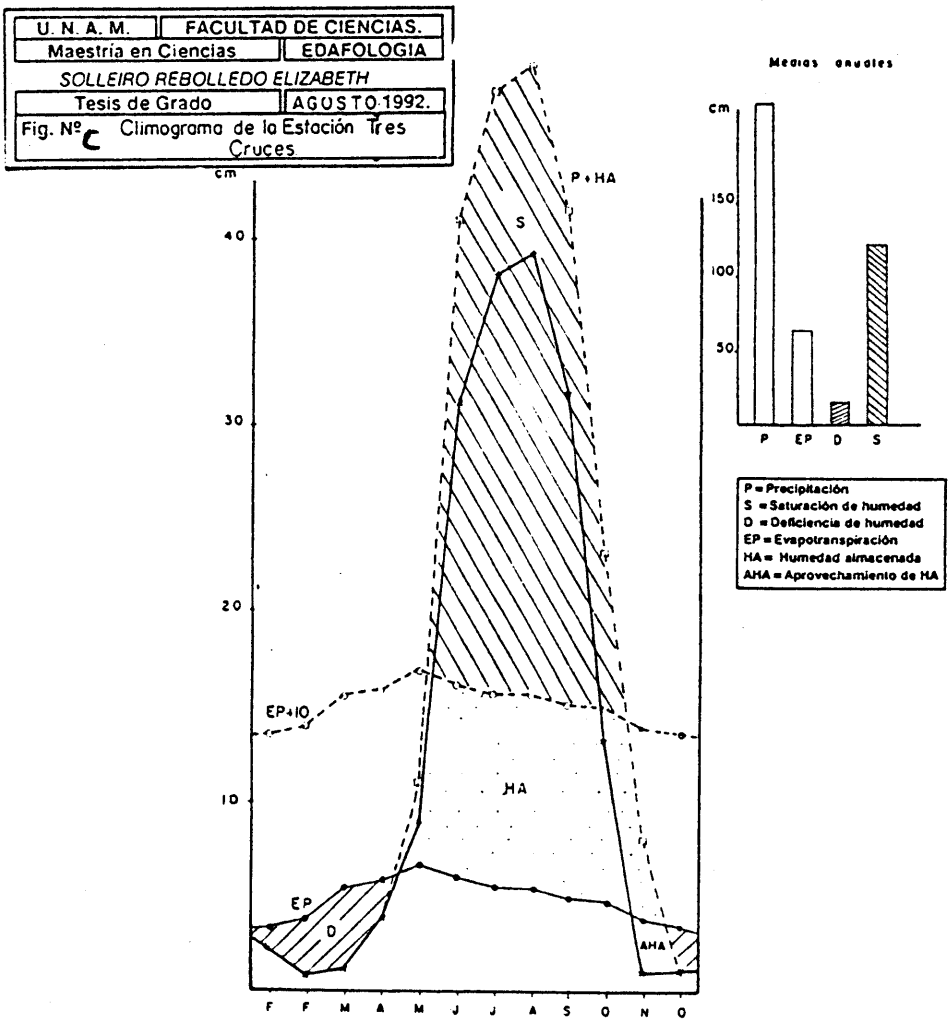


FIGURA 9. BALANCE DEL AGUA EN EL SUELO: REGIMEN DE HUMEDAD



4.4.2 Regímenes de Humedad del Suelo (USDA, 1990)

Los regímenes de humedad del suelo se refieren a la presencia o ausencia de agua subterránea, a una tensión menor de 15 Bares, en la parte media del perfil de una unidad de suelo. Se considera este límite de valor debido a que las plantas mesófitas no pueden sobrevivir a tensiones mayores de 15 Bares, la cual sería resultante de la resequedad del suelo o de la acumulación de sales. Para determinar el tipo de régimen de humedad, es necesario establecer el balance de agua en el suelo, el cual se puede obtener a través del método de Thornwhaite (1948), que permite obtener las pérdidas y ganancias de humedad a lo largo del año. Al analizar los climogramas resultantes (Figura 9: A,B,C), se determina la cantidad de días en que el suelo permanece seco a lo largo del año. Con esta base, se han definido las siguientes clases de regímenes de humedad.

4.4.2.1 Régimen de humedad ácuico

Generalmente, cuando el suelo está saturado con agua la mayor parte del año, en consecuencia, los contenidos de oxígeno son reducidos o nulos, de tal manera que predominan las condiciones de reducción. Un ejemplo de suelos formados bajo estas condiciones son los Gleysoles (c.f. Figura 5A). Las características de estos suelos y de su medio ambiente se encuentran en la tabla 1. Algunos Gleysoles muestran contenidos altos de azufre (0.75% o más) como es el caso de los Gleysoles tiónicos. Cuando se hacen obras de drenaje en estos suelos, el oxigeno oxida al azufre y se llega a formar ácido sulfúrico ("suelo corrosivo").

4.4.2.2 Regímenes de humedad arídico y tórrico

Corresponden a suelos que permanecen secos durante más del 50% de la estación de crecimiento de los cultivos, o bien, cuando nunca están húmedos por más de 90 días consecutivos al año. En esos regímenes hay poca lixiviación, de ordinario, predomina la evaporación y se presenta la acumulación de sales solubles. Ejemplos de suelos formados bajo estos regímenes de humedad son los Solonchaks, Solonetz (suelos salinos y sódicos), los Calcisoles y los Gypsisoles (c.f. Figura 5D). Ambos regímenes, son comunes de los climas áridos, tipo B aunque, bajo condiciones locales específicas, pueden presentarse en climas templados tipo C.

4.4.2.3 Régimen de humedad údico

Se presenta en los suelos que no están secos por un período mayor de 90 días consecutivos al año. Estos suelos se forman en climas húmedos, tipo A, con lluvia bien distribuida en el verano, que exceda a la evapotranspiración, suficiente para sostener cultivos sin necesidad de riego. Los suelos formados bajo este régimen son, en su mayoría, suelos residuales bien desarrollados, aunque con pH ácido debido a que han sido lixiviados. La mayoría de los suelos denominados como "suelos tropicales" se presenta en este régimen. También es común en suelos de zonas cálido húmedas, tipo A, o de zonas templado húmedas, tipo C_f.

4.4.2.4 Régimen de humedad ústico

Corresponde a suelos que tienen una cantidad limitada de humedad, pero suficiente durante la estación de crecimiento de los cultivos. En los trópicos, este régimen de humedad se presenta principalmente en los climas templados, tipo Cw. Es uno de los regímenes de suelos más comunes en México.

4.4.2.5 Régimen de humedad xérico

Se presenta en suelos que permanecen secos durante 45 o más días consecutivos después del solsticio de verano y húmedos después del solsticio de invierno (Julio-Diciembre), es decir, durante la estación húmeda. Este régimen de humedad del suelo se presenta en los climas mediterráneos.

Como ejemplo de regímenes de humedad údico, ústico y xérico, se presentan los cálculos correspondientes y climogramas de las estaciones meteorológicas de: Tres Cruces, Cuernavaca y Temixco (Figura 9: A, B y C). Como ejercicio, se sugiere realizar los cálculos con las fórmulas propuestas en el método de Thornwhaite (Anexo 3).

OBSERVACIÓN:

1. En el Atlas Nacional de México, editado por el Instituto de Geografía, UNAM, se presenta una carta que muestra la distribución de los regímenes de humedad de suelo típicos para México.

4.4.3 Regímenes de Temperatura del Suelo

La importancia que tiene la definición de los regímenes de temperatura radica en que un gran número de procesos que suceden en el suelo, se ven favorecidos o atenuados por la acción de la temperatura. De hecho, se sabe que la degradación de la materia orgánica aumenta en un orden de 1.5 veces al aumentar la temperatura del suelo en 5°C. Por otro lado, existe el coeficiente Q_{10} que señala el incremento en la tasa de una reacción química, al aumentar la temperatura en 10°C (Shoji et al., 1993).

4.4.3.1 Régimen de temperatura pergélico

Relativo a suelos con una temperatura media anual menor a 0°C que, por lo común, están congelados en su parte superior durante el invierno. Bajo estas condiciones, los procesos de formación de suelo son pocos, principalmente los de carácter biológico.

4.4.3.2 Régimen de temperatura cryico

Es el caso de suelos que tienen una temperatura media anual de 0 a 8°C y que, por lo general, están congelados en su parte superior durante el invierno. Bajo estas condiciones, los procesos formadores actúan, sobre todo, en las épocas en las que el suelo se descongela.

4.4.3.3 Régimen de temperatura frígido

Corresponde a suelos que tienen una temperatura media anual menor a 8°C, pero con temperaturas más elevadas en el verano que en el régimen cryico, de tal manera, que la diferencia entre la temperatura media del suelo del invierno y la del verano es mayor que 5°C y, por lo mismo, los procesos de formación actúan con mayor intensidad.

4.4.3.4 Régimen de temperatura mésico

Relativo a suelos con temperatura media anual de 8 a 15°C, en los que la diferencia entre la temperatura media del verano y la del invierno es mayor a 5°C. En este tipo de régimen de temperatura, los procesos son más intensos, se presenta degradación de la materia orgánica, procesos asociados a la alteración de minerales primarios y neoformación de arcillas.

4.4.3.5 Régimen de temperatura térmico

Ocurre cuando la temperatura media anual del suelo es de 15 a 22°C y la diferencia entre la temperatura media del verano y la del invierno es mayor a 5°C. Este régimen implica una mayor intensidad y velocidad de los procesos formadores.

4.4.3.6 Régimen de temperatura hipertérmico

Se presenta cuando la temperatura media anual del suelo es de 22°C o mayor, y la diferencia entre la temperatura media del suelo del verano y del invierno es mayor a 5°C. En este caso, los procesos actúan a una velocidad mayor que en el resto de los regímenes de temperatura.

OBSERVACION:

1. A la palabra que define el régimen de la temperatura del suelo se le puede anteponer el prefijo iso para indicar que la diferencia entre las temperatura media del suelo del verano e invierno es menor a 5°C

5 MATERIAL PARENTAL

Se denomina material parental o material inicial del suelo, a la roca o depósito estabilizado y no necesariamente consolidado que, al intemperizarse a través del tiempo, origina un suelo. Una masa de roca, un aluvión o coluvión estabilizado o, incluso, un depósito orgánico estabilizado pueden constituir, al alterarse, el material parental de un suelo. El intemperismo o mecanismo a través del cual las rocas se alteran produce disgregación, descomposición y destrucción de los minerales originales (minerales primarios) y da lugar a la formación de compuestos secundarios constituyentes de los suelos. Diferentes aspectos del intemperismo, como factor formador de suelos, son desarrollados en la parte III de esta Guía.

El material parental es uno de los factores formadores de suelo más importante, orientando tanto al tipo de mecanismos o procesos de intemperismo y alteración, como a la velocidad con que éstos ocurren. En general, cuanto más joven sea un suelo, (como es el caso de los Andosoles), tanto mayor será la influencia y su relación con el material original. Conforme se llevan a cabo los procesos edafogénicos y de intemperización, la influencia de los materiales originales tiene, cada vez, un valor más bajo. En los suelos antiguos geomorfológicamente estables y extremadamente intemperizados (suelos del trópico cálido-húmedo) hay relativamente poca influencia del material inicial, a menos que tengan una composición "extrema", como la de la arena de cuarzo ya que, al ser éste un mineral altamente resistente al intemperismo, puede permanecer prácticamente inalterado y constituir Arenosoles o Regosoles. Así, lo que se debe describir, es la naturaleza del material inicial y el efecto de los factores ambientales dinámicos, sobre el material original de dicho suelo. Ese tipo de estudios son difíciles de realizar en México, debido a la historia ambiental compleja de muchos suelos (cambios climáticos y de vegetación en el pasado geológico).

5.1 CLASIFICACIONES PARA EL MATERIAL PARENTAL

Brewer (1964) sugirió un método para la clasificación de los materiales parentales. En esta clasificación, el autor no se propone dar una definición clara y precisa acerca de los materiales originales, sino que constituye un intento de clasificación según el potencial de los materiales, Por otra parte, Fitz Patrick (1987) propone una clasificación basada en las características intrínsecas, significativas y fácilmente reconocibles, utilizando un sistema de símbolos (letras) para designar al material parental en el campo y en los informes. De manera general, los materiales parentales son clasificados en nueve clases, según su composición química y mineralógica, reconociéndose: cinco clases establecidas con base en las proporciones de minerales ferromagnésicos; una clase según el contenido de carbonatos; la séptima y la octava se establecen de acuerdo al contenido de sales, y la novena por el contenido de materia orgánica.
Esta última clasificación puede presentar muchos problemas, ya que emplea una terminología poco clara que contradice, en parte, aquélla usada en Geología.

Por lo mismo, se considera conveniente usar una clasificación geológica simplificada tanto para rocas como para depósitos no consolidados.

5.1.1 Rocas Igneas

Las clasificaciones de rocas ígneas pueden estar basadas en diferentes criterios como: el modo de emplazamiento, tamaño de los cristales o ausencia de los mismos y la composición mineralógica y/o química. El modo de emplazamiento condiciona, en gran parte, su estructura. Si el enfriamiento del magma original es rápido (rocas extrusivas como las lavas), los cristales no tienen tiempo de formarse y la roca presenta estructura vítrea o afanítica (de grano muy fino). Por el contrario, si el enfriamiento es lo suficientemente lento (rocas intrusivas o plutónicas) los cristales se forman en su totalidad, y presentan una estructura granulada. Existen situaciones intermedias en las que se forman microcristales. Así, para una misma composición química, se dan diferentes nombres a las rocas de acuerdo a su estructura. En lo que concierne a la composición mineralógica de estas rocas, se distinguen dos grandes grupos: acidas, si hay exceso de SiO_2, o básicas en ausencia del mismo. Estos grupos se dividen, a su vez, en familias de acuerdo a la naturaleza de los feldespatos (silicoaluminatos) presentes: potásicos, sódico-cálcicos (plagioclasas), feldespatoides (parecidos a los feldespatos pero menos ricos en sílice), y los minerales ferromagnésicos (olivino, anfiboles, piroxenos, micas, etc.).

En la Tabla 3, se presenta una clasificación simplificada de rocas ígneas de acuerdo a su composición química. En resaltado negro se observan las rocas intrusivas, generalmente de grano medio a grueso (granuladas) y, por encima de éstas, su equivalente extrusivo, de grano fino (afaníticas). En esta Tabla, no se específica la composición de los materiales vítreos y de los materiales piroclásticos, debido a que su clasificación requiere de análisis químicos específicos a cada material.

TABLA 3: TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS IGNEAS

	Minerales Predominantes			
Estructura (Tamaño de grano)	Feldespato y Cuarzo	Feldespatos (sin Cuarzo)	Ferromagnésicos y Feldespatos (sin Cuarzo)	Ferromagnésicos (sin Cuarzo y sin Feldespatos)
Piroclástica	Tobas (< 4 mm) y Brechas (> 4 mm) Volcánicas			
Vítrea	Obsidiana (vidrio compacto) Pómez (vidrio esponjoso)		Vidrios basálticos	
Afanítica	Riolitas, Dacitas	Andesitas	Basaltos	
Granulada	**Granitos** **Granodioritas**	**Dioritas**	**Gabros**	**Peridotitas** **Piroxenitas** **Serpentinitas**
Tipo	Acidas	Intermedias	Básicas	Ultrabásicas
	← Aumenta el contenido de Sílice ←			

5.1.2 Rocas Sedimentarias

Esta rocas son formadas en la superficie terrestre y constituyen, aproximadamente, el 75 % de la misma. Existe una amplia variedad de este tipo de rocas y son numerosos los factores que condicionan su formación, entre estos están la naturaleza inicial de los materiales disgregados y alterados; el tipo de alteración; el medio de transporte; la zona de depósito; variaciones en la diagénesis (procesos que transforman un depósito sedimentario en roca). En su mayor parte, forman depósitos estratificados. De este tipo de roca se distinguen los siguientes grupos principales:

1. ***Rocas detríticas.*** Consisten en acumulaciones de fragmentos de rocas preexistentes, comúnmente, unidos entre ellos por un cementante químico (generalmente $CaCO_3$) o bioquímico. Este grupo incluye a los terrígenos (fragmentos poco más o menos cementados) como aglomerados, conglomerados, areniscas, limos, loess, entre otros; etc., y a los depósitos piroclásticos (cenizas, tobas, y lapillis).

1. ***Rocas biogénicas y/o físico-químicas.*** Son la resultante de procesos químicos que alcanzaron su equilibrio a las condiciones de temperatura y presión de la superficie. Este grupo incluye a las rocas carbonatadas (formadas principalmente por calcita, aragonita o dolomita) ya sean bioclásticas (por la acumulación de esqueletos o de fragmentos de organismos), o físico-químicas (por precipitación de carbonatos); entre otras rocas bioclásticas se tiene a las silíceas como la diatomita; carbonosas como la turba y el lignito; salinas que son, en su mayor parte, las evaporíticas (halita, yeso, anhidríta, etc.); fosfatadas y, finalmente, las rocas formadas por minerales sedimentarios de hierro y aluminio (bauxita, glauconita).

En la tabla 4 se presentan algunas rocas sedimentarias, pertenecientes a los grupos antes mencionados, denominadas de acuerdo al tamaño de los elementos que las constituyen.

TABLA 4 : TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS SEDIMENTARIAS

Origen	Textura	Tamaño de partícula o composición	Nombre de la roca
Detrítico	Clástica	Grava (> 2 mm) Arena (1/16 a 2 mm) Limo (< 1/16 mm o 62.5 μm) Arcilla (<1/256 mm o 3.9 μm)	Conglomerado Arenisca Lodolita, limolita Lutita
Químico Bioquímico	Cristalina o micrítica (lodo calcáreo)	Calcita ($CaCO_3$) Dolomita ($CaMg\ CO_3$) Halita (NaCl) Yeso ($CaSO_4.2H_2O$)	Caliza Dolomita Sal Yeso

5.1.3 Rocas Metamórficas

Este tipo de rocas se forman a partir de rocas preexistentes (ya sea ígneas, sedimentarias o metamórficas) por recristalizaciones debidas al aumento de la temperatura y de la presión, generalmente, sin pasar por la fusión del material. Estas rocas presentan minerales neoformados y estructuras muy peculiares que reflejan condiciones de formación físico-químicas diferentes a las de la roca original. La clasificación de este tipo de rocas es compleja, ya que intervienen en ella tanto las características de la roca original como el tipo de metamorfismo actuante, el cual puede presentarse en varios grados de acuerdo a las variaciones de presión y temperatura. En la Tabla 5 se enlistan los nombres de algunas rocas metamórficas importantes.

TABLA 5 : TIPOS PRINCIPALES DE ROCAS METAMORFICAS

Estructura	Minerales Principales	Roca
Paralela (en bandas o capas)	Feldespato, cuarzo, otros minerales silicatados Silicatos de grano fino	Gneiss Esquisto Pizarra
Masiva	Feldespatos y otros minerales Cuarzo Calcita y dolomita Serpentina Talco Arcilla Hornblenda Piroxeno y granate	Granulita Cuarcita Mármol Serpentinita Soapstone Esquisto Anfibolita Eclogita

OBSERVACION:

1. En el Anexo 4 de esta Guía se presenta una clave simplificada para la identificación, en campo, de las rocas más comunes.

5.1.4 Depósitos Formadores de Suelo

En términos generales, un depósito consiste de la acumulación de partículas (sedimentos) o substancias sobre un sustrato. Se le llama depósito superficial no consolidado o formaciones superficiales, a las acumulaciones cuaternarias continentales. Estos materiales se caracterizan por tener diferentes distribuciones granulométricas, las cuales dependen de la composición de las partículas y del medio de transporte. La forma de las partículas (angulosidad) es, también, función de la distancia recorrida. En la tabla 6 se presentan los tipos principales de ambientes de depósito, así como las características de los mismos.

TABLA 6 : TIPOS PRINCIPALES DE DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS

Ambiente de depósito	Tipo de depósito	Características generales
Ríos	Depósitos aluviales	Sedimentos retrabajados de diferentes tamaños, dependiendo del lugar de depósito a lo largo del río (llanura de inundación, terraza aluvial, lecho del río).
Glacial	Depósitos glaciales (morrenas, eskers o drumlins)	Sedimentos de diferente tamaño y composición, dependiendo de la fuente y de su posición con respecto a la dirección de desplazamiento del glaciar: brechas, gravas y arenas.
Lagos	Depósitos lacustres	Depósitos ricos en minerales cristalinos (de tamaño <2 micras) y materia orgánica. Suelen alternar con capas de material arenoso y limoso.
Eólico	Depósitos de loess	Sedimentos clásticos cuarzosos o feldespáticos. Poseen grandes cantidades de arena fina y limo .
Gravitacional	Depósitos de talud	Depósitos suelo/roca localizados en los taludes de las montañas, de estructura suelta y pobre clasificación.
Llanuras costeras	Dunas Depósitos de playas	Depósitos principalmente arenosos y, en ocasiones, limosos, originados por transporte eólico.
Marino	Depósitos marinos	Formados por precipitación de sedimentos.
Volcánico	Depósitos volcánicos (piroclastos)	Cenizas, piroclastos, tefras y otros materiales volcánicos.

5.2 DIAGNOSIS DEL SUELO EN FUNCION DEL MATERIAL PARENTAL

5.2.1 Unidades de Suelos de México formados a partir de Rocas

5.2.1.1 Suelos formados a partir de rocas sedimentarias

a. Calizas y Dolomías

La unidad de suelo formado se relaciona con el tipo predominante de "impurezas" presentes en estas rocas. Si las calizas están "sucias" (ricas en arcilla), el resultado son los suelos arcillosos e impermeables como las Rendzinas (Leptosoles rendzicos), algunos Vertisoles (calcáricos) y Luvisoles cálcicos y vérticos. Debido al indice, normalmente bajo, de lixiviación en suelos densos como los arriba indicados, frecuentemente, tanto su pH como la saturación de bases son altos.

Si la caliza es rica en arena y en granos de silicio amorfo o microcristalino, los suelos tienden a ser de marga gruesa, ácidos y con un contenido bajo de bases. Este es el caso de algunos Acrisoles, Alisoles y Ferralsoles, en los que se incluyen todas las unidades de suelos dístricos. Si la roca caliza es rica en impurezas de hierro, por la presencia de hematita, el resultado es un suelo rojo, generalmente de reacción ácida cuando el clima es húmedo.

En México, este grupo de rocas al intemperizarse genera una gran variedad de suelos, dependiendo del clima, geoforma, drenaje, tiempo de alteración y, desde luego, la influencia de los organismos que, también, es significativa.

Bajo condiciones de climas secos (climas B) estas rocas se caracterizan por ser fácilmente atacables por el intemperismo físico que, gradualmente, fractura a la roca a tamaños de arena (2.0 a 0.05 mm) y limo (0.05 a 0.002 mm). Si este fenómeno ocurre *in situ,* se forman suelos residuales, principalmente Regosoles, Arenosoles y Leptosoles. Si parte del material fragmentado (regolita) es transportado por efecto de la pendiente (coluvialismo) también se llegan a formar esos mismos suelos aunque, en este caso, se consideran suelos transportados. Si el agua interviene en el transporte de esa regolita, como ocurre en de los abanicos fluviales, el suelo se denomina Fluvisol.

En condiciones de climas templado-húmedos, (climas C) estas rocas dan origen a una gran variedad de suelos con mayor desarrollo, como son los: Cambisoles, Andosoles, Kastanozems, Phaeozems, Luvisoles y algunos Acrisoles. En este mismo tipo de clima, pero con condiciones de drenaje deficiente, los Vertisoles, Calcisoles, Solonchak, Solonetz y algunos Planosoles son los suelos que comúnmente se forman. Sin embargo, es necesario tener presente que, por efecto de erosión natural o acelerada, la presencia de Leptosoles, Regosoles y Arenosoles está asociada a estas rocas y a este clima (c.f. Figura 5).

Cuando las rocas básicas se alteran bajo climas cálido-húmedo (clima A) se descomponen rápidamente, formando suelos profundos y muy desarrollados. Bajo estas condiciones climáticas, estas rocas llegan a mostrar diferencias mineralógicas muy significativas con respecto al suelo que han formado. Comúnmente, varios de los suelos denominados "Tropicales" se forman a partir de ellas.

5.2.1.3 Suelos formados a partir de rocas metamórficas

g. Pizarra

Los suelos derivados de pizarras generalmente son arcillosos, sin embargo, dependiendo del tipo de arcilla presente es como se determina, genéticamente, la unidad de suelo. Por ejemplo, se ha observado que, en México, estas rocas al alterarse bajo condiciones de clima templado-húmedo llegan a formar Vertisoles; siempre y cuando las arcillas predominantes que hereda el suelo son esmectitas y el drenaje externo esté confinado. Bajo condiciones de buen drenaje, de estas rocas se pueden formar Phaeozems lúvicos, Cambisoles vérticos y Luvisoles vérticos, entre otros. En climas tropicales, la alteración de las pizarras forma Luvisoles, Acrisoles, Lixisoles y algunos Nitisoles; estos últimos requieren mucho tiempo para su formación. En contraste, en zonas áridas generalmente forman Leptosoles y Regosoles. Las lutitas (consideradas como rocas sedimentarias) muestran un comportamiento similar.

5.2.1.2 Suelos formados a partir de rocas ígneas

e. Granito y Riolita (rocas ácidas)

Los granitos y la riolita, básicamente, tienden a producir las mismas unidades de suelos. Los suelos formados a partir de estas rocas son permeables y friables, generalmente ácidos y de contenido bajo de bases, debido al alto contenido de cuarzo de las rocas originales y a la lixiviación de ácidos favorecida por la textura gruesa que heredan la mayoría de ellos. Forman un material parental denominado "saprolita", por la intemperización geoquímica que suele ser intensa sobre todo en los horizontes superficiales. El concepto "saprolita" y otros relacionados se discuten en la Parte III de esta Guía.

La reserva de nutrimentos minerales tiende a ser baja en esos suelos. Suelen ser amarillentos o de color pardo amarillento, debido al contenido bajo de hierro de las rocas originales. Mineralógicamente, la arcilla en estos suelos tiende a ser caolinítica en los climas húmedos más cálidos, y los más fríos y áridos predomina la vermiculita, ilita y montmorillonita

En las zonas tropicales de México, que muestran climas cálido húmedos (Climas A) estas rocas generan secuencias de suelos (catenas) que, generalmente, muestran el siguiente orden evolutivo: Ferralsol-Plintisol-Nitisol (unidad I); Acrisol-Lixisol-Luvisol (Unidad II) y Cambisol, Fluvisol, Vertisol -Cambisol (unidad III). Esta catena de suelos está, además, fuertemente influenciada por la: altitud, geoforma, estabilidad de la geoforma a la erosión, el mesoclima, las facies mineralógicas y el tiempo de alteración sufrido por la roca. En climas fríos y muy húmedos (boreal) se conoce la presencia de Podzoles y Podsoluvisoles. Mientras que, en climas áridos, son predominantes los Regosoles, Arenosoles y Leptosoles.

f. Gabro y Basalto (rocas básicas)

Los suelos resultantes tienden a ser ricos en arcilla, con poca arena de cuarzo como para producir las texturas arenosas de los horizontes superficiales que se encuentran en los terrenos derivados de las rocas graníticas. Por ende, los horizontes superficiales son, en general, de textura franca, de migajón o migajón arcilloso (de acuerdo la clasificación edafológica de tamaños de partículas, Anexo 5). Estos suelos tienden a ser de color pardo o rojo oscuro, pues su contenido de hierro libre es elevado.

En condiciones de drenaje moderado, el contenido de bases y el pH son relativamente altos y los niveles de aluminio intercambiable son bajos o inexistentes. Los minerales arcillosos del suelo tienden a ser caolinita y haloisita, cuando el suelo tiene un buen drenaje; y, generalmente, contienen montmorillonita cuando el drenaje es inadecuado (lento) y, además, se encuentra en una región con una temporada seca bien definida.

En este concepto están incluidas varias unidades de Redzinas rojas, Cambisoles ferrálicos, Lixisoles plínticos y férricos, Acrisoles férricos, Nitisoles ródicos y Ferralsoles ródicos, principalmente (c.f. Figura 5).

b. Areniscas

En general, los suelos formados por esas rocas poseen una textura gruesa (sobre todo en los horizontes superficiales) y son sumamente permeables. Tienen tendencia a los valores bajos en contenido de bases, reserva de nutrimentos y pH, especialmente, cuando se forman en climas húmedos en los que la alta permeabilidad fomenta la lixiviación de ácidos orgánicos. Los suelos tienden a ser profundos, a menos que se formen con residuos de arenisca aglutinados con silicio, en cuyo caso tendrían poca profundidad debido al índice lento de disolución de este tipo de aglutinantes. Se tiene varios ejemplos para México, como son: Regosoles dístricos y úmbricos, Leptosoles dístricos, Arenosoles álbicos, Cambisoles dístricos, Alisoles húmicos y Ferralsoles húmicos, entre otros (c.f. Figura 5).

Cuando las areniscas presentan un contenido de feldespatos elevado (*arcosas*), los suelos tienden a ser arcillosos, ya que el feldespato se intemperiza para producir arcilla y una reserva elevada de nutrimentos debido a la liberación de cationes presentes en los feldespatos. Este es el caso de algunos Cambisoles crómicos, Nitisoles, Luvisoles, Phaeozems lúvicos y Lixisoles.

c. Conglomerados

Los conglomerados se intemperizan en material muy grueso que puede formar suelos gravosos. En zonas áridas estas rocas, generalmente, constituyen Leptosoles y, si están carbonatadas, forman Leptosoles rendzicos. En zonas templado-húmedas, llegan a constituir Arenosoles y algunos Phaeozems someros (< 40cm) en tanto que, en zonas tropicales y subtropicales cálido-humedas o subhúmedas, generan algunos Cambisoles y, rara vez, Luvisoles (c.f. Figura 5).

d. Halita y Yeso

Los suelos formados a partir de estos materiales, generalmente son de textura media (predominantemente limosos). En México, los suelos que se desarrollan sobre halita o yeso, normalmente, constituyen capas cementadas o altamente compactadas y rígidas que impiden el paso de raíces y del agua. Los suelos que se forman incluyen: Leptosoles, Solonetz, Solonchaks y Gypsisoles. Grandes áreas de Baja California presentan suelos formados a partir de halita (Guerrero Negro) en tanto que superficies considerables en Matehuala, San Luis Potosí, muestran suelos formados a partir de yeso (c.f. Figura 5).

h. Esquistos

Los suelos formados a partir de residuos de esquistos arcillosos tienen, en general, una textura fina (arcillosa), son relativamente impermeables y, en consecuencia, muestran poca lixiviación. Presentan un contenido elevado de bases y un pH alto, a menos que se formen a partir de esquistos ácidos, negros o grises, los cuales se relacionan a depósitos de lignito o carbón. En general, la ilita (mica arcillosa), la vermiculita, y la montmorillonita, son los principales minerales arcillosos presentes en suelos formados a partir de esos esquistos; con excepción de los esquitos ácidos, que tienden a formar suelos caoliníticos. La caolinita, que puede ser heredada de las rocas iniciales, se relaciona con suelos desarrollados, más antiguos e intemperizados. Los suelos formados a partir de rocas limosas tienden a ser de textura mediana (migajosa o limosa), con una reserva de nutrimentos de mediana a elevada.

En general, los suelos residuales derivados de esquistos alterados bajo condiciones de climas templados o secos presentan, en México, un desarrollo que varía de incipiente a moderado. Son representativos de este grupo los Cambisoles y Phaeozems, principalmente. Bajo condiciones de clima más húmedo y cálido (Climas Am, Aw, Cf) los esquistos, al alterarse, forman suelos arcillosos como los: Luvisoles, Acrisoles y Lixisoles y, en climas Af, llegan a constituir Nitisoles, Alisoles, e incluso algunos Ferralsoles (c.f. Figura 5).

Debido a su contenido bajo de cuarzo, los suelos formados a partir de esquistos de mica (Cambisoles) tienden a ser limosos, menos gruesos, desde el punto de vista textural, que los constituidos a partir de materiales graníticos. Poseen una reserva elevada de potasio y micas, excepto en los terrenos más antiguos y húmedos, donde el proceso de intemperización ha sido a más largo plazo. En este caso, la ilita es la arcilla predominante.

Los suelos provenientes de esquistos del tipo de la *sericita,* tienen un alto grado de probabilidad de ser muy ácidos y ricos en aluminio intercambiable (Alisoles) debido a la descomposición de la sericita alumínica. Mientras que los suelos formados a partir de residuos de esquistos *cloríticos* tienden a ser arcillosos, plásticos y ricos en montmorillonita, (suelos con propiedades vérticas) y a contener, ocasionalmente, cantidades muy altas de magnesio.

i. Cuarcitas

Debido a que sólo están constituidas por cuarzo, y a que difícilmente se afectan por intemperismo químico, la producción de minerales primarios por alteración es casi nula. Sin embargo, tienden a disgregarse por intemperismo físico y a constituir Regosoles, A renosoles y Leptosoles. Algunas sabanas del trópico mexicano (Huimanguillo, Tabasco), presentan algunas unidades de suelos cuarcíferos.

j. Gneises

Básicamente, los suelos que se forman de estas rocas, son similares a los formados a partir de granitos y riolitas.

5.2.2 Unidades de Suelos formadas a partir de Depósitos no Consolidados

No es posible definir estos depósitos, con tanta precisión, como se definen las rocas individuales, debido a que existe una variación mucho más amplia en sus propiedades. Sin embargo, a continuación se presentan las características de algunos de estos depósitos.

5.2.2.1 Depósitos de llanuras costeras.

Generalmente, se trata de sedimentos secundarios transportados, derivados de terrenos antiguos, con un alto grado de intemperización y erosionados. Con frecuencia, los materiales iniciales tienen probabilidades de ser ácidos, con un contenido de minerales intemperizables de bajo a moderado y de texturas granulométricas variables, de arenas hasta arcillas, dependiendo del ambiente de la deposición. Los sedimentos aluviales, coluviales y deltaicos de las llanuras costeras tienden a ser ricos en caolinita, ácidos y con bajas reservas de nutrimentos. Generalmente, los materiales parentales derivados de los depósitos marinos, tienden a ser neutros o ligeramente alcalinos, arcillosos, con cantidades apreciables de montmorillonita. En cambio, cuando los materiales iniciales se depositan en playas o plataformas marinas, tienden a ser ácidos y de textura gruesa.

5.2.2.2 Dunas

Las dunas litorales se encuentran asociadas a las playas arenosas. Aunque a veces aparecen adosadas a los acantilados, las más importantes son características de las costas llanas. En México, las dunas que se localizan a lo largo de la Llanura Costera del Golfo (Edo. de Veracruz) son un ejemplo clásico. El margen costero está sometido al dominio de fuertes vientos procedentes de altamar, que barren en él a las arenas las cuales serán tanto más abundantes cuanto mayor sea la extensión del estero. La escasa densidad de vegetación, debida a la presencia de sal, facilita su movilización.

FAO-Unesco (1988-1990) considera que el tamaño de grano (textura) que muestren las dunas estabilizadas, es prioritario para determinar la unidad de suelo que se desarrolla. De tal manera que, en el caso de suelos que muestren una textura más fina que Migajón arenoso (arena <50%, Anexo 5) hasta una profundidad de 100 cm, y no presenten desarrollo de horizontes ni estructura, se clasifican como Regosoles (c.f. Figura 5). En el caso contrario, aquellos suelos que muestren texturas más gruesas, o de Migajón arenoso, se deben clasificar como Arenosoles (c.f. Figura 5).

5.2.2.3 Depósitos glaciares

En lugares en donde los depósitos glaciares presentan residuos de esquistos y calizas, pueden predominar los suelos de texturas migajosas; la montmorillonita puede ser el mineral arcilloso predominante y el pH y la saturación de bases elevados; la edafogénesis es incipiente en estos materiales, puesto que esos depósitos son, desde el punto de vista geológico, recientes o jóvenes.

Si poseen restos de areniscas y granitos, los suelos derivados de estos depósitos tienden a ser de textura Migajón arenosa, con una composición más silícea. La ilita (o mica arcillosa) es un mineral arcilloso importante en esos depósitos y va acompañada de montmorillonita en cantidades que varian de moderadas a altas de montmorillonita, y cantidades pequeñas de caolinita, vermiculita y clorita. El pH y la saturación de bases pueden ser bajos, lo cual se refleja en la actividad del ion H^+ y el bajo contenido de bases en los suelos formados a partir de estos materiales. En general, los suelos formados a partir de éstos depósitos presentan, en mayor o menor grado, evidencias de podsolización.

5.2.2.4 Depósitos lacustres

En estos depósitos predominan los sedimentos de textura arcillosa y limosa, principalmente, en los cuales, normalmente, dominan los minerales cristalinos de diámetro menor de 2 micras y la materia orgánica. Los restos de plantas, generalmente, son abundantes en los depósitos de "lodo" que se localizan en las partes marginales de los lagos mientras que, en las partes más profundas, las algas (diatomeas) y los ostrácodos constituyen una parte significativa de los sedimentos. Los suelos que se forman a partir de estos depósitos son muy variables en México. Sin embargo, se estima que las unidades de Fluvisoles, Solonchaks, Vertisoles y Cambisoles sean las más frecuentes.

Como ejemplo, en los depósitos lacustres la Cuenca de México, la fracción arcillosa, de composición muy heterogénea, varia en función de la profundidad y de la naturaleza de los estratos que se presentan dentro de los primeros 40 metros. Las arcillas cristalinas están representadas, principalmente, por ilitas, arcillas intergradadas y montmorillonitas. No obstante, asociadas a ellas, existen minerales amorfos inorgánicos y orgánicos que, en conjunto, actúan constituyendo un estado coloidal. Esta característica puede explicar el comportamiento mecánico tan particular del subsuelo de la Ciudad de México. Sin embargo, su estudio es muy complejo y requiere de mayor investigación.

5.2.2.5 Depósitos de loess

Los loess se consideran, generalmente, como partículas de limos extendidos por el viento y derivados de las llanuras glaciales de alimentación. En México, este material no ha sido identificado como material parental de suelos, pero sí como depósito sedimentario.

Los materiales originales de loess contienen grandes cantidades de limo, aproximadamente de 10 a 20% de arcilla, un contenido elevado de minerales intemperizables y una alta saturación de bases. En la fracción arcillosa, domina la montmorillonita, tiene cantidades variables de ilita (mica arcillosa o "hidromica") y, probablemente, ciertas cantidades de vermiculita. Puesto que estos materiales son relativamente recientes, en un clima suave, sólo se han modificado ligeramente por la intemperización edafoquímica. En consecuencia, los suelos formados a partir de ellos son limosos, con reservas elevadas de nutrimentos y, en general, con excelentes propiedades físicas. Es posible que algunos Phaeozems y Kastanozems deriven de estos materiales.

5.2.2.6 Depósitos volcánicos

Los materiales parentales derivados de cenizas volcánicas se componen de fragmentos de vidrio y cristalinos, feldespatos fácilmente intemperizables, minerales ferromagnésicos y cantidades variables de cuarzo. La mayoría de los depósitos de cenizas volcánicas, a nivel mundial, son andesíticos (moderadamente básicos en su composición), sobre todo los de las zonas volcánicas cercanas a la Cuenca del Pacífico. Los que tienen contenidos elevados de silicio son vesiculares y reciben, comúnmente, el nombre de piedra pómez. Se presentan en zonas situadas al noroeste de Estados Unidos, México (Eje Neovolcánico) América Central y al noroeste de Sudamérica.

Las cenizas volcánicas dan propiedades bastante definidas a los suelos (Andosoles y suelos ándicos), a lo largo de una amplia gama de condiciones climáticas. Una de las principales características que heredan los suelos de sus materiales originales (cenizas volcánicas) es la del *alófano*, un silicato alumínico amorfo, con el que se une la materia orgánica la cual es muy abundante en los horizonte superficiales. No obstante, los suelos formados a partir de arenas volcánicas en las zonas áridas o las que tienen temporadas secas muy pronunciadas, tienden a formar montmorillonita y no son tan oscuros por lo que, en general, no se incluyen en este grupo.

Los ***suelos formados a partir de cenizas volcánicas*** han recibido varios nombres: Andosoles (según FAO-Unesco, 1990) y, mas recientemente, Andisoles (clasificación actual en Estados Unidos), Kurobuku (Japón), Albisoles (Nueva Zelanda) y Trumaou (Chile).

Las características comunes de los suelos ricos en alófano, formados con materiales volcánicos vitreos, las resumió Wright (1964) de la siguiente manera:

- Perfiles generalmente profundos, friables en la parte superior y, por lo común, con una estratificación definida, en los suelos jóvenes.
- Presencia de compuestos húmicos en los horizontes superficiales, intensamente oscuros y relativamente resistentes a la descomposición microbiana.

- Los colores predominantes del subsuelo caen dentro del café-rojo-amarillento. Este material, al frotarse entre los dedos, da una sensación "grasosa". En tanto que la consistencia pegajosa es más acentuada en los suelos de climas más húmedos.
- Densidad aparente muy baja; muy ligera y porosa, con una consistencia esponjosa.
- Capacidad elevada de retención de agua.
- Agregados estructurales débiles, con bloques porosos que carecen de cutanes.
- Carencia, casi total, de adhesividad o plasticidad cuando el material está húmedo; después de secarse, al colocar una porción en agua, se observa que las partículas flotan en el agua y se mojan con lentitud.
- Elevada capacidad de intercambio de cationes, extremadamente difíciles de dispersar durante el análisis granulométrico.

En adición a lo anteriormente señalado, se puede incluir el hecho de que los suelos formados a partir de estos materiales volcánicos, son colapsables y fácilmente erosionables.

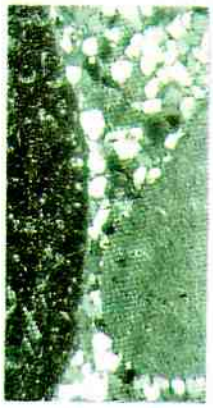
OBSERVACIONES:

1. La génesis de suelos a partir de la alteración de diferentes rocas y materiales, bajo diferentes condiciones medio ambientales es común en México. Sin embargo, los ejemplos citados no tienen que cumplirse de forma axiomática, ya que la presencia de otros factores formadores de suelos, pueden modificar la evolución de éstos, principalmente en zonas templado-húmedas y cálido-húmedas.
2. Para el análisis y la clasificación de los diferentes tipos de rocas es fundamental el estudio petrológico a través de secciones delgadas (con la ayuda de un microscopio petrográfico). La caracterización del material parental, de la susceptibilidad a su alteración y de las unidades edáficas que se formen de este tipo de material parental, requiere del estudio de secciones representativas de la roca en cuestión; como las que se presentan en la Lámina 1, en la cual se pueden observar tanto las diferentes asociaciones mineralógicas de diferentes tipos de roca, como sus relaciones texturales y la alteración incipiente de algunos minerales.

LAMINA 1: ROCAS FORMADORAS DE SUELOS

AGLOMERADO

BRECHA


CONGLOMERADO

ANDESITA

BASALTO

RIOLITA

POMEZ

DOLERITA

SIENITA

GRANITO

GABRO

GNEISS

MARMOL

ESQUISTO

ARENISCA

CALIZA

IRONSTONE

R. FOSFATADA

Diferencias mineralógicas y texturales entre diversos tipos de rocas. Microfotografías de láminas delgadas tomadas en el microscopio óptico con luz polarizada (250X).

6 RELIEVE

6.1 DINAMICA DEL RELIEVE

Se puede considerar que la escala de influencia del factor topográfico en la formación del suelo es, en muchos países, más pequeña que la de los otros factores medioambientales. Sin embargo, México es una de la excepciones a ese criterio. En el territorio nacional, casi todos los cambios en las unidades de suelo, que tienen lugar en distancias cortas, están relacionados con el factor topográfico. Generalmente, se observa un patrón en la distribución de suelos, relacionado directamente con las formas topográficas, tales como la cima de las colinas, los declives, las planicies o las zonas bajas de un paisaje. Los suelos comprendidos en este patrón se agrupan en lo que se llama "asociación de suelos".

En gran parte, las formas del relieve son afectadas por los mismos factores formadores del suelo. Los agentes climáticos como el agua, el viento y los cambios de temperatura, actúan para desintegrar, erosionar y transportar los materiales y, así, modificar el relieve al mismo tiempo que se forma el suelo. La cubierta vegetal y la resistencia a la erosión del suelo ejercen una gran influencia en el paisaje resultante y el paisaje, a su vez, influye sobre el suelo a través del factor topográfico (Palmer, 1980).

Aún en las formas terrestres constituídas por rocas muy duras, como el granito, se producen cambios constantes por intemperismo y erosión. Se entiende que las montañas, a través del tiempo, se desgastan formando superficies planas u onduladas, pero este proceso es muy lento, toma miles o millones años. Sin embargo, existen excepciones como es el caso de las dunas y los conos cineríticos que pueden desarrollarse o cambiar con cierta rapidez.

El espesor de un suelo está, frecuentemente, determinado por la naturaleza del relieve. Se ha establecido que la pendiente actúa de manera importante en la formación de suelos, ya que modifica la orientación del flujo del agua dentro del suelo, parte del cual fluye lateralmente. A su vez, la infiltración también se encuentra limitada por la escorrentía, la cual es un potente agente de erosión. Así, en sitios prácticamente planos (con pendiente de 0 a 2%) o con pendiente ligera (2 a 4%) siempre hay tendencia a que el material parental permanezca en su sitio y que el espesor del suelo (residual) sea importante (>100cm) pero, a medida que aumenta la inclinación de la pendiente, aumenta la susceptibilidad a la erosión, dando por resultado que en los lugares de pendientes fuertes (36%) el suelo sea de poco espesor (Leptosoles). A estas condiciones se agrega el factor vegetación, pues en donde ésta es densa aún en pendientes pronunciadas se forman suelos como por ejemplo: Cambisoles - Phaeozems o bien Regosoles.

En México, en las zonas montañosas de clima templado se presentan una asociación típica de suelos: Leptosol, Regosol, Phaeozem y Cambisol.

El Leptosol predomina en pendientes fuertes (36%) que muestran una cobertura vegetal escasa (<50%); el Regosol se presenta en pendientes que, aunque inclinadas, permiten la acumulación de material erosionado, proveniente de las partes más altas. Los Phaeozems y Cambisoles también se forman en superficies inclinadas, pero estables a la erosión, debido a que presentan una cobertura vegetal mayor al 70%. Otros suelos como los Andosoles, que derivan de materiales volcánicos, también son muy comunes en las montañas de México; la mayoría muestran buena cobertura vegetal pero, si son deforestados, se erosionan rápidamente aún en sitios con poca pendiente, originando la formación de una secuencia de Leptosoles-Regosoles.

La influencia más notable que tiene el relieve sobre el desarrollo del suelo, se resume en la frase que dice: "El agua corre cuesta abajo". Esto se refiere al agua superficial o libre que se desplaza sobre la superficie del suelo y que arrastra, casi siempre, partículas sólidas y produce erosión o cambios en el relieve, resultando menor la cantidad de agua infiltrada que en las zonas niveladas. Debido al agua que corre en las zonas de pendiente fuerte (escurrimiento), las depresiones y los valles reciben más agua superficial que los suelos altos circundantes. Esto provoca, en cualquier clima dado, una mayor lixiviación en los suelos formados en la base de la pendiente, que en los formados en las zonas más altas, y un mínimo de lixiviación en las laderas pronunciadas.

Finalmente, el relieve se puede considerar como un factor real para el desarrollo del suelo. Sin embargo, el papel exacto que desempeña es difícil de evaluar con ejemplos generalizados en la naturaleza. El relieve puede funcionar de manera diferente según sean las condiciones ambientales; modifica la influencia de los materiales originales y del tiempo, por los cambios que produce la erosión debido al mismo relieve. Modifica también el clima mediante el control de los escurrimientos, del nivel freático y del factor vegetación. La influencia del relieve sólo se puede evaluar en una zona determinada, ya que su papel como factor formador de suelos cambia de una región a otra. Asimismo, se debe tomar en cuenta que los mismos procesos que forman los suelos intervienen para modificar el relieve.

En general, las características topográficas de una región se pueden agrupar en tres categorías principales: (1) las producidas por el volcanismo (ejemplo: El Eje Neovolcánico); (2) las formas modificadas por la erosión (ejemplo: Sierras del Noreste de México) y (3) las causadas por depositación (ejemplo: La Llanura Costera del Golfo de México).

En la tabla 7 se indican las principales características topografícas y sus procesos de formación. Las formas de relieve presentadas en esta tabla, se han relacionado con las siguientes propiedades de los suelos: (a) profundidad del suelo; (b) espesor del horizonte A y contenido de materia orgánica; (c) humedad relativa del perfil; (d) color del perfil; (e) grado de diferenciación de horizontes; (f) reacción del suelo; (g) contenido de sales solubles; (h) tipo y grado de desarrollo de "panes"; (i) temperatura, y (j) tipo de material inicial.

TABLA 7 : ACCIDENTES TOPOGRAFICOS Y SUS PROCESOS DE FORMACION

PROCESO		FORMAS DEL RELIEVE
1. Tectónico	1.1 Levantamiento	Fallas, pliegues montañosos, altiplanicies, playas elevadas, mesas.
	1.2 Hundimiento	Valles hundidos (grabens)
	1.3 Volcanismo	Calderas, derrames de lava, volcanes, superficies de piroclastos y de cenizas.
2. Agua corriente	2.1 Erosión	Cárcavas, cuestas, dolinas, gargantas, karsts, pendientes, penillanuras, valles.
	2.2 Depósito	Abanicos aluviales, llanuras aluviales, terrazas aluviales, piedemonte, deltas.
3. Desplazamiento de Hielo	3.1 Erosión	Aretes, circos, valles colgantes, rocas amontonadas, valles en forma de U.
	3.2 Depósito	Drumlings, esker, morrenas, masas de arcilla.
4. Heladas	4.1 Erosión	Barrancas, superficies rocosas.
	4.2 Depósito	Conos talus, terrazas de solifluxión.
5. Viento	5.1 Erosión	Pozos del desierto o hamadas
	5.2 Depósito	Dunas, loess.
6. Movimientos de masa gravitacionales	6.1 Erosión y depósito	Derrumbes, reptación de masa y suelo, terrazas de solifluxión.

OBSERVACION:
Para mayor información sobre la terminología empleada en esta tabla, consultar el *Diccionario Geomorfológico*, Lugo (1989), editado por el Instituto de Geografía de la UNAM.

Las relaciones más evidentes entre una propiedad del suelo y el relieve se producen, probablemente, en zonas húmedas donde los suelos, en un relieve casi plano, tienden a alcanzar mayor profundidad que los de las laderas. Esto se puede atribuir ya sea a la erosión lenta de los materiales del suelo superficial o a la falta de agua de infiltración debido a pérdidas por circulación, o ambas cosas, que ocurren en las laderas.

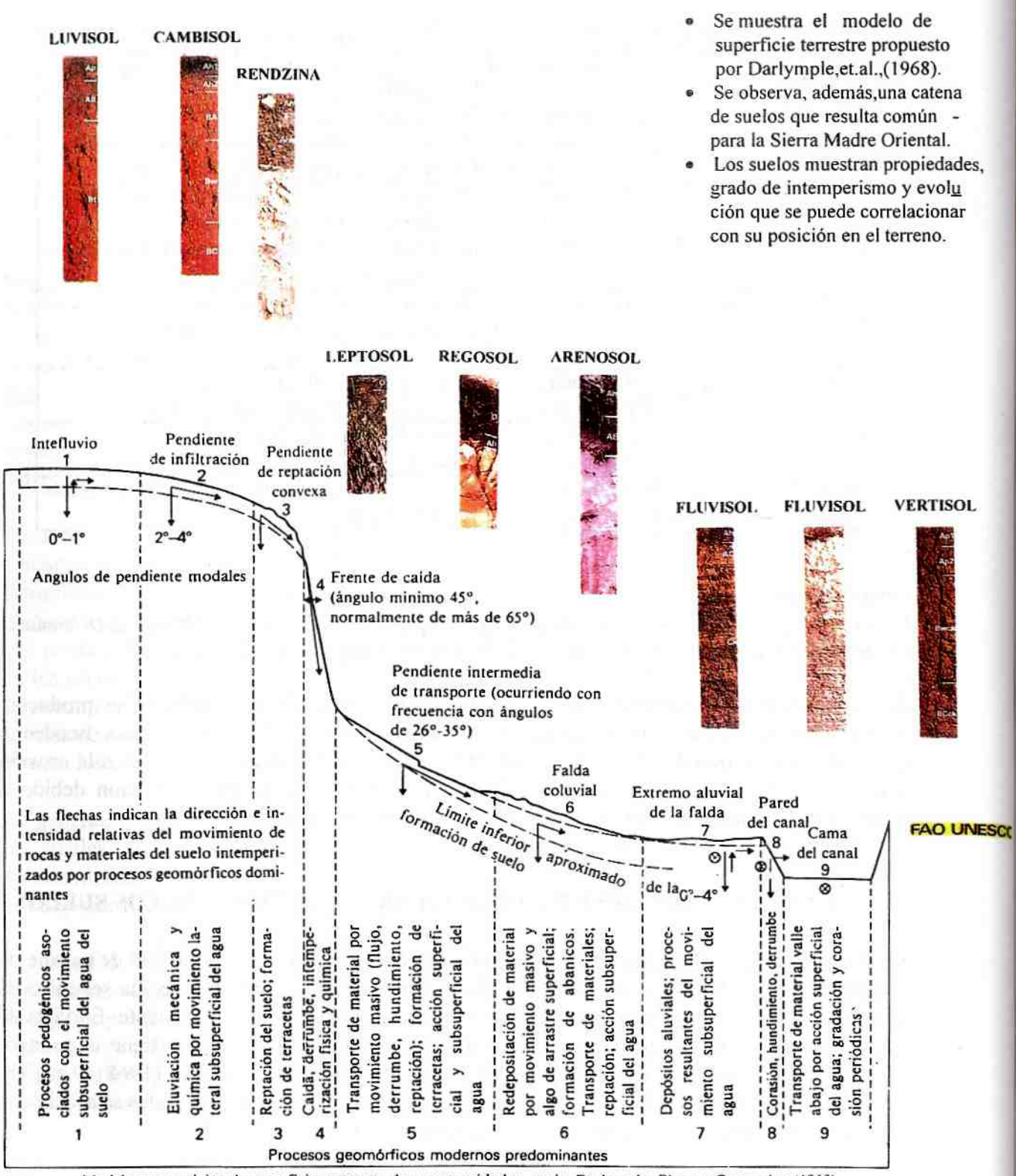
6.2 MODELO DE RELIEVE UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE LOS SUELOS

En la actualidad, es muy utilizado en las investigaciones sobre suelos, el modelo de paisaje de cuatro elementos: la cresta, el escarpe, el piedemonte (ripio) y el pedimento. La sencillez de este modelo es una limitante para encontrar toda la diversidad de suelos existente. En vista de que el paisaje es más complejo de lo que en este modelo se considera, se tiene una mayor variación en los procesos. Lo anterior ha sido discutido por Dalrymple et al. (1968), y sugiere un modelo con nueve elementos de pendiente (Figura 10), cada uno de los cuales se asocia con diferentes procesos, tanto en tipo como en intensidad.

FIGURA 10. EL RELIEVE COMO FACTOR FORMADOR DE SUELOS.

OBSERVACIONES

- Se muestra el modelo de superficie terrestre propuesto por Darlymple,et.al.,(1968).
- Se observa, además,una catena de suelos que resulta común - para la Sierra Madre Oriental.
- Los suelos muestran propiedades, grado de intemperismo y evolución que se puede correlacionar con su posición en el terreno.



Modelo esquemático de superficie terrestre, de nueve unidades, según Darlymple, Blong y Conancher (1968)

En las partes altas, las pendientes son suaves, de 0 a 1 %, dominando los procesos de formación de suelos (Luvisoles). A pendientes mayores, 2 a 4 %, se presenta mayor movimiento lateral y remoción de partículas, lo que permite la formación de Cambisoles. En las laderas, el suelo puede reptar originando la formación de terrazas. A pendientes mayores, en el escarpe, de 45 a 65 %, dominan los procesos gravitacionales que impiden la formación de suelos, o bien de suelos con escaso desarrollo como los Leptosoles. Hacia el piedemonte, con pendientes de 26 a 35 %, se combinan múltiples procesos de erosión y acumulación, que propician la formación de suelos de poco desarrollo (Regosoles). En las partes bajas, con pendientes pequeñas, los procesos de acumulación son más importantes, de tal forma, que existen las condiciones para la formación de suelos con desarrollo importante.

En algunos casos, la estructura geológica puede controlar y determinar la forma del paisaje. Cuando hay rocas fácilmente intemperizables y erosionables cerca de rocas duras, éstas últimas pueden formar promontorios o escarpes en el terreno. En zonas de calizas, en las cuales la disolución es el principal proceso de intemperización, se desarrolla un tipo único de sitio panorámico, conocido como *Karst*. Este se caracteriza por las superficies pedregosas y la ocurrencia de *Dolinas*, que son depresiones formadas por el hundimiento gradual o por el colapsamiento de materiales en los canales formados por la disolución de la roca.

De manera general, el material removido por erosión es transportado por los ríos y luego depositado para formar acumulaciones aluviales o llevado hasta el mar para formar deltas. En regiones áridas, en donde hay pocos o ningún río, el material producido por la intemperización permanece en su sitio, o es acarreado a distancias cortas, por lo general al pie de las pendientes donde se acumula.

6.3. SECUENCIAS TOPOGRAFICAS Y CATENAS DE SUELOS

Una *Catena Topográfica de Suelos* se ha definido como una secuencia de drenaje interno del suelo (Bushnell, 1942). La catena topográfica es un concepto que se utiliza con frecuencia y que, primordialmente, caracteriza a las zonas del mundo en las que el nivel de aguas freáticas está presente dentro del perfil de los suelos formados, ya sea en depresiones o bien en regiones con relieve accidentado. En tales terrenos, la multiplicidad y diversidad de suelos son grandes y están condicionadas por las variaciones en las condiciones topográficas locales. Los términos de "con drenaje bueno, bastante bueno, imperfecto y malo" se han utilizado para describir suelos individuales asociados en secuencias topográficas, en donde participa el drenaje, relacionado con el nivel freático. (Soil Survey Staff, 1993). Una catena de suelos comprende a los suelos que presentan variaciones en sus propiedades físicas, químicas o mineralógicas, de acuerdo a su posición a lo largo de un perfil topográfico, como consecuencia de los cambios en el drenaje externo e interno que, a su vez, fueron favorecidos por la pendiente.

Se ha observado que los suelos que integran una catena topográfica tienen propiedades que se pueden correlacionar con su posición en el terreno (Ruhe, 1969). Sin embargo, puede ocurrir que se pasen por alto esas correlaciones. Entre los suelos de la catena, además, pueden encontrarse relaciones microclimáticas con la circulación de agua freática, la vegetación, erosión y la posición, o una combinación con todas ellas. Las relaciones de las propiedades de los suelos con las posiciones topográficas se pueden identificar con facilidad (Figura 10). Sin embargo, si se desea llegar a entender plenamente las causas genéticas, será preciso examinar muchos datos sobre la relación del relieve con los otros factores formadores de suelos, en lo que se refiere al papel que desempeñan estos últimos en la modificación del relieve local.

En la figura 10, se ejemplifica el modelo de superficie terrestre, propuesto por Darlymple et al., (1968), así como una catena de suelos común para la Sierra Madre Oriental en su vertiente del Golfo.

6.4 DESCRIPCION DE LOS SUELOS SEGUN EL RELIEVE

Normalmente, un terreno puede describirse formalmente mediante los siguientes datos:

- (a) densidad de drenaje (longitud total de los arroyos en la zona/área de la cuenca).
- (b) índice del relieve (relieve de la cuenca/longitud del arroyo principal).
- (c) dimensiones del cuerpo de suelo (mediciones internas de la anchura y la longitud. mediciones externas de la longitud y la anchura del patrón).
- (d) número de cuerpos de suelos por unidad de superficie.
- (e) características del perfil del suelo, extensión proporcionada y disposición en cadena de los tipos de cuerpos de suelos.

Muchos de estos datos pueden ser obtenidos fácilmente a partir de modelos digitales de terreno, por ejemplo: el Sistema de Información Geográfica ARC/INFO, versiones 6.1 y 7.0

El uso de fotografías aéreas en blanco y negro, escala 1:50000, combinado con el trabajo de campo, sigue siendo una herramienta muy eficiente para generar esa información. Por otro lado, un análisis morfométrico (Lugo, 1984) contribuye con datos importantes para delimitar las unidades terrestres que presentan las mismas características geomorfológicas, asociadas a determinadas características del suelo.

7 ORGANISMOS

La **biota** o fase viva del suelo, que comprende a todos los micro y macroorganismos residentes de este ecosistema, constituye el factor formador del suelo más estrechamente relacionado con el concepto **"Edafología"**, postulado por la Escuela Rusa a finales del siglo XIX, que considera al suelo como un medio que se origina y evoluciona bajo la acción de los "factores activos": clima y biota (Duchaufour, 1984).

7.1 INTEMPERISMO BIOLOGICO

Uno de los aspectos más importantes sobre el papel que juegan los organismos en la formación del suelo radica en las relaciones de intercambio de sustancias y energía entre los mismos y los minerales presentes en el material parental. El intemperismo biológico es iniciado por la biota ***"rupícola"***, primeros colonizadores de las rocas, también llamados "organismos pioneros". La biota **"rupícola"** es la fuente inicial que incorpora materia orgánica, y la que libera los primeros agentes intempéricos de las rocas (productos de su metabolismo) como son: el ácido carbónico; una gama importante de ácidos orgánicos; amoniaco y ácido nítrico; entre otros, con los cuales se inician los procesos bioquímicos de alteración de las rocas (disolución y disgregación).

De acuerdo a su interacción con el material parental estos organismos se pueden agrupar en dos tipos, los microorganismos ***fotoautótrofos*** (que obtienen su energía de la luz solar y el carbono del aire), y la ***biota heterotrófica*** o ***quimiorganotrófica*** (que requiere de nutrimentos orgánicos preformados que utiliza como fuente de energía y de carbono):

- Los microorganismos fotoautótrofos comprenden a las cianobacterias, algas clorofitas; y bacterias quimiolitotróficas que obtienen su energía de reacciones biosintéticas derivadas de la oxidación o reducción de materiales inorgánicos, teniendo como fuente de carbono el aire. Entre estas últimas se encuentran las bacterias que transforman el amonio a nitrito, el azufre a ácido sulfúrico; el Fe^{2+} a Fe^{3+} o las que reducen los sulfatos $(SO_4^{2-} + 8H \text{---} 4H_2O + S^{2-} + energía)$ entre otras (Alexander, 1977).
- La biota heterotrófica incluye una gran diversidad de bacterias, hongos y protozoarios.

Las rocas en proceso de intemperización, constituyen un medio propicio para el desarrollo de "organismos pioneros macroscópicos" como microalgas, musgos, helechos y algunas plantas fanerógamas. Estos organismos son indicadores del intemperismo de las rocas y, al mismo tiempo, agentes meteorizantes de las mismas, ya que absorben los elementos producto de su disolución, y liberan los productos metabólicos antes mencionados, que actúan como agentes intempéricos.

Cabe mencionar, además, el efecto de las plantas rupícolas que ejercen presión con sus raíces en las fisuras de las rocas a manera de cuñas (procesos biofísicos) contribuyendo con ello a su fractura y disgregación.

El tiempo que tarda en formarse un suelo es determinado, en gran parte, por el grado de establecimiento de la microflora del suelo (bacterias, actinomicetos y hongos filamentosos) y de la vegetación. De la interacción de estos dos componentes de la biota, depende la cantidad y naturaleza de la materia orgánica que se incorpora, cuyas propiedades integran y reflejan el conjunto de los factores formadores (clima, vegetación y material parental) y, además, al unirse y evolucionar íntimamente con el material mineral determinan la ***tipogénesis*** del suelo. Las clasificaciones denominadas "genéticas" se apoyan, en su mayor parte, en esta concepción dinámica (Duchaufour, 1984). La evaluación de la biomasa edáfica permite entender el grado de participación de la biota en el desarrollo de las propiedades del suelo (Tabla 8).

TABLA 8 : BIOMASA APROXIMADA DE CADA UNO DE LOS COMPONENTES MAYORES DE LA

COMPONENTE DE LA BIOTA	BIOMASA (t/ha)
Raices de plantas	20 - 90 o más
Bacterias	1 - 2
Actinomicetos	0 - 2
Hongos filamentosos	2 - 5
Protozoarios	0 - 0.5
Nemátodos	0 - 0.2
Lombrices de tierra	0 - 2.5
Otros animales edáficos	0 - 0.5
Virus	indetectables

BIOTA DE UN SUELO TIPICO DE PRADERA DE CLIMA TEMPLADO (KILLHAM, 1994)

7.2 PARTICIPACION DE LA BIOTA EN EL DESARROLLO DE ALGUNAS CARACTERISTICAS DE DIAGNOSTICO DEL SUELO

7.2.1 Microbiota

La Microbiota del suelo puede alcanzar un desarrollo muy particular en relación con las características del suelo, a continuación se presentan algunos ejemplos:

- Una mayor población de hongos filamentosos ocurre en la mayoría de los suelos ácidos y una preponderancia de bacterias en aquellos suelos de reacción alcalina.

- La superioridad de un grupo microbiano sobre otro puede ser una característica de algunos suelos; como se observa en suelos derivados de cenizas volcánicas (Andosoles). En éstos, a diferencia de lo que ocurre en otros suelos, la población de actinomicetos puede ser mayor que la de bacterias. Este hecho ha sido detectado tanto en suelos de Japon (Ishizawa y Toyoda, 1964) como en Andosoles de México (Palacios et al., 1973).
- Al evaluar el efecto de los actinomicetos de suelos tropicales de Trinidad, Tailandia y Japón sobre las propiedades físicas, se ha encontrado que un alto porcentaje de actinomicetos antagónicos a bacterias Gram-positivas, se correlaciona con valores significativamente altos en ***materia orgánica*** y con los valores máximos en ***capacidad de retención de agua*** (Araragi, 1978; *In* Lal R., 1987).
- Con los productos derivados del metabolismo, los microorganismos coadyuvan a la ***agregación*** de las partículas del suelo y, con ello, mejoran la estructura; particularmente los compuestos orgánicos nitrogenados, como por ejemplo los aminoazúcares y otros productos derivados de la descomposición microbiana, actúan como agentes de enlace entre las partículas de suelo (Yang, 1982).

7.2.2 Macrobiota

De la macrobiota, la **vegetación** es el componente más dependiente del relieve, clima y material parental; a tal grado, que la dominancia o particularidad de alguno de ellos se puede apreciar en ella misma. No obstante, cierto tipo de vegetación, como la boscosa por ejemplo, puede influir sobre el micro y mesoclima de una región. Sin embargo, considerando la estrecha relación que hay entre la vegetación y el clima de una determinada localidad, resulta difícil puntualizar de que manera participa la vegetación en la génesis del suelo. Para el desarrollo de ciertos suelos, como por ejemplo los Spodosoles (Figura 11-A) la vegetación es determinante, ya que de ella depende el desarrollo de ciertas características de diagnóstico, como es el contenido y distribución de la materia orgánica a lo largo del perfil; a diferencia de la insignificante capa de humus de los Oxisoles (Figura 11-B).

Se ha observado que ciertas especies de pastos *(Miscanthus sinensis)* en conjunción con el clima, contribuyen con la andosolización (proceso de la formación de Andosoles). En este caso, este pasto neutraliza la acidez del suelo e impide la movilización de los complejos. Un efecto similar se puede tener con una vegetación subalpina de *Abies mariesii,* ya que puede reducir la acidez hasta en un 25% (Ugolini et al., 1950). Este tipo de interacciones, aún cuando aparentemente son muy locales, deben estar presentes, también, en edafoecosistemas mexicanos, sin embargo no existen estudios al respecto (Solleiro, 1992).

Aún cuando, aparentemente, la vegetación se encuentra involucrada en el desarrollo de catenas de suelo, éstas son más bien el resultado de variaciones climáticas específicas, dadas por el gradiente altitudinal. En este caso, la vegetación que se establece va evolucionando a la par que el suelo, diferenciándose a medida que desciende topograficamente, marcando contrastes en las características tipogenéticas de los suelos.

En la relación modificada por Jenny (1980), cuyo primer planteamiento es presentado al inicio de esta parte de la Guía, se puede colocar a la vegetación en ambos lados de la igualdad, debido a la fuerte interdependencia que hay entre el suelo y los organismos:

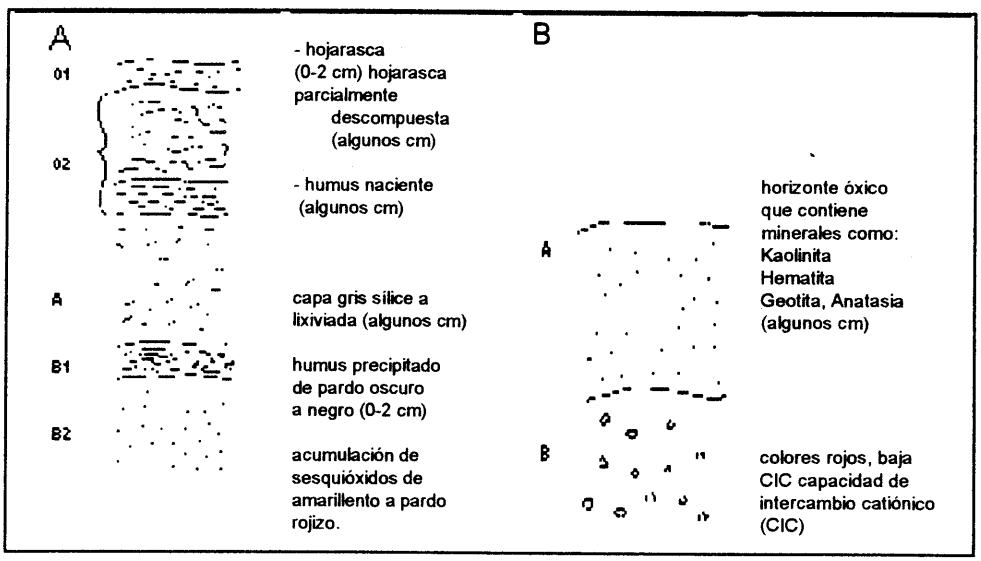
l,v,a,s,	=	**f (cl,phi,r,p,t)**
propiedades del sistema		factores de estado

Donde:

l = cualquier propiedad del suelo	cl = clima
v = vegetación	phi = factor biótico
a = fauna	r = relieve
s = suelo	p = material parental
	t = tiempo

Es importante señalar que la vegetación es, además, un factor esencial en la conservación del suelo ya que, como cobertura vegetal, lo protege, mantiene la unión entre las partículas, regula el paso del agua y, por consiguiente, reduce y en la mayoría de los casos impide la erosión.

FIGURA 11 : COMPARACIÓN DE MODELOS DE PERFILES IDEALIZADOS PARA SUELOS FORESTALES



(11-A) Spodosol de clima templado, con horizontes superficiales con materia orgánica acumulada y horizonte A lixiviado, es un ejemplo de un suelo forestal acídico; (11-B) Latosilización como puede observarse en un oxisol (ecosistema forestal tropical); estos suelos son generalmente muy lixiviados y acídicos; con una capa no significativa de humus (tomado de Tate, 1995).

7.2.3 Bioperturbación

La bioperturbación se refiere al efecto de la fauna en el movimiento de suelo dentro del perfil y es, en algunos suelos, muy importante. Lombrices de tierra, hormigas, termitas, tusas y topos, pueden estar presentes en cantidades apreciables en el subsuelo. En las estepas semiáridas puede haber, además, mamíferos cuyas excavaciones pueden llegar hasta los tres metros de profundidad, desde donde transportan suelo hasta la superficie. Sus madrigueras, a menudo, se llenan con suelo del horizonte superficial dando origen a los típicos canales de suelo negro o ***crotovinas*** (según la terminología Rusa) que resaltan en los horizontes más profundos o en el material parental cuyo color es más claro (Russell, 1973). Los suelos pobremente drenados de algunas planicies costeras, llegan a manifestar la actividad de otro tipo de animales cavadores, como por ejemplo algunas especies de cangrejos. Asimismo, en suelos con un pronunciado *clay pan*, se ha descrito la actividad de animales cavadores capaces de hacer madrigueras por debajo del límite del área saturada, cuando ésta queda dentro de los tres metros de profundidad.

7.3 PAPEL DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS MAS IMPORTANTES DEL SUELO EN LA ACTIVIDAD MICROBIANA

De los elementos esenciales para el desarrollo de la vida: el carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, existen en la corteza terrestre y, en particular en el suelo, en una gran variedad de formas químicas, algunas de las cuales se encuentran directamente disponibles para los organismos y otras deben modificarse, química o biológicamente, para que puedan ser incorporadas a las células, (Tate, 1994). La biota del suelo juega un papel fundamental en el reciclaje de estos elementos; como resultado de su participación en el movimiento de estos nutrimentos de las fuentes de abastecimiento orgánicas e inorgánicas del suelo (ciclos biogeoquímicos; Palacios y Gama, 1994, *In* de la Cruz R., 1994). El grado de disponibilidad en que estos cuatro elementos se encuentren en un suelo, tiene implicaciones edafogenéticas y bioclimáticas e influye directamente en la actividad microbiana. Cabe mencionar que, a su vez, la actividad microbiana determina la cantidad y tipo de materia orgánica presente en el suelo, cuya valoración es importante para una mejor comprensión de las características físicas y del comportamiento mecánico del mismo.

7.3.1 Carbono

En el ciclo de este elemento, los organismos *fotoautótrofos* y *quimiolitotróficos*, toman el carbono del CO_2 del aire para utilizarlo en la síntesis de la materia orgánica (proceso de asimilación o inmovilización del carbono). Los materiales orgánicos formados constituyen la fuente de este mismo elemento para los organismos *heterótrofos o quimiorganotróficos*. Estos organismos, al utilizar los componentes orgánicos como fuente de energía durante la respiración o como sustrato para la fermentación, devuelven el C a la atmósfera como CO_2, lo que corresponde a la fase de **oxidación o mineralización** del carbono (Palacios y Gama, 1994, *In* de la Cruz R., 1994).

El contenido de biomasa microbiana comúnmente se correlaciona con la cantidad de carbono orgánico y, generalmente, es estimulada por el carbono fijado en la materia orgánica adicionada como mejorador del suelo (Kanapp et. al., 1983; Schnürer et. al. 1985; *In* Tate, 1995).

7.3.2 Nitrógeno

De manera similar al carbono, el nitrógeno raramente es un elemento limitante para los microorganismos del suelo. Sin embargo, la activa incorporación de este elemento dentro de la biomasa microbiana, puede causar que el nitrógeno se convierta en una limitante del crecimiento de las plantas en los edafoecosistemas. Esto ocurre cuando la materia orgánica adicionada al suelo tiene una relación C/N alta (por ejemplo la del rastrojo de maíz que es aproximadamente de 80/1) favoreciendose la inmovilización del nitrógeno (la transformación del N-mineral en N-orgánico). Lo contrario ocurre cuando la materia orgánica tiene una relación C/N baja (de 20/1, por ejemplo cuando deriva de alguna leguminosa como la alfalfa); en este caso, se incrementa la mineralización de este elemento (la transformación microbiana del N-orgánico en N-mineral). Por otra parte, la sobresaturación de agua en un suelo, que propicia la anaerobiósis, ocasiona la pérdida del N mineral del suelo (NO_3) por denitrificación, como los NO, N_2O o N_2, que escapan a la atmósfera. Esto es debido a que los microorganismos anaeróbios facultativos toman el oxigeno de los nitratos como aceptor de electrónes en ausencia de oxigeno disponible.

7.3.3 Fósforo

Los bajos requerimientos de este nutrimento por los microbios del suelo pueden ser cubiertos a través de la mineralización de la biomasa vegetal o con los productos resultantes de la solubilización de los minerales del suelo. Sin embargo, en la mayoría de los suelos el fósforo, como macronutrimento de las plantas superiores, se encuentra en concentraciones que limitan su crecimiento. El fósforo es relativamente estable en los suelos y no presenta, como en el caso del nitrógeno, compuestos volátiles o lixiviables. Sin embargo, su estabilidad resulta de una muy baja solubilidad, lo que ocasiona que, en muchos suelos, la disponibilidad de este macronutrimento para las plantas sea muy baja. Además, en los suelos de áreas tropicales, por lo general asociados con un pH ácido y concentraciones elevadas de hidróxidos de Al y Fe, con gran cantidad de cargas electropositivas se tienen, por lo general, niveles altos de retención de fósforo debido a la formación de fosfatos cristalinos o amorfos muy poco solubles (Fassbender, 1987).

7.3.4 Azufre

Aún en los suelos con los más bajos contenidos de este nutrimentos, las concentraciones son suficientes para cubrir las necesidades tanto de los microorganismos como de las plantas; este macronutrimento es el menos problemático en cuanto a su disponibilidad.

7.4 RELACIÓN DE LOS ORGANISMOS CON OTROS FACTORES AMBIENTALES

7.4.1 Humedad

La humedad del suelo se reconoce como el agua presente en el espacio poroso (Doran et.al., 1988;*In* tate, 1995). En la Ciencia del Suelo, ésta se cuantifica en función de la fuerza de succión necesaria para extraer esa cantidad de agua de los poros del suelo, simulando la fuerza de succión de las plantas. Los valores más comunes sobre el agua potencial, encontrados en la literatura de la Microbiología del suelo, es la humedad a 0.3 bares llamada "capacidad de campo". El agua, además de ser un medio esencial para el crecimiento de los organismos, es un elemento primario para las reacciones de hidrólisis. Influye directamente en el intercambio de gases a nivel de los poros del suelo; en la disponibilidad de nutrimentos y en la temperatura del suelo.

Los microbios del suelo existen en un sistema mixto aire-agua, en donde el desplazamiento de uno u otro elemento depende, en gran parte, de la tasa de la respiración microbiana para producir micrositios anóxicos en el perfil del suelo. Cuando la humedad se aproxima o excede a la "humedad de capacidad de campo", el porcentaje de espacio poroso lleno de agua (grado de saturación) o de aire tiende a ser un mejor indicador de la actividad microbiana aeróbica vs. anaeróbica, que el contenido de agua o agua potencial (Tate, 1995). Para procesos aeróbicos, la actividad máxima es detectada cuando el contenido de agua es de alrededor del 60%; abajo de este nivel el agua limita la actividad microbiana; aparentemente debido a que reduce la disponibilidad de oxígeno. La tolerancia a niveles restrictivos de humedad varia tanto entre los grupos microbianos mayores del suelo, como entre especies individuales. Generalmente, las bacterías son indicadores más exactas que los actinomicetos o los hongos, ya que estos dos últimos grupos de organismos tienden a predominar en suelos secos debido, en parte, a que forman estructuras de resistencia (esporas). Dentro de las bacterias, hay un gradiente de tolerancia. Por ejemplo, el amonio tiende a acumularse en suelos secos debido a que las bacterias amonificantes son menos sensibles a niveles bajos de humedad que las bacterias nitrificantes.

7.4.2 Aeración

El papel principal del oxígeno molecular (O_2) es como aceptor de electrónes, con el cual se obtienen las tasas más elevadas en la producción de energía y, por lo tanto, los rendimientos celulares más altos durante la oxidación, teniendo como productos finales CO_2 y agua. Con excepción de los suelos muy frecuentemente inundados, en la mayoría de los suelos predominan los microbios aeróbicos, particularmente en los horizontes superficiales. La tensión del O_2 es controlada por las tasas de difusión de los gases así como por la actividad respiratoria de la biota. Como el proceso de difusión es relativamente lento puede ocurrir, con frecuencia, que el consumo de este gas sea mayor que la tasa de restitución.

Indirectamente, la humedad del suelo y la concentración de materia orgánica metabolizable, limitan la cantidad oxígeno en el suelo. Esto es que, a mayor contenido de humedad en el suelo corresponde un menor contenido de O_2; del mismo modo, la incorporación de materia orgánica fácil de descomponer por los microorganismos resulta en una disminución del oxígeno libre, desarrollándose condiciones reductoras.

7.4.3 Concentración de iones hidrógeno en la solución del suelo (pH)

La mayoría de los suelos hasta ahora estudiados caen dentro de un intervalo de pH de 5.5 a 7.5. Los suelos ácidos, predominantes entre los suelos del mundo, están especialmente ejemplificados por los suelos forestales tanto de zonas tropicales como templadas. La acidificación es el problema ambiental principal de los suelos neutros de las regiones templadas. En suelos ácidos la microflora fúngica (hongos filamentosos) es notablemente mayor que en los neutros, ya que la flora bacteriana es menos competitiva en los suelos ácidos. La concentración de nutrimentos y la toxicidad de los substituyentes ambientales, está indirectamente relacionada con la acidez del suelo. Algunos minerales traza son más solubles a pH bajo (por ejemplo los de Fe y Mn) mientras que otros se precipitan en un medio ácido (como el Mo).

Por otra parte los ácidos orgánicos, producidos en altas concentraciones, pueden ser tóxicos para el crecimiento microbiano. De ahí que la acumulación de estos ácidos, bajo condiciones de anaerobiósis, podría ser el mecanismo que limita la actividad microbiana y, por lo tanto, contribuir a la acumulación de materia orgánica en los suelos pantanosos. Finalmente, un efecto indirecto de la acidez en la actividad biológica se relaciona con la solubilización potencial de compuestos tóxicos. Tal es el caso del aluminio, el cual se encuentra en un mayor grado de disponibilidad para los organismos bajo condiciones ácidas.

7.4.4 Temperatura

La mayor resistencia a temperaturas extremas entre entidades vivientes se encuentra en la comunidad microbiana. Las temperaturas que resisten los microorganismos del suelo fluctúa de 0 a 70° C. No obstante, cuando la temperatura del suelo desciende más allá del congelamiento resulta en un significativo descenso de las poblaciones microbianas. Aunque la causa de la muerte celular no es el congelamiento en si, sino que el factor letal parece estar asociado con el deshielo lento del suelo ya que, cuando éste ocurre, se forman cristales de hielo en la célula microbiana y se rompe la integridad celular.

La sensibilidad también se relaciona con el estado de crecimiento; por ejemplo, en los suelos recién cultivados una mayor población microbiana declina debido al congelamiento que en aquellos suelos inactivos. Se ha notado una sensibilidad diferencial en la población microbiana del suelo, por ejemplo; en la población bacteriana la reducción fue mayor (92%) que la de los actinomicetos (33%).

Con base en la tolerancia a la temperatura, se han establecido tres clases de microbios: Psicrofílicos, cuyo óptimo de crecimiento se alcanza a menos de 20° C; Mesofílicos, los que crecen mejor entre 15 y 45° C y los termofílicos, los que son activos a temperaturas mayores a 45° C. Algunos psicrofílicos se pueden encontrar en la mayoría de los suelos, con excepción de los suelos árticos o antárticos en los cuales son dominantes; los mesofílicos constituyen el grueso de la comunidad microbiana del suelo. En relación a los termofílicos, se pude considerar que la mayoría de los suelos contienen algunos de ellos, aún en aquellos suelos que nunca alcanzan temperaturas tan altas. Esta clasificación nos da una idea de la gran adaptabilidad de los microbios del suelo, que asegura la existencia de una actividad metabólica a través de un amplio intervalo de temperaturas.

Generalmente, la actividad biológica del suelo se incrementa a partir o cerca de los 0° C hasta un máximo cercano a 70° C. La tasa de incremento ha sido representada por varios modelos matemáticos. Entre estos están el de *Arhenius* y el Q_{10}. El último es, quizá, el más comúnmente usado para los estudios microbiológicos del suelo. El Q_{10} es igual a la tasa de reacción a una temperatura dada, dividida por la tasa de la temperatura dada menos 10° C. Es decir: $Kt\ Q_{10} = Kt - 10$. Los valores de Q_{10} para los procesos biológicos fluctúan de 1.5 a 3.0 con una moda de aproximadamente 2.0. En general, si el Q_{10} es mucho mayor que 3.0, significa que una variable ambiental, aparte de la temperatura, está controlando la tasa de la reacción. (Tate, 1995).

7.5 LA MATERIA ORGANICA DEL SUELO

Este importante constituyente del suelo, consistente de restos de plantas, animales y residuos microbianos en diferentes estados de descomposición, representa la fuente principal de nutrimentos para los microorganismos del suelo. Después del proceso microbiológico de la mineralización, también se convierte en una de las fuentes fundamentales de nutrimentos para las plantas.

7.5.1 El humus

Es la fracción más fina y estable de la materia orgánica del suelo (MO). Esta formado por un conjunto de compuestos orgánicos coloidales de color oscuro. Químicamente, está constituido principalmente por: carbohidratos, grasas, aceites, proteínas y ligninas,. Durante el proceso de su formación (humificación), la microbiota participa en dos etapas:

a) **Degradación** de la MO fresca; al final de la cual se ha perdido todo vestigio de organización celular,

b) **Síntesis** de moléculas orgánicas de peso molecular generalmente elevado.

Además de los microorganismos, la meso y macrofauna del suelo (como son: lombrices, moluscos y artrópodos) son de una gran importancia ecológica ya que participan en la degradación de la MO y en su transformación como reservorio de nutrimentos. El humus dirige la acción de ciertos procesos, forma complejos con muchos elementos, como el hierro, aluminio y calcio, y con las arcillas, confiriendo ciertas propiedades al suelo. En clima templado, el humus desempeña un papel esencial en la alteración de los materiales preexistentes (Duchaufour, 1984).

El proceso de la **humificación** está aún lejos de ser entendido totalmente. Sin embargo, las teorías más modernas consideran que los ácidos húmicos, fúlvicos y las humínas del suelo, se forman a partir de la degradación de los productos fenólicos, entre ellos la lignina, así como de otros productos de la descomposición de los residuos orgánicos. Estos últimos son significativamente modificados por la acción microbiana y/o a través de una condensación química exídativa. Los factores ambientales que más influyen en la humificación son los mismos que afectan la actividad microbiana en el suelo como: la aeración, la humedad, el pH y la temperatura. Ocurre generalmente a temperaturas altas, sin embargo, aún cuando la temperatura ambiental sea baja, la actividad microbiana produce una reacción exotérmica que aumenta la temperatura del suelo. Entre los factores químicos, influyen la relación C/N y la presencia de ciertos cationes y coloides inorgánicos. En las zonas de clima cálido húmedo la influencia de la humificación, como factor de alteración, no es tan marcada. Bajo estas condiciones climáticas, es de mayor relevancia la hidrólisis de los minerales. No obstante, existen intergradaciones entre cada uno de los procesos, dependiendo de los cambios climáticos particulares, pudiendo coexistir, en mayor o menor medida, varios procesos.

Una buena *aeración* y condiciones muy *poco ácidas*, que determinan una fuerte actividad biológica, producirán una rápida descomposición de la hojarasca, lo que permite que en un período de uno o dos años se forme el humus denominado **MULL mesotrófico**. En estos suelos la capa de hojarasca que se forma en el otoño es delgada y desaparece casi completamente en el verano, desarrollándose un horizonte A_1 de poco espesor. Por otra parte, el **MULL carbonatado**, característico de un suelo calizo, se origina de una descomposición menos rápida de la hojarasca, desarrollándose un horizonte A_1 oscuro de bastante espesor. En los suelos derivados de cenizas volcánicas puede formarse un **MULL ándico**, a partir de una descomposición rápida de la hojarasca, formándose un horizonte A_1 de espesor importante.

Por el contrario, bajo condiciones *fuertemente ácidas*, con poca actividad microbiana o cuando la materia orgánica vegetal es difícil de biodegradar debido a relaciones C/N muy altas, se requieren de 10 a 20 años para que se forme un horizonte orgánico, denominado O_1 (c.f. Figura 11-A). El cual está constituido de restos orgánicos aún estructurados y da origen al humus **Mor,** característico de los suelos forestales. El humus **Moder** se considera un **Mor** atenuado, con características intermedias entre el **MULL** y el **Mor** (Duchafour, 1984).

7.5.2 Relación C/N

Se refiere a la proporción en que se encuentran estos dos elementos en la materia orgánica del suelo. Su importancia radica en su relación directa con la mineralización de la materia orgánica y, por lo tanto, con el proceso de humificación. Cuando la relación es mayor de 30/1, la mineralización disminuye hasta llegar a ser nula, debido a que los microorganismos no disponen del N suficiente para la síntesis de sus enzimas. Para que un sustrato orgánico con esta proporción sea mineralizado, los microorganismos tomarán el N disponible del suelo; es decir, realizarán la **inmovilización** de este nutrimento, estableciéndose una competencia por el nitrógeno con las plantas.

7.6 INFLUENCIA DE LA MATERIA ORGANICA EN LAS CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES DEL SUELO

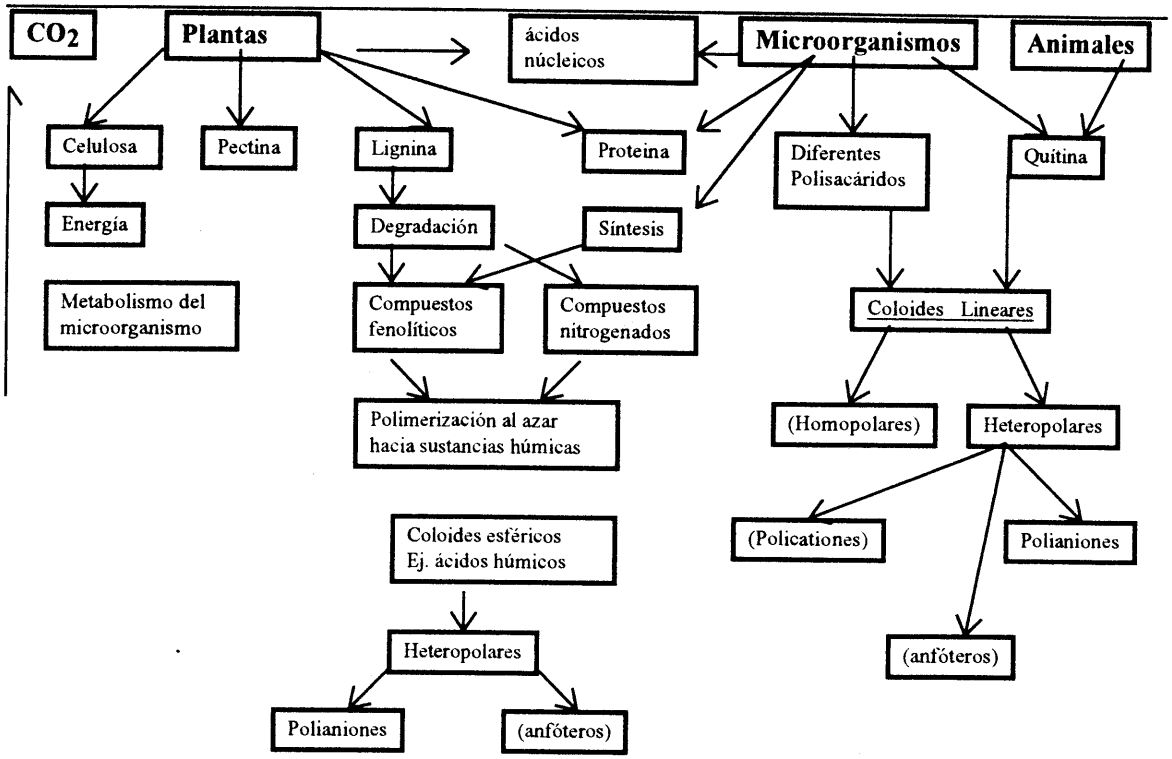
La estructura del suelo es el resultado de las interacciones, principalmente, entre los coloides inorgánicos (tales como los minerales arcillosos o los sesquioxhídratos, los cationes polivalentes) y los coloides orgánicos (fracciones de materia orgánica del suelo). La expresión "Fabrica del suelo" se refiere al tipo de arreglo espacial y orientación de las partículas y poros del suelo, según se observa en secciones delgadas para estudios micromorfológicos del suelo.

Las características de la estructura del suelo dependen de: (1) los factores edafoclimáticos que condicionan las reacciones químicas y la actividad microbiana; (2) la composición química y propiedades físicas de los coloides inorgánicos del suelo y (3) las propiedades de algunas de las fracciones de la materia orgánica, las cuales se deben a su estructura química. En relación a los principios sobre la síntesis de las substancias húmicas, El diagrama de la figura 12 ilustra la formación de las principales fracciones poliméricas lineales de la materia orgánica del suelo.

Las substancias de alto peso molecular juegan un papel importante en la formación de la "fabrica" del suelo. Los principales constituyentes de alto peso molecular, y por tanto de mayor influencia, de las plantas son: celulosa, pectina, ligninas, proteínas y, en menor cantidad, los ácidos nucléicos. De éstos, la celulosa es usada en el metabolismo de los microorganismos del suelo transformando, una gran parte, hasta dioxido de carbono como metabolito; las pectinas de las plantas son poco más o menos fáciles de descomponer por los microorganismos. Además de proteínas y ácidos nucléicos, algunos microorganismos contienen quitina o sintetizan otros polisacaridos de acuerdo a su especie.

Los animales contribuyen poco con fracciones de alto peso molecular debido a que la mayoría de sus compuestos corporales, de este tipo, son utilizadas por los microorganismos para su metabolismo. No obstante, la quitina es un polisacarido, en gran parte de origen animal, ya que también lo sintetizan los hongos. Este polisacarido se encuentra en el exoesqueleto de los artrópodos y se incorpora al suelo en cantidades importantes.

FIGURA 12 : TRANSFORMACIONES DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES DE ALTO PESO



MOLECULAR DE LOS ORGANISMOS (FAO., 1977)

Los ácidos húmicos contienen nitrógeno proveniente de la glucosamina que es la unidad química estructural de la quitina. Los diferentes polisacaridos formados durante el metabolismo microbiano, entre ellos la quitina, son coloides lineares. La mayoría son aniones heteropolares. Algunos de ellos, tienen propiedades anfóteras cuando, como por ejemplo la glucosamina, son constituyentes de cadenas de alto peso molecular. La importancia de la quitina en el suelo radica en el hecho de que incrementa la persistencia otras substancias de alto peso molecular; como se ha demostrado al sintetizar el modelo de ácido húmico con C^{14} en presencia de glucosamina, en este caso, la evolución del CO^2 marcado decrece significativamente. Es decir, disminuye la mineralización de estas substancias asegurándose, con ello, su mayor persistencia en el suelo.

Además, los materiales filamentosos tales como las hifas de hongos y los pelos radicales de las plantas contribuyen a la formación de la *fabrica* del suelo. Un ejemplo son los hongos filamentosos de vida libre del suelo, y los simbióticos que forman la micorriza arbuscular en las raíces de la mayoría de las plantas, los cuales forman un micelio capaz de envolver las partículas del suelo formando agregados estables, (Burn and Davies, 1986). Se ha podido constatar como las plantas micorrizadas creciendo en dunas producen cinco veces mas agregación que aquellas plantas que, teniendo la misma biomasa, no tienen micorriza (Sutton and Sheppard, 1976).

Actualmente, se sabe que el micelio de los hongos micorrízicos arbusculares no solamente agrega las partículas del suelo físicamente sino que, además, lo hace a través de polisacaridos amorfos secretados por las mismas hifas (Burns and Davies, 1986).

7.6.1 Efectos de los polímeros en relación a la "Fabrica" del Suelo

7.6.1.1 Coloides esféricos del suelo (ácidos húmicos)

En los suelos arables de clima templado, aproximadamente el 0.2 % de su peso corresponde al carbono de los ácidos húmicos. Mediciones físico-químicas han demostrado que los ácidos húmicos consisten de partículas de forma globular, heteropolares y con una carga negativa. Estas partículas forman micelas que aumentan su tamaño al incrementarse la concentración de iones hidrógeno (Flaig et al., 1975).

Tanto la agregación como la dispersión de los ácidos húmicos, al ser influenciadas por el valor del pH podrían apreciarse, en principio, con el microscopio electrónico. En un medio alcalino ($pH \approx 8$) los ácidos húmicos se dispersan, casi completamente, en partículas aisladas; mientras que en condiciones de acidez ($pH \approx 3.5$) se produce su agregación. La carga negativa de los ácidos húmicos se debe a los grupos carbóxilos ácidos y a los hidróxilos fenólicos. Las investigaciones realizadas con substancias modelo, permiten asumir que los grupos amino (NH_2), presentes en los ácidos húmicos, pueden contribuir con algunas propiedades anfotéricas. Al incrementarse el contenido de nitrógeno, las partículas húmicas, que tienen aspecto de esponja, tienden a ser mas compactas y menos hidratadas.

Las interacciones entre los coloides inorgánicos y orgánicos del suelo son importantes factores para la estabilización de los agregados y, por ello, para la productividad del suelo (Theng, 1974; *In* FAO, 1978). El efecto de agregación es más fuerte con los polisacaridos sintetizados por los microorganismos que con aquellos polisacaridos aislados del suelo. En estos procesos de interacción coloidal, los policationes (tales como el calcio, y los sesquioxihidratos, principalmente de hierro y aluminio) así como el ácido silícico coloidal, juegan un papel importante.

Las investigaciones realizadas sobre la formación de complejos entre ácidos húmicos marcados con C^{14} y montmorillonita cargada con diferentes iones, han permitido encontrar que la cantidad de ácidos húmicos adsorbidos en la superficie, decrece en la hilera que tiene Fe^{+++} montmorillonita, H^{+} montmorillonita y Ca^{++} montmorillonita. Estas observaciones se hicieron por extracción con los solventes clásicos (hidróxido de sodio y pirofosfato), encontrándose que los complejos Ca^{++} son mas estables que los H^{+} y estos, a su vez, mas que los Fe^{+++}. Los complejos formados con minerales arcillosos de triple capa son mucho más fuertes que los formados con arcillas de doble capa.

7.6.1.2 Coloides lineares del suelo (polisacaridos y polielectrolitos)

Estos son el otro tipo de substancias de poco más o menos alto peso molecular, las cuales son principalmente polisacaridos sintetizados por microorganismos del suelo. Estas substancias, que constituyen del 5 al 20% del total de substancias orgánicas presentes en el suelo son, en su mayoría, polianiones hidrosolubles o dispersables. Un ejemplo son: el ácido algínico, las pectinas, levanas y dextranas sintetizadas, entre otras bacterias, por ***Bacillus subtilis y Bacillus mesentericus.***

7.7 INDICES RELACIONADOS CON LA INFLUENCIA DE LA VEGETACION EN EL DESARROLLO DE LOS SUELOS

7.7.1 Indice de Crecimiento Vegetal, ICV

Señala la influencia del clima sobre el crecimiento de las plantas (Papadakis, 1980). Es útil para definir si el clima es propicio para un desarrollo importante de vegetación, el cual se relaciona directamente con el grado de desarrollo de los suelos e inversamente con la susceptibilidad a la erosión de los mismos. Cabe hacer notar que este valor es estimativo ya que no considera a otros factores formadores del suelo.
Fórmula:

$$ICV = 1 / [(1/10)^{0.1T} + 10^{0.1t}/10^5 + 0.5/10^{0.5HA} + 1/10^2)] \times (12/d)^{0.75}$$

donde:
T es la temperatura máxima media anual
t es la temperatura mínima media anual
HA es el índice hídrico, relacionado al agua almacenada en el suelo más la precipitacion mensual, dividido por la evapotranspiración.
d es la duración del día en horas.

7.7.2 Indice de Descomposición de la Materia Orgánica, IDMO

Bajo condiciones údico-ústicas (templado húmedo-seco), se considera que el IDMO aumenta en 1.5 puntos por cada variación de 5°C en la temperatura ambiental (FAO, 1980).
Lo que refleja el que, a temperaturas más altas, se presente mayor descomposición de la materia orgánica (clima tropical). Este índice se relaciona con la degradación biológica del suelo.

7.7.3 Indice de Cobertura Vegetal, Cove

La densidad de cobertura vegetal se estima en valores porcentuales a partir de cartas o fotografías aéreas. A estas proporciones se les pueden asignar valores llamados "paramétricos" (FAO, 1980), de acuerdo a la tabla 9, relativos al porcentaje de cubrimiento y tipo de vegetación (FAO, 1980).

TABLA 9 : PORCENTAJE DE CUBRIMIENTO DEL SUELO

Vegetación	0 - 1	1 - 20	20 - 40	40 -60	60 - 80	80 -100
Praderas, pastos y pastizales	0.45	0.32	0.20	0.12	0.07	0.020
Bosque con sotobosque apreciable	0.45	0.32	0.16	0.18	0.01	0.006
Bosque sin sotobosque apreciable	0.32	0.32	0.20	0.10	0.06	0.010
Estepa (sin árboles)	1.00	0.70	0.50	0.30	0.15	0.050
Sabana (con árboles)	1.00	0.70	0.40	0.25	0.10	0.030
Bosque sabanero	1.00	0.60	0.30	0.20	0.10	0.010
Monte alto	0.90	0.50	0.30	0.15	0.05	0.001

7.8 DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DEL SUELO

Se refiere a la pérdida gradual de la materia orgánica del suelo, cuyas consecuencias principales son la degradación física, la pérdida de nutrimentos y el aumento de la escorrentia y de la erosión. Aunque la pérdida de la materia orgánica también puede ocurrir por erosión, en este apartado solo se considera la pérdida por mineralización de la materia (FAO, 1980).

Desde un punto de vista práctico, se establece la distinción entre la materia orgánica no resistente u ***hojarasca*** (correspondiente a todos los residuos orgánicos recientes); y la materia orgánica resistente o ***humus***, es decir, aquella que ha pasado por los procesos de degradación

y transformación microbiana y que se ha incorporado al suelo. Esta última está constituída por substancias estables de alto peso molecular.

La degradación biológica por mineralización se origina generalmente por el manejo inadecuado de los suelos, principalmente tropicales, los que sin tener una aptitud agrícola, son "desmontados" o talados para su introducción al cultivo. Bajo estas circunstancias, al eliminarse la vegetación primaria (fuente natural de materia orgánica para el suelo) se inicia la degradación biológica, la cual se ve favorecida por las condiciones climáticas del trópico que propician tasas muy altas de la mineralización del carbono.

7.8.1 Factores a considerar durante la Evaluación de la Degradación Biológica (FAO, 1980)

- **Clima**

La descomposición de la materia orgánica es función de la actividad microbiológica la cual, a su vez, depende de la temperatura y de la humedad del suelo. Para la estimación de este factor se ha adoptado el siguiente índice (modificación del índice de Koept, 1953) calculándose una velocidad de descomposición de 2.9 entre 10 y 20°C:

$$K_2 = \frac{1}{12}\sum_{1}^{12} e^{0.1065t}\left(\frac{P}{PET}\right) \qquad \text{con } P<PET \text{ (FAO, 1980)}$$

donde:

K_2 es la velocidad de descomposición del humus en porcentaje anual, también llamado coeficiente de mineralización,
t es la temperatura media del aire durante el mes,
P es la precipitación,
PET es la evapotranspiración potencial

Si P>PET, entonces P/PET = 1
Si t < 0, entonces t = 0

La velocidad de descomposición del humus en porcentaje anual K_2, es igual al coeficiente de mineralización del humus de Henin (Henin y Dupuis, 1945; *In* FAO, 1980), según el cual la relación de cambio del contenido de humus del suelo es:

$$dB/dt = K_1 m - K_2 B$$

donde: K_1 es el coeficiente de humificación,
K_2 es el coeficiente de mineralización,
m es la adición anual de materia orgánica fácilmente degradable, (incluidos los residuos vegetales y el estiércol),
B es el contenido de humus del suelo en equilibrio.

Y por consiguiente, el contenido de humus en equilibrio es:

$$B = m\,(K_1/K_2)$$

- **Suelo**

La velocidad de descomposición varia según: (i) la textura del suelo (la descomposición es más rápida en los suelos arenosos que en los arcillosos); (ii) la naturaleza de la materia orgánica (particularmente en lo relativo a su relación C/N o al contenido de ácidos húmicos y fulvicos); (iii) el pH; (iv) el porcentaje de carbonato de calcio y, para los suelos hidromórficos, (vi) según el contenido de agua superior a la capacidad de campo. Las unidades de suelos se pueden clasificar de acuerdo con su tipo u horizonte o capa arable original en: **mólico, úmbrico** y **ócrico**. La pérdida anual de materia orgánica dependiente del contenido de carbonato de calcio, se calcula por el coeficiente de Remy (Remy y Marin-

$$K_2 = \frac{1200}{(A+200)(C+200)}$$

Lafleche, 1974; *In* FAO, 1980):
donde: A es el contenido de arcilla (%)
C es el contendido de $CaCO_3$ (%)

Como ejemplo, las rendzinas tienen un coeficiente pequeño de descomposición.

- **Topografía**

Las características del relieve influye en la temperatura y humedad del suelo; no obstante, el ángulo del declive tiene poca influencia en la degradación biológica. La altitud se toma en cuenta por el índice climático, en razón de su efecto sobre la temperatura.

- **Factor humano**

Los residuos de cada cultivo se descomponen a velocidades determinadas según sea su relación C/N; mientras que la vegetación natural y algunos cultivos influyen en la temperatura superficial del suelo, en función del sombreado que puedan proporcionar al mismo; a mayor sombreado en el suelo menor velocidad de la descomposición de la materia orgánica.

OBSERVACIONES:

1. Las características hidromórficas y, por consiguiente, la falta de aeración, disminuyen considerablemente la velocidad de descomposición del humus.
2. La reacción del suelo, dentro de una escala de valores de pH de 5.0 a 7.5, tiene poco efecto en la degradación biológica; sin embargo, en los suelos sulfatados (ácidos) y en los sódicos (básicos) la velocidad de la descomposición biológica se encuentra notablemente disminuida.

8 FACTOR TIEMPO

Con excepción de los suelos antrópicos (Antrosoles) los que, con frecuencia, sólo necesitan de unas cuantas semanas o meses para constituirse, la formación de un suelo es un proceso muy lento que requiere cientos, miles y hasta millones de años. Como eso supera con mucho a la vida humana, resulta imposible hacer afirmaciones categóricas acerca de las diversas etapas del desarrollo de los suelos.

Los cambios periódicos en el clima y la vegetación introducen otra complicación la cual a, menudo, desvía las rutas de la formación del suelo en una u otra dirección. Por tanto, todo lo que se dice acerca del tiempo como factor de formación del suelo es en parte deducción. No obstante, para su estudio se, usan pruebas indirectas basadas en datos botánicos, zoológicos, geológicos y geomorfológicos. La información botánica se puede obtener a través de estudios paleontológicos, en particular del polen; de turbas y, a veces, del suelo mismo. Los datos zoológicos y geológicos proceden de fósiles encontrados *in situ* que, generalmente, son indices estratigráficos. En ciertos casos, para establecer la edad de un suelo, se ha recurrido al empleo de algún método isotópico de fechado como el del Carbono 14 (C_{14}).

8.1 DINAMICA TIEMPO - SUELO

No todos los suelos han tenido su desarrollo durante el mismo intervalo de tiempo. La mayoría de ellos, iniciaron su desarrollo en diferentes puntos cronológicos dentro de los últimos 100 millones de años.

Es posible considerar el tiempo, al igual que el espacio, como un factor continuo y, sin embargo, reconocer un "tiempo cero" para un suelo dado. "cero" es el punto en el tiempo en que se completa un suceso catastrófico, desde el punto de vista edafológico, con el que se inicia un nuevo ciclo en el desarrollo de los suelos. La catástrofe puede ser un cambio repentino en la topografía de la superficie de la tierra, o del nivel freático, causado por un levantamiento geológico o la inclinación de una masa de la litósfera, el cambio rápido de una ladera que se retrae, debido a la erosión geológica (Ruhe, 1960) o la formación o erosión acelerada de las tierras, por iniciativa humana.

Puede producirse un cambio repentino de la vegetación por el talado de un bosque en las operaciones madereras, o por la introducción de cultivos agrícolas, o al quemar un bosque y remplazarlo con una pradera. El cambio climático repentino puede ser del macroclima (Bryson y Wendland, 1967) o del microclima. El microclima varía con las condiciones de la cubierta vegetal.

Un cambio en el material parental puede deberse al emplazamiento de un depósito o formación importante como: loess, cenizas volcánicas, arena u otros materiales coluviales o un flujo de lava; o bien por la adición de fertilizantes, sales provenientes de agua salubre y/o marina o el polvo transportado por el viento.

Algunos horizontes de suelo se diferencian antes que otros, en especial los superficiales ya que estos, en unas cuantas décadas, pueden formar depósitos no consolidados. Los horizontes intermedios se diferencian con mayor lentitud, particularmente cuando se requiere para ello una cantidad considerable de translocación (migración de elementos y acumulación en un horizonte). Para el desarrollo de algunos de estos horizontes se requieren de 4000 a 5000 años. Otros pueden necesitar periodos aún más largos. La intemperización de la roca que da origen a un Ferralsol, por ejemplo, puede requerir de más de un millón de años. Las pruebas de esa afirmación se encuentran en el hecho de que los Ferralsoles se localizan sólo en tierras muy viejas que han estado expuestas a la intemperización, cuando menos, desde el Periodo Terciario. Estas condiciones, necesarias para la formación de Ferralsoles (Oxisoles), no se reúnen en la historia geológica de México lo que explica, en buena parte, el hecho de que estos suelos sean tan raros en el país.

8.2 EDAD DE LOS SUELOS

Para el estudio del ciclo geomorfológico, se ha aplicado a los suelos la terminología de Davis (1902), es decir, "juventud", "madurez" y "ancianidad" (senilidad). Según el criterio de este autor, algunos suelos como los: Fluvisoles, Arenosoles, Vertisoles, Regosoles, Andosoles y Cambisoles que existen en México, se consideran en su mayoría "jóvenes". Los suelos "maduros" son aquellos que están en equilibrio con su medio ambiente como es el caso de los: Luvisoles, Podzoles, Podzoluvisoles, Greyzems, Kastanozems, Chernozems, Calcisoles, Gypsisoles y algunos Solonetz. Finalmente, los suelos "seniles" se caracterizan, en México, por acumulaciones edafogénicas de materiales inertes, esto es sesquióxidos y minerales pesados. Se pueden considerar como suelos seniles en nuestro país a los: Acrisoles, Nitisoles, algunos Planosoles, Alisoles, algunos Lixisoles y, desde luego, los escasos Ferralsoles que han sido detectados en el territorio nacional.

En relación a su edad, los destinos probables de un suelo son:

- seguir indefinidamente como suelo zonal* (suelo que corresponde, en su distribución, con los cinturones climáticos), cuyo perfil se altera y se forma con la misma rapidez con que la erosión actúa;
- transformarse en un suelo senil;
- convertirse en material parental de otro suelo, debido a cambio rápido y relativamente grande del clima o de la biota;
- quedar enterrado o, finalmente
- desaparecer totalmente, debido a la erosión.

En el primer caso, el tiempo deja de tener importancia y el suelo nunca se vuelve senil. En el segundo caso, el tiempo deja de tener importancia después de alcanzar la etapa de la senilidad. Y, en el tercero, una sucesión de suelos puede reflejar una sucesión de plantas.

Es importante observar que algunos perfiles de suelos sufren una disminución en la permeabilidad con el tiempo; como ejemplos tenemos: los Pseudogleys de Europa y Planosoles del centro de Estados Unidos.

8.2.1 Métodos Directos para Determinar la Edad del Suelo

Los métodos más comunes que se emplean para el fechamiento de suelos se basan en los siguientes aspectos: (1) el fechado absoluto de los horizontes; (2) índices de desarrollo; (3) modelos experimentales.

8.2.1.1 Fechado absoluto de los horizontes de suelos

Los métodos de fechamiento absoluto proporcionan la edad del suelo que puede corresponder a cualquiera de las etapas de su formación (juventud, madurez y senilidad). Este tipo de fechamiento suele ser muy útil para ciertos estudios como herramientas de interpretación y correlación y son de gran importancia en la estratigrafía de suelos y paleosuelos. Entre los principales métodos de fechamiento absoluto directo se encuentran los siguientes:

- **Método de C_{14}.**

Este es uno de los métodos más comúnmente utilizados para fechar suelos. No obstante, en ocasiones, es impreciso ya que existen ciertas modificaciones naturales de las condiciones iniciales bajo las cuales se deposita el isótopo como son: la expansión de los materiales arcillosos, la translocación de la materia orgánica o su continua renovación, o bien, la contaminación por materiales ajenos al proceso formativo (más jóvenes o más antiguos).

Con este método se ha evaluado la edad absoluta de un gran número de suelos. Buol (1965) investigó con fechado de C_{14} la edad de unas capas de caliche de un suelo desértico rojo (Argid). A una profundidad de 100 cm., el suelo tenía 2300 años de antigüedad; a 150 cm., 9800 años y a 213 cm., 32000 años. Se sacó en conclusión que el caliche superior estaba relacionado con el suelo moderno y los caliches enterrados con regímenes de suelos anteriores. Del mismo modo, Chandler (1937) estudió suelos forestales y morrenas glaciales en Alaska, donde descubrió un horizonte "A" en marga limosa de 250 años, y un perfil de Espodosol (Podzol) de 25 cm de espesor, que necesitó 1000 años para formarse. En contraste, un Espodosol (Podzol), enterrado bajo turba en Irlanda del Norte, se fechó mediante técnicass arqueológicas y paleobotánica y se demostró que se había formado en aproximadamente 1000 años, durante el periodo que va del año 3000 al 2000 A.C. (Proudfoot, 1958).

Otras investigaciones han mostrado que un horizonte humífero se forma en un periodo de 600 a 1,500 años, según la naturaleza de la vegetación y la composición química del material original (Duchaufour, 1987). Los valores encontrados para la formación del mull ándico son de 4,000 años, mientras que para un Chernozem son de 1,000 años.

En lo que se refiere a los Andosoles, los valores estimados para la diferenciación del perfil son: menos de 100 años para tener un perfil C o (A)/C; de 100 a 500 años para un perfil (A)/C, A/C o A/(B)/C; entre 500 y 1,500 años para un perfil A/(B)/C; y más de 1,500 años para un perfil A/B/C. Las edades que proponen Shoji et al. (1993) son semejantes: A (húmico)/C, algunos cientos de años; A (húmico)/Bw (de color)/C, de 100 a 1000 años; A (húmico)/Bw (cámbico)/C, de 1000 a algunos miles de años; A (melánico o fúlvico)/Bw (cámbico)/C, algunos miles de años o más.

- **Método del conteo de anillos**

Un ejemplo de la aplicación de este método, es el caso de los suelos de California en los cuales se ha determinado, por medio del conteo de los anillos concéntricos del tronco de los árboles, edades de 27 a 1,200 años. Estas edades fueron obtenidas por Dickson y Crocker (1954), evaluándo los troncos de pinos ubicados en un terreno con pendiente simple de aproximadamente 5% y con una sucesión vegetativa de pinos ponderosa, en un clima húmedo con el periodo seco en verano. En el estudio se asumió que la edad del árbol es contemporánea a la del suelo que lo sustenta. Sin embargo, la edad de éste último puede ser muy diferente si se considera que los procesos edafogénicos comienzan aún antes de instalarse cualquier vegetación pionera.

- **Método de termoluminiscencia**

Se ha usado con mayor frecuencia para obtener la edad de piezas arqueológicas (Geyh y Schleicher, 1991) y, ocasionalmente, para determinar la edad de algunos suelos (Wintle et al., 1984; Hütt et al., 1993), aunque con resultados poco confiables.

- **Fechamiento U-Th de Carbonatos**

Esta técnica se basa en la relación de desequilibrio entre Th_{230}, U_{234} y U_{238} que existe en las concreciones de carbonato de origen edáfico (Ku et al., 1979). La edad estimada es de hasta 320,000 años, sin embargo, al igual que en el método de C_{14} se presenta el problema de contaminación por otras fuentes.

En la tabla 10 se presenta la estimación de algunas edades y tasas de formación de suelo (años por centímetro) de algunos perfiles y horizontes; pero su importancia es discutible, ya que las tasas pueden variar dependiendo de las condiciones locales que brindan los otros factores formadores.

TABLA 10: ESTIMACIONES DEL INDICE DE FORMACION DE SUELOS

Perfil u horizonte del suelo	Edad estima-da años	Profun-didad suelo cm	Media forma-ción año/cm	Referencia Bibliografica
Suelo: Regosol sobre cenizas volcánicas	45	5	1.3	Mohr y van Baren, 1954
Endurecimiento de un suelo tropical a laterita, después de la deforestación	35	15	2.3	Aubert y Maignien, 1949
Horizonte "A1" (Mull) en un suelo Podzólico café-gris (Podzol), formado a partir de loess intemperizado en Wisconsin.	40	7	5.7	Nielsen y Hole, 1964
Horizontes "A1" de un suelo Brumizem (Cambisol) formado de loess intemperizado en Iowa	400	33	12.0	Simonson, 1959, Arnold y Riecken, 1964.
Suelo orgánico de dos metros de grueso en una ciénega (Histosol) de Wisconsin	3000	200	15.0	
Formación de suelo podzólico en deriva glacial arenosa (10 cm. de espesor)	1200	57	21.0	Tamm y Ostlund, 1960
Solum, incluyendo un horizonte café-gris "B" textural de un suelo podzólico (Podzoluvisol) formado de loess intemperizado en Iowa	4000	100	40.0	Ardnold y Riecken 1964
Loess descalcificado al Sur de Wisconsin	8000	100	80.0	Robinson 1950,
Secuencia de horizontes A1-A2 en un suelo podzólico café-gris (Luvisol) formado de loess intemperizado en Iowa	2500	30	83.0	Parsons, Scholtes y Riecken, 1962
Solum de un suelo podzólico amarillo y rojo (Podzol) en Australia	29000	300	97.0	Butler, 1958
Solum de un metro de espesor de un suelo tropical (Ferralsol) en Africa	75000	100	750.0	Aubert, 1960

8.2.1.2 Indice de formación de suelos

En relación con las pérdida de tierras por erosión se escucha con frecuencia la pregunta: ¿Cuánto tiempo se necesita para que se forme un centímetro de suelo?. Los edafólogos no piensan en centímetros, sino en horizontes, suelos y perfiles. La diferencia en el índice de formación de suelos, rocas o depósitos no consolidados es evidente. Desafortunadamente, la determinación de la edad de los suelos y su velocidad de formación, a partir de diferentes rocas y ambientes, es un campo muy poco explorado en México.

Sin embargo, es posible estimar el tiempo de formación de los suelos por medio del conocimiento de su historia evolutiva, lo que involucra un análisis morfológico, físico, químico y mineralógico del perfil, así como de las características de los factores formadores (clima, organismos, material parental y relieve).

Los procesos de formación de suelos relacionados con la dinámica de la materia orgánica (procesos bioquímicos), donde la humificación es predominante son de corta duración y, por lo tanto, se les considera de ciclo corto (Duchaufour, 1987). A diferencia de aquellos procesos en donde impera la alteración geoquímica, los suelos son producto de procesos de ciclo largo. Sin embargo, ambos procesos (bioquímicos y geoquímicos) se encuentran relacionados, ya que en las etapas iniciales de desarrollo puede dominar un proceso de ciclo corto y la evolución posterior llevarse a cabo en un tiempo mucho mayor.

La diferenciación del perfil y el tipo de horizontes que se encuentren pueden indicar el tiempo que ha requerido el suelo en formarse (Solleiro, 1992). Además de esta información, en los parrafos siguientes, se detallan los indices más importantes de la formación de los suelos, que involucran el desarrollo de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas.

- **Color del suelo.** Según Ruhe (1965) los suelos más antiguos tienden a ser más rojos que los suelos jóvenes, aunque esto no es una regla, ya que, el proceso de rubificación (o enrojecimiento) es más acelerado en climas templados que en los fríos y secos, por lo que este criterio puede ser muy subjetivo.
- **Indice del desarrollo relativo del perfil o de Bilzi y Ciolkosz (1977).** Consiste en evaluar, en cada horizonte, aquellas propiedades que cambian con el tiempo (color, textura, estructura, consistencia, películas y límites entre horizontes) y se comparan con las del horizonte C, o entre horizontes, asignándoles un punto por cada razón de cambio. De esta manera, se obtiene un valor que representa cualitativamente el o los horizontes que han tenido un mayor desarrollo.
- **Indice de Harden.** Como en el índice anterior, Harden (1982) evalua los cambios en las propiedades del perfil, pero las comparaciones las hace con respecto al material parental y las variaciones las normaliza a una escala de 10. Una de las dificultades de emplear este índice es que el material parental, en muchas ocasiones, no está representado en el perfil, por lo que se deben hacer reconocimientos en otros sitios donde se encuentren las mismas condiciones pedogenéticas.
- **Indice de Harden modificado (Birkleland et al., 1991).** Este índice también señala, cuantitativamente, los cambios en las propiedades del suelo con respecto al material parental, asignando 10 puntos por cada razón de cambio y normalizando los valores al dividirlos entre el máximo valor de cambio. Asimismo, se suman estos valores normalizados, se dividen entre el número de propiedades consideradas y se multiplican por el espesor del horizonte. Finalmente, todos los valores de cada horizonte se suman y se obtiene el índice del desarrollo del perfil.

- **Indices mineralógicos.** Existen diversos índices relacionados con la mineralogía de los suelos, todos ellos basados en las secuencias de alteración establecidas por diferentes autores (Goldich, 1938). Otros se basan en la composición y tamaño de las arenas (Soller y Owens, 1991).
- **Indices de intemperismo.** Estos índices permiten inferir el grado de alteración, intemperismo y evolución que han alcanzado los minerales en el suelo, midiendo los relaciones molares de óxidos totales presentes en cada uno de los horizontes. Entre las relaciones más importantes se encuentran: sílice/aluminio, sílice/sesquióxidos, bases/sesquióxidos, índice de lixiviación e índice de intemperismo de Parker (Jenny, 1980).
- **Balances geoquímicos.** Tienen por objeto hacer una comparación entre la composición de cada horizonte del perfil y la del material parental, asumiendo que es homogéneo. (Krauskopf, 1979). Como muchas de las propiedades del suelo cambian con el tiempo, es necesario efectuar las comparaciones a través de un elemento invariable y, principalmente estable. Para, estos análisis se emplea el cuarzo en rocas graníticas o el aluminio (Heitier, 1975), aunque es preferible utilizar el titanio, que es más estable pero menos común que los anteriores.

8.2.1.3 Modelos experimentales

Con la aplicación de estos modelos se trata de reproducir las condiciones ambientales naturales en laboratorio, con el fin de medir la velocidad de los procesos bajo condiciones de intemperismo acelerado. Destacan en el desarrollo de técnicas experimentales los trabajos de Pèdro (1964), Robert (1970), Lohm (1989), entre otros. Sin embargo, estas investigaciones sólo representan modelos teóricos que deben ser considerados como aproximaciones a la realidad.

8.2.2 Métodos Indirectos para Determinar la Edad del Suelo

- **Fósiles**

La Paleontología y, en particular, la Palinología son disciplinas que pueden contribuir en la determinación de la edad de un suelo, asociándolo con los paleoclimas y estableciendo las fases de su evolución. El estudio del polen fósil permite reconstruir los cambios climáticos, el reconocimiento de las sucesiones floristicas y su relación directa con las etapas del desarrollo de los suelos. Sin embargo, frecuentemente, el estudio palinológico se ve limitado por la contaminación que ocurre en algunos suelos por restos polínicos alóctonos o bien por el metamorfismo que sufren los granos de polen por eventos catastróficos.

- **Fitolitos**

Estas estructuras se forman a partir de vegetales fósiles que han permanecido en el suelo. Algunos tipos de ópalo (variedad amorfa de la sílice) se relacionan con los fitolitos. Como el ópalo leñoso o xilópalo, que puede encontrarse sustituyendo piezas de madera fósil enterrada

conservando, en algunos casos, la estructura original. Los fitolitos son muy persistentes en los suelos, habiéndose encontrado algunos con una edad de hasta 13,000 años; de acuerdo a fechamientos realizados con C_{14} (Birkeland, 1984).

- **Posición estratigráfica**

El periodo de formación de un suelo puede estar determinado por su posición estratigráfica con respecto a los sedimentos y rocas que le subyacen o, en el caso de suelos sepultados, que le sobreyacen. La edad del suelo corresponde al intervalo comprendido entre la edad del material inferior y la edad del material que sepulta al suelo, aunque esto requiere considerar que los procesos pedogénicos comienzan al mismo tiempo que la formación de la roca que se encuentra debajo, y que terminan con el depósito de nuevos materiales.

- **Cronofunciones.**

El tiempo que tarda un suelo en formarse puede ser estimado con la ayuda de cronofunciones o relaciones matemáticas entre el tiempo y ciertas propiedades del suelo. Ejemplos de estas relaciones se encuentran en el trabajo de Shoji et al., (1993).

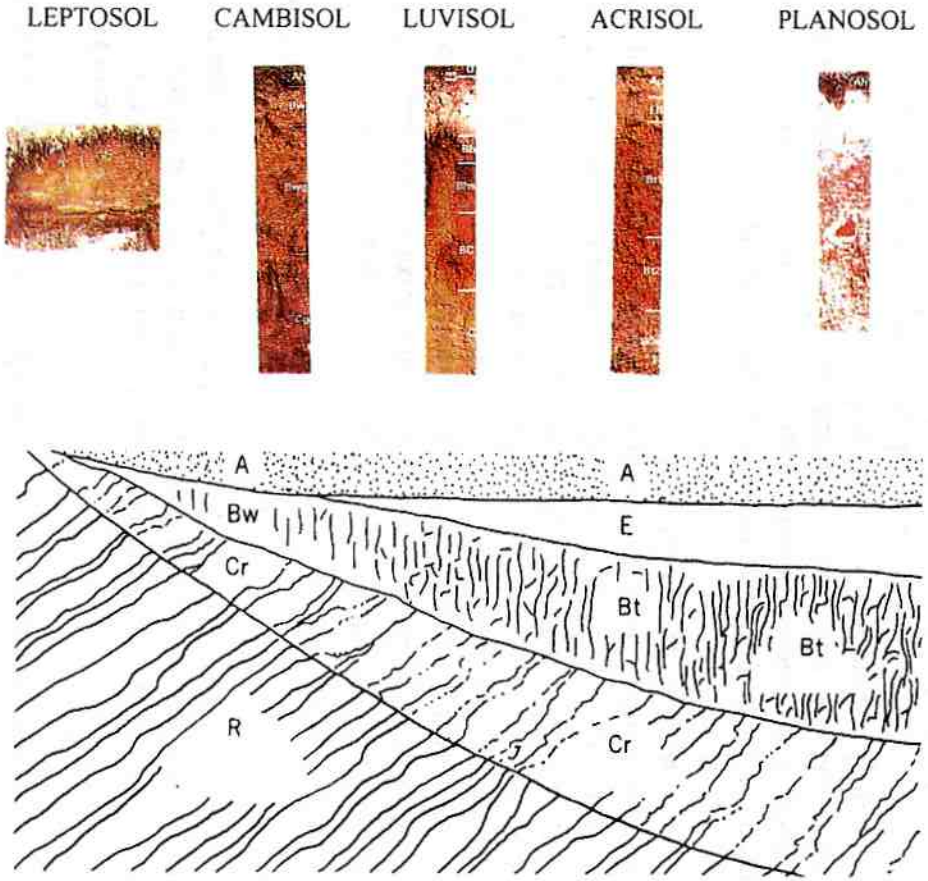
8.2.3 Edad Evolutiva de los Suelos

Para las condiciones geológicas y ambientales, tan variadas, que han caracterizado el desarrollo de los suelos de México, resulta adecuado estimar la edad evolutiva de un suelo, antes que su edad absoluta (cronológica). La edad evolutiva de un suelo se mide por el desarrollo edafogénico alcanzado. Es decir: la profundidad del suelo, el número de horizontes presentes en el perfil y el tipo de horizontes formados. Estas características se reflejan, perfectamente, en el perfil y pueden ser determinadas fácilmente en el campo. En este sentido, un suelo profundo, que muestre fuerte horizontalización y acumulación de minerales secundarios (principalmente arcillas y óxidos iluviales), indica una fuerte evolución, propiciada por una alteración edafoquímica y geoquímica significativas.

Con mucha frecuencia, la edad evolutiva de un suelo no es indicativa, necesariamente, de una edad absoluta. Como se mencionó anteriormente, la edad evolutiva se expresa en función de la morfología alcanzada por el perfil del suelo, en tanto que la edad absoluta sólo puede expresarse en años. Así, por ejemplo, un Regosol es un suelo nula o débilmente evolucionado, con una edad absoluta que puede oscilar desde unos cientos a miles de años. En contraste, un suelo tropical puede tener unos cientos de años y una evolución muy alta, debido a las condiciones medioambientales. En las zonas arídas de México, existen materiales no consolidados y muy antiguos (> 50000 años) que no han formado suelos, o éstos son del Grupo de los Regosoles.

Un ejemplo sobre lo relativo que puede ser la edad absoluta del suelo, se tiene en una zona de basaltos próxima a la población de Santiago Ixcuintla, Nayarit. Estos basaltos tienen una edad estimada en varios millones de años, sin embargo; los suelos que se han formado a partir de ellos, presentan diferentes edades evolutivas (Figura 13).

FIGURA 13: SECUENCIA DE SUELOS FORMADOS A PARTIR DE BASALTO.



Se observa que la roca (basalto) que dió origen al material parental de esta catena de suelos es similar, en todos los casos, en cuanto a su naturaleza química y mineralógica, así como en lo concerniente a su edad absoluta. Sin embargo, los suelos que se han desarrollado a partir de ella, son muy diferentes en el grado de evolución alcanzado. Esto se debe a la influencia de los factores medioambientales que han actuado, selectivamente, en el intemperismo de la roca.

9 DRENAJE DEL SUELO

Actualmente, se le da mayor importancia al concepto de drenaje como factor formador de suelos. De hecho, algunos suelos como los Solonchaks, Solonetz, Calcisoles, Gypsisoles, Planosoles y Gleysoles que, en conjunto ocupan una superficie significativa del Territorio Nacional deben, en gran parte, su desarrollo y evolución a las características del drenaje interno que prevalecen en cada uno de estos grandes grupos de suelos.

9.1 DEFINICIONES

De acuerdo al carácter multidisciplinario de esta Guía, a continuación, se hace incapie en la necesidad de distinguir entre los conceptos de permeabilidad, conductividad hidráulica y drenaje del suelo.

9.1.1 Permeabilidad

En un sentido estricto, la permeabilidad (también llamada permeabilidad intrínseca o específica) es definida como la capacidad de un medio para transmitir cualquier fluido y se expresa, a partir del experimento de Darcy, en L^2. La permeabilidad del suelo, en un sentido más amplio depende, principalmente, del tamaño y arreglo de los poros, siendo éstos determinados por la granulometría (textura), estructura, mineralogía, densidad aparente y el contenido de materia orgánica. La permeabilidad, desde el punto de vista edafológico, es la propiedad del suelo relativa a la transmisión del agua o aire, la cual está determinada por el horizonte o capa de permeabilidad más baja que exista en el perfil. En la tabla 11 se presentan algunos ordenes de magnitud y clasificación, relativos a esta propiedad (USDA, 1993).

TABLA 11 : CLASES DE PERMEABILIDAD EN LA CIENCIA DEL SUELO

Clase de permeabilidad (k)	k (cm/h)	k (m/s)
Muy lenta	< 0.15	$< 4 \times 10^{-7}$
Lenta	0.15 - 0.5	4×10^{-7} - 13×10^{-7}
Moderadamente lenta	0.5 - 1.5	13×10^{-7} - 41×10^{-7}
Moderada	1.5 - 5.0	41×10^{-7} - 13.8×10^{-6}
Moderadamente rápida	5.0 - 15.0	13.8×10^{-6} - 41.6×10^{-6}
Rápida	15.0 - 50.0	41.6×10^{-6} - 13.9×10^{-5}
Muy rápida	> 50.0	$> 13.9 \times 10^{-5}$

9.1.2 Conductividad Hidráulica

De igual manera, en un sentido estricto, la conductividad hidráulica corresponde a la constante de proporcionalidad de la ley de Darcy: aunque algunos autores la llaman también permeabilidad expresada en unidades de velocidad (L/T), es determinada tanto por las

propiedades del medio como del fluido mismo. Representa las capacidad del medio para transmitir agua, por lo que este término se emplea comúnmente en la literatura hidrológica. En el ámbito edafológico, el concepto de conductividad hidráulica saturada vertical, representa un sistema alternativo al de permeabilidad. La conductividad hidráulica depende, también, del tamaño, arreglo de los poros y los ordenes de magnitud que le corresponden (tabla 12).

TABLA 12 : CLASES DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA EN LA CIENCIA DEL SUELO

Clase de Conductividad Hidráulica (C.H.)	C.H. (μm/s)	C.H. (m/s)
Muy baja	< 0.01	$< 10 \times 10^{-8}$
Baja	0.01 - 0.1	10×10^{-8} - 10×10^{-7}
Moderadamente baja	0.1 - 1	10×10^{-7} - 10×10^{-6}
Moderada	1 - 10	10×10^{-6} - 10×10^{-5}
Alta	10 - 100	10×10^{-5} - 10×10^{-4}
Muy alta	> 100	$> 10 \times 10^{-4}$

Normalmente, los criterios de análisis de suelos se basan en las clases de permeabilidad más que en los de conductividad hidráulica. Los ordenes de magnitud en permeabilidades limitantes para el diseño de diversas obras son, según USDA, 1990:

- Basureros municipales de área: > 5.0 cm/h
- Drenaje de suelos: < 0.5 cm/h
- Riego: < 0.5 cm/h
- Terrazas (de cultivo): < 0.5 cm/h
- Desagües empastados: < 0.5 cm/h

Es importante mencionar que los valores de permeabilidad obtenidos en el campo son los más confiables, los valores obtenidos en laboratorio pueden llegar a ser hasta 100 veces mayores que los primeros. Los métodos utilizados para la medición de permeabilidad pueden encontrarse en los manuales 18 y 19, editados por la Subdirección de Agrología de la Subsecretaria de Infraestructura Hidráulica, SARH.

9.1.3 Drenaje Interno del Suelo

Es la cualidad determinada por el movimiento del agua a través de él, esto es, representa la capacidad del suelo para desalojar agua y, al mismo tiempo, para conservar un cierto grado de humedad denominado "capacidad de almacenamiento de humedad". La capacidad de drenaje y la conservación de humedad depende de: (1) la permeabilidad del suelo (textura y porosidad); (2) la posición topográfica; (3) la pendiente; (4) la profundidad del nivel de aguas freáticas (NAF) y (5) el clima.

En el drenaje se reflejan la frecuencia y duración de los periodos de saturación con agua, de ahí que la clase de drenaje del suelo se pueda inferir a partir de ciertas observaciones del perfil en el campo, como son: (1) la presencia o ausencia de moteado y su profundidad; (2) el tipo de suelo (color, naturaleza, etc.); (3) la profundidad del NAF; (4) el tipo de vegetación presente y (6) el análisis de las relaciones entre el suelo, la topografía y el clima. La determinación del drenaje interno del suelo tiene diversas aplicaciones, por ejemplo, un suelo ácido con buen drenaje y de textura fina puede presentar riesgo de corrosión para materiales de acero sin revestimiento. Desde luego, un suelo con mal drenaje limita la realización de obras como: basureros municipales de área, caminos vecinales, jardines, explotación de bancos de material, obras de riego y drenaje, pozos sépticos y lagunas de oxidación de aguas negras, entre otros.

Por otra parte, en un sentido dinámico, se entiende por drenaje del suelo a la rapidez y grado con que el agua procedente de la lluvia, el riego, el escurrimiento superficial y las corrientes superficiales es removida, por efecto de la gravedad, del suelo hacia el subsuelo. Además, la evaporación y la transpiración contribuyen de manera importante, a las pérdidas de agua. Por ejemplo, en algunas planicies del Estado de Chihuahua existen Kastanozems, casi a nivel, que no tienen ni escurrimiento, ni percolación a los estratos profundos. Sin embargo, estos suelos muestran buen drenaje debido a que el agua de lluvia puede distribuirse fácilmente dentro del suelo, y moverse hacia afuera por evaporación y transpiración, sin reducción apreciable en la aeración del material edáfico.

9.2 CLASES DE DRENAJE

En los paraffos subsiguientes, se describen algunas de las seis clases de drenaje interno que muestran los suelos que representan las unidades de FAO-UNESCO (1990).

9.2.1 Sin Drenaje Interno

El agua no pasa, absolutamente, a través de la masa del suelo. Consecuentemente, casi no existe lixiviación por lo que se tiende a la acumulación de sales. La escasa lixiviación limita la evolución del propio suelo así como su intemperización. En regiones húmedas, el nivel freático está en la superficie o muy cercano a ella durante la mayor parte del año. Esta condición de drenaje natural puede presentarse aún en suelos arenosos y gravosos pero, cuando se le drena y baja el NAF, su drenaje interno puede cambiar a moderado o llegar a ser rápido. Un ejemplo típico son los Gleysoles, incluyendose, además, las siguientes unidades: Arenosoles gleícos, Cambisoles gleícos, Lixisoles gleícos y, en general, los suelos con horizontes de Gley. En todos estos suelos son característicos los procesos de reducción que confieren a la matriz del suelo colores azules o grises.

9.2.2 Muy Lento

Cuando la lentitud del drenaje interno afecta al crecimiento de la mayoría de los cultivos de importancia de las regiones húmedas, impidiendo que alcancen su óptimo desarrollo. Esto mismo puede ocurrir con los cultivos en suelos de regiones áridas. Los suelos pueden presentar saturación con agua en la zona radical por un mes o dos. La mayoría de los suelos que tienen drenaje interno muy lento presentan moteado o manchas en casi todo el perfil, aunque algunos tienen suelos y subsuelos dominantemente grises y otros tienen horizontes superficiales oscuros, ricos en materia orgánica. En estos suelos la lixiviación es reducida y la eliminación de bases (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+} y K^{+}) es poco significativa. Esta condición de drenaje también favorece los procesos de reducción. Una capa freática alta o un horizonte impermeable, o ambos, pueden ser los responsables de un drenaje interno muy lento. Entre los suelos que, generalmente, presentan esta clase de drenaje interno estan: los Fluvisoles sálicos, las unidades con horizontes gleyicos, los suelos con capas compactadas y/o cementadas (densipanes), los suelos con plintita, y la mayoría de los Solonetz y Solonchacks (c.f. Figura 9).

9.2.3 Lento

En suelos con drenaje interno lento, la velocidad de movimiento del agua a través del suelo es menor que la que se alcanza cuando el drenaje es medio, pero es mayor a la correspondiente a suelos con drenaje muy lento. La saturación con agua se presenta por períodos de una a dos semanas, los cuales son suficientemente largos como para afectar, adversamente, a las raíces de muchos cultivos y constituye una limitación para la alteración bioquímica del suelo. Esto ocurre, particularmente, en las regiones templado húmedas, en donde la mayoría de los suelos con un drenaje interno lento tienen horizontes "A" negros o grises. El moteado o las manchas se presentan en la parte inferior del horizonte "A" o en la superior del "B", así como en las partes bajas de los horizontes "B" y "C". Este moteado es indicativo de que el suelo ha sufrido durante el año, un período de sequía y otro de humedad excesiva. Muchos suelos con drenaje interno lento tienen niveles freáticos relativamente altos o fluctuantes.

Los Vertisoles, Cambisoles vérticos, Calcisoles lúvicos y pétricos, Gypsisoles, Luvisoles vérticos, algunos Planosoles, Lixisoles y Alisoles (ambos plínticos), los Nitisoles y algunos Antrosoles, llegan a presentar uno o varios horizontes ó capas que se caracterizan por tener un drenaje interno lento (c f. Figura 9).

9.2.4 Medio

Esta clase de drenaje interno no es tan libre como el rápido, pero lo es más que el drenaje lento. Cuando se satura con agua, ésta dura solo pocos días; lapso siempre menor al requerido para dañar las raíces de las plantas de cultivo.

El drenaje interno medio se acerca mucho a las condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos más importantes, bajo condiciones de clima húmedo. La mayoría de los suelos con drenaje interno medio no presentan moteado ni manchas en los horizontes "A" y, tampoco, en la mayor parte de los horizontes "B". En estos suelos, la *eluviación* (lavado de bases, sílice y hierro), así como su *iluviación* (acumulación) resultan evidentes. Consecuentemente, el intemperismo y la evolución del suelo son relativamente rápidos.

Los Regosoles, Arenosoles, Cambisoles, Kastanozems, Phaeozems, Luvisoles, Acrisoles y Ferralsoles, normalmente, presentan un drenaje interno medio que los hace muy valiosos, desde el punto de vista agrícola; con excepción de las unidades que muestran horizontes de gley, capas compactadas ó propiedades vérticas (c.f. Figura 9).

9.2.5 Rápido

Comparado con el drenaje muy rápido, en el drenaje rápido los horizontes restringen un poco el movimiento del agua a través del suelo. La saturación con agua está limitada a unas pocas horas. El drenaje interno es ligeramente excesivo para el crecimiento de los cultivos más importantes de la región. La lixiviación es intensa, así como la tendencia a la acidificación. Generalmente, la intemperización de los minerales primarios es rápida.

Muchos Regosoles, Arenosoles y Antrosoles de texturas gruesas (arena migajosa - grava) presentan esta clase de drenaje, en todo el perfil o en algunas capas que no muestran consolidación ó compactación.

9.2.6 Muy Rápido

La velocidad del movimiento del agua a través del perfil es muy rápida debido, principalmente, a su alta porosidad. De este modo, el suelo nunca llega a saturarse con agua. El drenaje interno es demasiado rápido para propiciar el crecimiento óptimo de la mayoría de los cultivos importantes. La mayoría de los suelos con drenaje interno muy rápido no presentan, las características manchas o moteado que sugieren un drenaje restringido. En general, la lixiviación es más severa llegando, en algunos casos, a constituir horizontes llamados *eluviales* (como es el horizonte E). Son suelos ácidos, pobres en bases y ricos en aluminio y hierro. El nivel freático se encuentra, generalmente, algunos metros bajo la superficie. Esta clase de drenaje también se presenta en suelos de textura gruesa, generalmente transportados, pobres en arcillas, en materia orgánica y en bases intercambiables, y que carecen tanto de agregación como de estructura. En México, generalmente esta clase de drenaje se encuentra representada en suelos aluviales y coluviales muy jóvenes (Fluvisoles y Regosoles, respectivamente) y, también en de algunas unidades de suelos dístricos.

9.3 AGUA FREATICA Y FLUCTUACION DEL NIVEL FREATICO

Según Buol (1981), el nivel freático se define como "la superficie superior del agua subterránea, o el nivel bajo en que el suelo se encuentra saturado de agua; en donde la presión hidráulica es igual a la atmosférica.

En regiones húmedas y subhúmedas, el nivel freático tiene casi siempre un relieve similar al de la superficie del terreno, pero de menor amplitud; es decir, que se encuentra más cerca de la superficie en las depresiones (suelos de gley) que en los puntos elevados del terreno. Es muy frecuente que, estacionalmente, el nivel freático invada totalmente al perfil del suelo, adicionando a éste cantidades apreciables de sustancias disueltas, particularmente hierro ferroso. Este hierro, una vez depositado en el suelo, tiende a oxidarse al descender el nivel freático. Como este fenómeno es cíclico, el suelo acumula hierro paulatinamente hasta saturarse y, con el tiempo, puede formar una Laterita (Plintita). Esto suele observarse más a menudo en las depresiones que en los relieves convexos.

A continuación se indican los factores y las propiedades de los que depende la cantidad de agua que se encuentra en el subsuelo.

- El gradiente superficial, el cual determina que el agua corra sobre la superficie, controlando tanto la cantidad como la tasa de escurrimiento.
- La vegetación. Si ésta es abundante se puede limitar, bajo ciertas condiciones, la penetración del agua al subsuelo, ya que favorece una mayor evapotranspiración.
- Las condiciones climáticas, las cuales determinan tanto la cantidad de precipitación como la temperatura que influye en la tasa de evaporación.
- La porosidad y permeabilidad del suelo. Medios porosos y bien aereados permiten una mayor circulación o penetración de las aguas superficiales hacia el subsuelo (aguas subterráneas).

Parte del agua que se infiltra puede permanecer retenida mediante fuerzas de tensión en los horizontes superficiales del suelo y evaporarse o ser usada por las raíces de las plantas (zona de capilaridad). La zona de saturación incluye tanto esta zona de capilaridad como una inferior, en donde el agua se mueve por influencia de la gravedad.

Una condición de saturación en el suelo altera muchas de las reacciones físicas y químicas que suceden en él, como el que: (a) predominen las condiciones anaeróbicas y las reacciones de reducción, debido a la disminución o ausencia total de oxígeno lo que, además, reduce y/o detiene el crecimiento de las raíces; (b) exista infiltración o descenso del agua restringido y, en lugar de ello, tienda a predominar el desplazamiento lateral del agua dentro de la zona saturada (drenaje lateral), y (c) aumente el calor específico del suelo y éste tienda a enfriarse más que los suelos no saturados circundantes.

Mientras que la presencia de un nivel freático es común en las regiones húmedas y subhúmedas, y es observable en las propiedades del perfil del suelo, disminuye su importancia en las zonas áridas y semiáridas, debido a que se encuentra, por lo común, a más de diez metros bajo la superficie. Sin embargo, se hace extremadamente importante en las zonas más secas del mundo donde, ocasionalmente, puede presentarse a menos de un metro de la superficie.

9.4 EFECTOS DEL DRENAJE SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS

El drenaje interno es un factor muy importante relacionado con muchas de las características de los suelos. Por ejemplo, en el caso de la llanura costera de Nayarit, los suelos que se encuentran en las posiciones topográficas más elevadas son suelos bien drenados y de color rojo, mientras que los que se encuentran en las partes bajas, en la zona de fluctuación del nivel freático, son moteados, y aquéllos localizados en las partes planas y en depresiones (esteros), son de color azul y presentan condiciones gléicas.

Mineralógicamente, los suelos con buen drenaje son ricos en caolinita, mientras que en aquellos suelos con mal drenaje se encuentra presente la esmectita. Ambos minerales se forman en función de las condiciones geoquímicas imperantes en los suelos. Es decir, la caolinita se forma en condiciones de mayor lixiviación, con pérdida de cationes básicos y la recombinación de la sílice y la alúmina en una proporción de 1:1. A diferencia de las esmectitas que requieren para su formación de períodos de humedad y sequía estacionales, que propicien tanto el lavado como la acumulación en las diferentes épocas del año. La caolinita transportada hacia las partes bajas del relieve, también puede ser transformada por alteración a esmectita (Birkeland, 1984).

Lo antes expuesto deja claro que los materiales suelen ser lavados de las posiciones topográficas altas hacia las partes bajas, en donde se acumulan. De esta manera, es posible reconocer catenas de suelos en las que se observan cambios en sus propiedades como son: incremento en el contenido de arcilla y de carbono orgánico; aumento en el valor del pH; e incremento en la capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, estos cambios dependen de las condiciones locales específicas, por lo que no es adecuado generalizar.

PARTE III : PERFILES DE SUELOS RESIDUALES

INTRODUCCION

Objetivos:

- Suscitar el entendimiento de las relaciones existentes entre los diferentes tipos de rocas, las características mineralógicas, los procesos de intemperismo y el desarrollo de las propiedades de los suelos residuales.
- Analizar los diferentes conceptos actualmente empleados para definir el PERFIL DE INTEMPERISMO, así como su dinámica.
- Presentar algunos perfiles de alteración modales para las condiciones de México, particularmente representativos de zonas templadas.

Los suelos residuales se forman a partir de la intemperización y alteración de rocas o de depósitos estabilizados. La intemperización de los materiales iniciales precede a la formación de los suelos, en el caso de las rocas duras, y es simultánea a la formación de los mismos cuando se trata de rocas blandas o de materiales no consolidados.

Existen dos tipos principales de intemperismo, *físico* y *químico*. El primero, involucra la acción de procesos que determinan la ruptura del material parental en unidades más pequeñas, mediante acciones mecánicas, de tal modo que las partículas o fragmentos derivados retienen la composición que tenía la roca original. Se considera, principalmente, la fragmentación por movimiento y el efecto abrasivo de las aguas y de la acción eólica (Besoain, 1985). El segundo, comprende los complejos procesos que alteran las estructuras internas de los minerales como consecuencia de la remoción o adición de ciertos elementos.

La roca original, durante su transformación, se descompone en sustancias que tienden al equilibrio con el medioambiente superficial. Jackson y Sherman (1958) distinguen, dentro del intemperismo químico, al intemperismo geoquímico y al edafoquímico. Para una mejor comprensión de la formación de los suelos, a continuación se mencionan sus principales componentes mineralógicos y se describen los principales procesos de formación e intemperismo de los mismos.

10 FORMACION DE LOS SUELOS RESIDUALES

10.1 MINERALOGIA DE SUELOS RESIDUALES

Entre los principios fundamentales que se deben tomar en consideración para comprender los procesos de formación de las arcillas, entre otros minerales secundarios presentes en el suelo, se encuentran los siguientes:

- ***Concentraciones iónicas y equilibrios de iones en el sistema del suelo.*** Se refiere a la cantidad y tipo de cationes presentes en el sistema así como a sus relaciones de sinergismo (afinidad de un elemento con otro para formar un nuevo compuesto) y antagonismo (discriminación en la asociación de los diferentes elementos presentes).
- ***Condiciones de Eh (oxidación-reducción) y pH (acidez-alcalinidad).*** Las diferentes condiciones del sistema determinan la susceptibilidad de asociación de unos elementos con otros (sinergismo y antagonismo) para formar compuestos secundarios, independientemente de la concentración de los mismos en el sistema.
- ***Productos de la transformación de las entidades químicas originales participantes.*** A lo largo de las diferentes etapas de alteración del material parental, roca o depósito, se presentan diferentes asociaciones de minerales neoformados llamados "secundarios".
- ***Cinética de las reacciones.*** Se refiere a la velocidad de las diversas reacciones entre los minerales primarios acopladas a los procesos de intemperización y síntesis (neoformación de minerales). La cinética de las reacciones está directamente relacionada con el Indice de Eliminación de los productos de la intemperización, siendo éste determinado inicialmente por las condiciones de Eh y pH así como por el Indice de Lixiviación y drenaje interno del perfil de suelo (c.f. Pérdida de materiales según Simonson, 1959, Parte I).

10.1.1 Condiciones Generalizadas para la Formación y la Persistencia de los Minerales Arcillosos Comunes

A continuación se enumeran las principales especies de arcillas de acuerdo a la clasificación de Caillère y Henin, modificada por Caillère en 1960.

10.1.1.1 Grupo de las caolinitas

- ***Caolinita***

Minerales cuya estructura está integrada por estratos formados por una capa de tetraedros SiO_4 y otra de octaedros AlO_6 de estructura laminar 1:1 (o Te-Oc) con una equidistancia de 7 Å.

Los oxígenos libres de la primera capa forman parte de la segunda, ocupando dos vértices de cada octaedro existiendo, en los otros vértices, grupos OH. Los estratos enlazados por puentes de hidrógeno no permiten la entrada de cationes ni de moléculas de agua. Estos minerales se sintetizan cuando las concentraciones de Si y Al son aproximadamente iguales y existe, además, una alta concentración de hidronio (ion hidrogeno intercambiable, H^+) y una carencia de Mg y otras bases. Presentan una capacidad de cambio de bases muy pequeña, del orden de 10 a 20 meq/100g de arcilla y, cuando el suelo contiene esta arcilla, la capacidad varía de 10 a 15 meq/100g de suelo; una superficie externa de 10 a 30 m^2/g y una superficie interna nula.

- ***Haloisita***

Mineral que presentan una estructura similar a la Caolinita existiendo, entre los estratos, una cantidad variable de moléculas de agua (generalmente de cuatro a seis). La *haloisita* se deshidrata de manera irreversible a temperaturas relativamente bajas. Este mineral se forma cuando la concentración de Al es, aproximadamente, igual a la del Si como resultado de la intemperización rápida de los feldespatos; o por la organización de un silicato alumínico amorfo, como el alófano, en una estructura más cristalina. Esto requiere una alta concentración de hidronio y una concentración baja o nula de bases. Generalmente presentan una CICT >15 meq/100g de suelo pero, cuando esta integrada al suelo, es menor a 25 meq/100g de suelo.

10.1.1.2 Grupo de las esmectitas o de la montmorillonita

El término *esmectita* se refiere a la arcillas dotadas de propiedades absorbentes. El grupo comprende a la *montmorillonita*, (que es la representante más importante del grupo), la *stevensita* y la *saponita*. El grupo también es denominado por su estructura 2:1 (Te-Oc-Te). Estos minerales están formados por estratos de dos capas de tetraedros de SiO_4, unidas por átomos de Al, de manera que cada aluminio coordina con dos oxígenos libres en cada capa y con dos grupos OH. Entre los estratos se sitúan cationes o moléculas de agua, pudiendo acercarse o separarse de manera reversible (contracción-expansión). Estos minerales presentan una capacidad de cambio de bases elevada, de 100 a 130 meq/100g de arcilla y, cuando esta arcilla forma parte del suelo, la CICT es mayor de 25 meq/100g de suelo; además, tienen una superficie externa de 80 m^2/g y y una superficie interna de 800 m^2/g.

Para la síntesis de las Montmorillonitas se requiere una concentración iónica relativamente elevada de Silicio y Magnesio. En general, esas condiciones se satisfacen en las cercanías de los silicatos, en descomposición, ricos en hierro y magnesio. La alta concentración de silicio se mantiene mediante el movimiento lento o el estancamiento del agua del suelo. La Montmorillonita es inestable en condiciones de alta concentración de hidronio y lixiviación rápida. Cuando estas arcillas se han desarrollado *in situ*, con frecuencia se presentan en capas compactadas de espesor importante; lo que favorece la lixiviación lenta y la persistencia de condiciones de alta intensidad de intemperización química. Dentro de este grupo, se pueden

asociar los grupos de las Illitas y de las *vermiculitas*, debido a la analogía de la alternancia de láminas y de su equidistancia (10 Å) aunque solamente la Illita presenta una equidistancia estable.

La secuencia de formación de estos minerales, a medida que aumenta el grado de intemperismo, se puede esquematizar de la siguiente manera:

Mica → Illita → Vermiculita → Montmorillonita

- *Illita*

Este mineral se forma cuando hay mica en el material inicial, en condiciones de concentraciones bajas o moderadas de hidronio, necesarias para la eliminación parcial del potasio de las capas intermedias. Para su estabilidad, se requieren concentraciones moderadas a relativamente altas de Si y Al. Las concentraciones de moderadas a altas de hidronio provocan inestabilidad y la desaparición de este mineral, el cual se transforma en Vermiculita.

- *Vermiculita*

Minerales que proceden de la Mica, cuando se presenta la pérdida de álcalis y ganancia de agua. La concentración de Si tiene que ser alta, pero la concentración de Al en solución debe ser baja o, de lo contrario, se precipita en las capas intermedias para formar un intergrado 2:1-2:2. Este mineral se forma en condiciones de concentración moderada de hidronio, de modo que el potasio y el magnesio se eliminan completamente de las capas intermedias. Tienen la propiedad de hojaldrarse y curvarse en forma de gusano con el calor (vermes=gusano).

- *Intergrado 2:1-2:2 de Vermiculitas con Aluminio en las capas intermedias*

Este mineral se sintetiza cuando las concentraciones de hidronio varían de moderadas a altas y las de Al y Si fluctúan de medianas a altas. Los espacios entre las capas sirven como escape para el Al en solución, lo que constituye un efecto "contrario a la Gibsita" (Jackson, 1963). Para la síntesis de este mineral se requiere, como material inicial, mica o montmorillonita.

10.1.1.3 Grupo de las cloritas

Los minerales de este grupo tienen una estructura laminar interestratificada del tipo 2:1:1. La clorita, regularmente constituida por capas alternas de mica y brucita. Una hoja de "brucita" ($Mg_3(OH)_6$) cargada positivamente se presenta insertada entre dos capas u hojas semejantes a la mica y cargadas negativamente. Su capacidad de expansión es limitada. La equidistancia entre hojas es de 14 Å y su capacidad de intercambio catiónico es, generalmente, baja variando de 10 a 15 meq/100g. Por lo común, la clorita se presenta en suelos procedentes de rocas sedimentarias y serpentinas entre otras.

10.1.1.4 Grupo de complejos arcillosos interestratificados

Los complejos arcillosos están constituidos por alternancias de láminas de distintos minerales (generalmente dos). La formación de estos minerales puede responder a condiciones de equilibrio o a tendencias particulares y características del medio. Se pueden observar conjuntos con varias formas de interestratificación cuya estructura es difícil de interpretar.

Se puede presentar el caso en que uno de los minerales proceda de la alteración del otro, como las hidromicas; constituidas por láminas de micas alteradas y transformadas en vermiculita y por láminas sin alterar. Se distinguen dos tipos de interestratificaciones, las irregulares, que presentan un comportamiento de este tipo, como son:

- *Vermiculita - Biotita,*
- *Mica - Clorita,*
- *Montmorillonita - Caolinita,*
- *Caolinita - Sílice,*

y las interestratificaciones regulares que no se comportan como mezclas, sino como verdaderos minerales, como la Rectorita (Pirofilita-Vermiculita) (Gaucher, 1971).

10.1.1.5 Minerales asociados a las arcillas

Los minerales generalmente asociados a las arcillas son, también, minerales secundarios, se presentan en forma de partículas muy finas, ya sea en estado cristalizado, criptocristalino o amorfo (este último, definido como un mineral que no puede ser detectado por Difracción de Rayos X). Estos minerales se relacionan con el silicio, son muy diversos y se forman a medida que avanza el intemperismo, y los coloides del suelos se enriquecen en óxidos, hidróxidos y óxidos hidratados de Al, Fe, y Ti (Bohn, 1993). La mayoría de los de los minerales secundarios cristalizados que se encuentran en los suelos, han pasado por etapas amorfas intermedias durante el intemperismo químico.

a. Alófano

Término que designa a un mineral no cristalino de, Si-Al y Al-Si, cuya relación Al/Si varía de 1 a 2. La composición del Alófano es variable pero incluye, principalmente, Al_2O_3, Fe_2O_3 y SiO_2 hidratados. La Capacidad de Intercambio Cationico de estos materiales depende, en gran medida, del pH y del grado de hidratación. Este mineral amorfo se forma como producto de la intemperización, relativamente rápida, de cenizas volcánicas no cristalinas, en condiciones de concentraciones de hidronio de medianas a altas, en sistemas permanentemente húmedos o bajo condiciones muy restringidas, por la intemperización rápida de los feldespatos. Es probable que

se encuentre presente en la mayoría de los suelos como un producto intermedio del intemperismo (Bohn, 1993).

b. Minerales de Hierro

Los óxidos de hierro más comunes en los suelos son la goetita (FeOOH) y la hematita (Fe_2O_3). Estos minerales tienden a presentarse como capas amorfas sobre las partículas de los suelos, las cuales se convierten en formas cristalinas con el envejecimiento. A esta cristalización se atribuye el endurecimiento irreversible de materiales como la laterita (o plintita) de suelos tropicales que ocurre cuando se seca el mineral.

- *Goetita*

A través del tiempo, este mineral se forma a partir de la desintegración rápida de minerales ferromagnésicos, o se condensa a partir del gel amorfo hidratado requiriendo, para ello, un potencial Eh alto (potencial positivo de reducción-oxidación) y una concentración mediana de hidronio. Con la persistencia de condiciones elevadas de oxidación (Eh mayor que 100 MV) y pH moderado, se forma lentamente la hematita. La goetita es característica de suelos muy intemperizados y de color café a café amarillento oscuro.

- *Hematita*

Este mineral se forma en condiciones de Eh alto y pH de moderado a alto, a partir de la goetita mas hidratada que es sometida a una creciente pérdida de hidroxilos, o se forma directamente a partir de la desintegración de minerales ferromagnésicos, tambien, bajo condiciones de Eh-pH altos. La hematita se presenta en suelos con colores que varían del rosado al rojo intenso.

- *Ferrhidrita*

Está constituida por O^2, OH, H_2O y Fe^3. Su importancia radica en que presenta una superficie específica muy grande (200 a 500 m^2/g). Un contenido de 2% de este mineral en el suelo es suficiente para darle características físicas y químicas extraordinarias tales como: una alta CICT y superficie específica y, tambien, una alta capacidad de retención de humedad, entre otras. Este mineral es común en suelos de origen volcánico.

c. Minerales de Aluminio

- *Gibsita*

Este mineral se forma y persiste en condiciones de baja concentración de Si y una alta concentración de hidronio, con una concentración baja o nula de bases. Se puede formar por el envejecimiento de geles o alofanos alumínicos.

10.2 INTEMPERIZACIÓN GEOQUÍMICA

Tiene lugar bajo el *solum* del suelo (volumen constituido por los horizontes A y B) en la parte del perfil correspondiente al horizonte C. Se podría decir que es el tipo de intemperismo que se produciría en el caso de que no existiera la cubierta de "suelo de tierra".

Las reacciones que se producen como parte de la intemperización geoquímica son: (1) oxidación, (2) reducción, (3) óxido-reducción; (4) hidratación; (5) disolución (6) hidrólisis, y (7) carbonatación.

10.2.1 Oxidación

La oxidación, o adición de Oxigeno a un compuesto, es una reacción que implica la pérdida de electrónes por un átomo. Este es un proceso que siempre forma parte de la descomposición de los minerales que constituyen a las rocas y al suelo. El Oxígeno del aire, en presencia del agua, reacciona principalmente con los minerales que contienen Fe y/o Mn. Ocurre también en los materiales de suelos en los que el contenido de Oxígeno es alto y las demandas biológicas de este elemento bajas. La reacción específica más importante es el cambio del ion ferroso (Fe^{2+}) al ion férrico (Fe^{3+}):

$$Fe \underset{(O_2)}{\leftrightarrow} Fe^{2+} + 2e^- \underset{(O_2)}{\leftrightarrow} Fe^{3+} + e^- \quad \text{o de manera esquemática:} \quad Fe^{++} \rightarrow Fe^{+++} + e^-$$

La oxidación del hierro se traduce en el cambio de color del material el cual, generalmente, adopta tonos amarillos y rojos. En el ejemplo de la oxidación del olivino se tiene:

$$\underset{\text{Olivino}}{3\,MgFeSiO_4} + 2H_2O \rightarrow \underset{\text{Serpentina}}{H_4Mg_3Si_2O_9} + Si_2 + 3FeO$$

10.2.2 Reducción

La reducción es el proceso contrario a la oxidación, y se produce en el ambiente geoquímico cuando el material está saturado con agua, en suelos con cantidades significativas de materia orgánica y con pH bajo (ácidos) ya que la cantidad de oxígeno, en estas condiciones, es baja y la demanda biológica de este elemento es muy elevada. Los compuestos férricos son buenos aceptores de electrones (H), transformándose en compuestos ferrosos, los cuales son muy móviles por lo que el Fe se puede perder fácilmente del sistema, debido a fluctuaciones del nivel neto de aguas freáticas. Si el Hierro ferroso permanece en el sistema, reacciona para formar sulfuros y compuestos relacionados que proporcionan los colores verde y azul verdoso que caracterizan a muchos materiales reducidos de los suelos. Si el Hierro permanece como óxido

ferroso hidratado (llamado Lepidocrocita) en el material del suelo, se obtiene el moteado amarillo y anaranjado característico. Este fenómeno se asocia a los contenidos relativamente altos de materia orgánica.

$$Fe(OH)_3 + H \rightarrow Fe(OH)_2 + H_2O$$

10.2.3 Oxidación-Reducción

Un evento común para los horizontes C y los materiales parentales del suelo es la fluctuación de las condiciones de oxidación a las de reducción debido, principalmente, a las variaciones climáticas que se producen durante el año. O bien, el material parental puede cambiar de un ambiente reductor (p.e. suelo saturado confinado) durante la etapa de intemperización geoquímica, a un ambiente oxidante (p.e. suelo drenado) en el que se presenta, también, intemperización edafoquímica. Este cambio puede deberse a varios fenómenos como: (1) la exposición al aire de la superficie del terreno por erosión; (2) la elevación del terreno en zonas costeras, (3) el descenso de los niveles freáticos regionales; (4) procesos de fraccionamientos de tierras, (5) cambios climáticos o (6) el ascenso y descenso del nivel freático local provocado artificialmente, como sucede en los suelos sometidos al cultivo de arroz.

Para una mejor comprensión de los cambios en el estado de oxidación y la consiguiente formación de minerales, se puede consultar la gráfica de Collins (1968) en la Figura 14. A partir de esta gráfica, es posible formular algunas generalizaciones que ilustran su utilidad en lo que respecta a los estados químicos del Fe y del Mn en función del pH y del Eh (grado de acidez y grado de reducción). Por ejemplo, se observa que al aumentar la acidez el hierro ferroso se va haciendo cada vez más estable aún en las condiciones mas oxidantes.

10.2.4 Hidratación

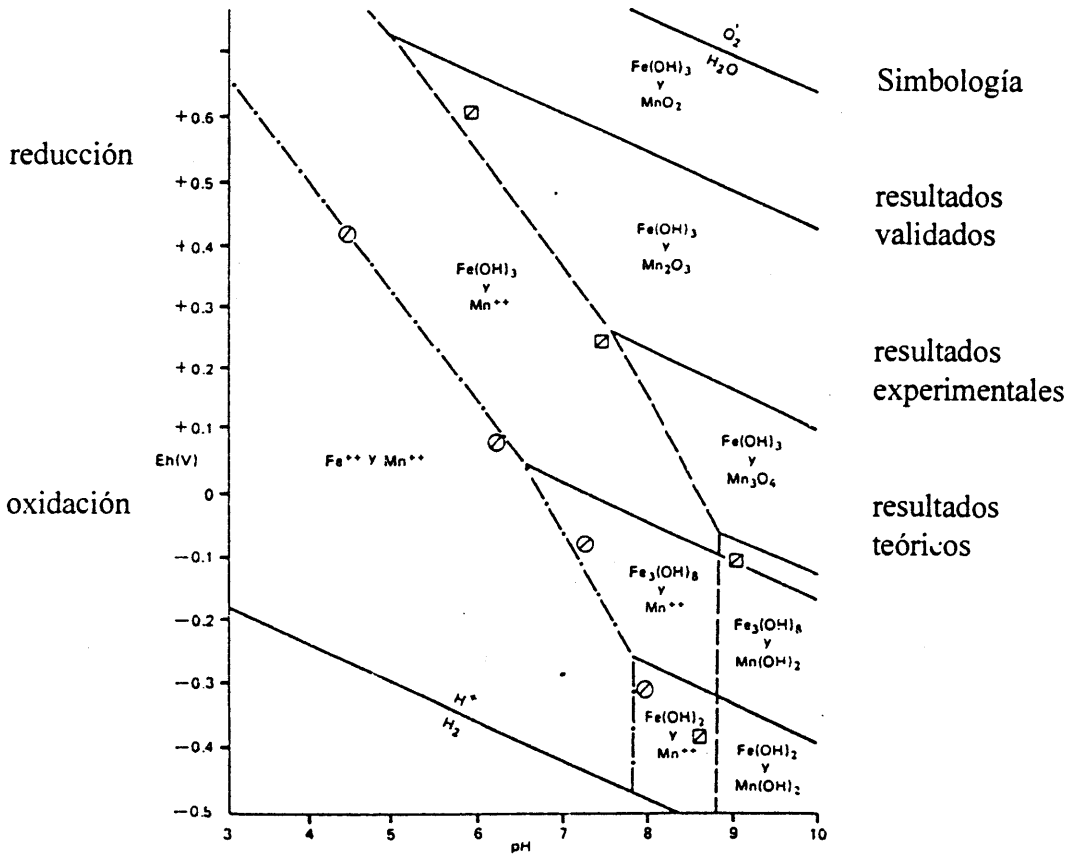
Es el proceso por el cual el agua, ya sea atmosférica o subterránea, se incorpora a los minerales quedando químicamente combinada. Esto sucede, principalmente, a los minerales anhidros como la anhidrita que, al hidratarse, se convierte en yeso, y los feldespatos en zeolitas. El agua que se mezcla molecularmente es llamada agua de cristalización, de ahí que al perderse se manifiestan cambios importantes en el cristal del mineral (forma, color, etc.). Debido a la hidratación disminuye la consistencia de los materiales, aumenta su volúmen y se alteran sus propiedades físicas y químicas. El efecto ácido de una substancia se basa en que cede al agua protones para formar iones hidronio u oxonio (H_30^+). El agua absorbida proporciona un puente o una entrada para el Hidronio facilitando el ataque a la estructura.

Las siguientes reacciones son ilustrativas de este fenómeno:

$$Fe_2O_3 + 3H_2O \rightarrow Fe_2O_3.3H_2O$$
Hematita (roja) Limonita (amarilla)

$$CaSO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O$$
Anhidrita Yeso

FIGURA 14: ESTABILIDAD DEL HIERRO Y DEL MANGANESO, EN RELACION CON EL Eh y pH, EN SOLUCIONES DE CLORURO 0.01N (COLLINS 1968)



Grado de acidez y alcalinidad

10.2.5 Carbonatación

Es el proceso de convertir un compuesto en Carbonato o de saturar un líquido por medio del anhídrido carbónico (o Dioxido de Carbono). El ácido carbónico, formado al mezclarse el anhídrido carbónico del aire (CO_2) con el agua, acelera la descomposición de la materia mineral. Este afecta principalmente a las rocas o materiales que contienen cantidades significativas de Ca, Fe, Mg, Na o K. Como ejemplo puede citarse, de manera sintetizada, la formación de la caolinita a partir de la ortoclasa:

$$K_20.Al_20_3.6Si0_2 + 2H_20 + CO_2 \rightarrow AL_20_3.2Si0_2. + K_2CO_3 + 4Si0_2$$

Ortoclasa Caolinita

Los procesos de Hidratación y Carbonatación combinados, producen las arcillas más comunes en los suelos de México. Algunas de ellas son:

NOMBRE	COMPOSICION ESQUEMÁTICA
• Caolinita	$Al_20_3 . 2SiO_2 . 2H_2O$
• Anauxita	$Al_20_3 . 3SiO_2 . 2H_2O$
• Haloisita	$Al_20_3 . 2SiO_2 . 2H_2O$
• Beidelita	$Al_20_3 . 3SiO_2 . 2H_2O$
• Nontronita	$Fe_20_3 . 3SiO_2 . 2H_2O$
• Montmorillonita	$Al_20_3 . 4SiO_2 . 2H_2O$

10.2.6 Disolución

La disolución se refiere a la incorporación de una sustancia de estructura química sencilla (como las sales simples) por un líquido (solvente) dando como resultado una solución homogénea. Como ejemplo se presenta la disolución de los carbonatos y cloruros presentes formando minerales en algunos materiales parentales de suelos. Un caso es el de la disolución del carbonato cálcico contenido en depósitos aluviales o coluviales calcáreos:

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow Ca(HCO_3)_2 \leftrightarrow Ca^{++} + 2HCO_3^-$$

Carbonato de Calcio Bicarbonato de Calcio+

o de manera esquemática: $CaCO_3+2H^+$----------$H_2CO_3+Ca^{++}$

10.2.7 Hidrólisis

La hidrólisis es generalmente reconocida como el proceso en el que el agua actúa como una sustancia reaccionante al descomponerse iónicamente. Por la disociación iónica del agua se puede obtener la formación de un ácido y una base partiendo de una sal. La reacción de los iones H^+ y $0H^-$ con los minerales da como resultado el remplazamiento de los iones básicos (Ca, Mg, Na, K) por el Hidrógeno, lo que provoca el colapso y la desintegración de la estructura.

La hidrólisis es el proceso más importante de la intemperización geoquímica y da como resultado la desintegración completa o la modificación drástica de los minerales primarios. Afecta, de manera especial, a los silicatos y, particularmente, a los minerales feldespáticos y ferromagnesianos (Fassbander, 1987).

Tomando como ejemplo a la ortoclasa se tiene:

$$KAlSi_3O_8 + H^+ + 0H^- \text{----------} H(AlSi_3O_8) + K^+ + OH^-$$

Ortoclasa Acido metasilícico

En la superficie del mineral los iones H remplazan a los iones K, de lo que resulta un ácido debil (ácido metasilícico) y una base fuerte (KOH). El resto del mineral no es estable y continúa su descomposición hasta dar origen a la hidrargilita y al ácido silícico. El ácido metasilícico resultante no tiene una verdadera importancia debido a su corta permanencia en el suelo. En realidad, el silicio y el aluminio reorganizan el oxígeno y a los hidroxílos $(OH)^-$ para formar, en estado amorfo, el Alófano y en estado cristalino, la Haloisita.

10.3 INTEMPERIZACION EDAFOQUIMICA

Consiste en la desintegración y modificación química de los minerales y se le asocian, además, todos los procesos formadores de suelos incluyendo los biológicos. Buol et al. (1981), señalan que algunas reacciones de este tipo de intemperización se llevan a cabo exclusivamente en el *solum* (Horizontes A y B). Tales reacciones se incluyen en la noción de intemperización edafoquímica propuesta por Jackson y Sherman (1953) que comprende los procesos que a continuación se exponen.

10.3.1 Ciclos de Oxidación-Reducción

Las condiciones alternantes de reducción (saturación) y oxidación (sequía) son responsables de la liberación del Fe y Mn presentes en los minerales primarios, y de su reubicación en forma de concreciones y horizontes policromados (moteado, bandeado, etc.). La alternancia de estos procesos conduce a la destrucción de las arcillas; esto ocurre en suelos de las zonas costeras, donde las condiciones de mal drenaje son extremas. El proceso consiste en el remplazamiento del hierro ferroso (Fe^{2+}) que se encuentra libre en el agua por el Al^{3+} de las arcillas, ambos

intercambiables, al iniciarse las condiciones de reducción. Al volver a las condiciones oxidantes, el proceso se invierte ya que el Fe^{+2} es desplazado, y el aluminio de la estructura arcillosa, ocupa los sitios de intercambio antes ocupados por el hierro. El desplazamiento y la reaparición del Al^{+3} causa cierta desintegración en la estructura de la arcilla, y cuando el fenómeno se repite por lo largo del tiempo se produce su destrucción.

10.3.2 Transferencia cíclica del Aluminio, de las Estructuras Arcillosas a los Oxidos Hidratados, a través de Sitios de Intercambio

El Al, en los materiales arcillosos, se presenta de dos maneras, el Al intercambiable, al que se hace mención en el párrafo anterior, y el Al, llamado estructural, que forma parte de las láminas de arreglo octaédrico que constituyen a las arcillas (unidas a las láminas de tetraedros de Si). El termino "sitio de intercambio", se refiere a una área específica de la superficie arcillosa en donde un elemento intercambiable y, en ocasiones estructural, puede ser remplazado por otro elemento. Estos sitios son, principalmente, las aristas de las arcillas o una parte fracturada de las mismas. El proceso teórico es el siguiente: (1) las arcillas del suelo se saturan inicialmente con Ca^{+2} y Mg^{+2} intercambiables y, posteriormente, (2) estos se ven remplazados y desplazados por el H^{+} del medio, abundante en condiciones ácidas (como ocurre comunmente en zonas con fuertes precipitaciones y altas temperaturas); (3) el H^{+} , que es altamente activo, una vez integrado a la arcilla continua el ataque desplazando al Al, lo que provoca inestabilidad en el sistema hasta la desintegración de la estructura. Este es el mecanismo de alteración responsable de la destrucción de las arcillas, particularmente de la montmorillonita, debido a que las láminas de esta última, constituidas básicamente por Mg y en ocasiones por Fe, son muy susceptibles a ser remplazados por el H.

10.3.3 Desplazamiento del Potasio de las Micas

El K es otro catión altamente substituible en la estructura arcillosa por diversos elementos (H, Mg, etc.). La eliminación de una cantidad moderada de potasio de las láminas intermedias de la mica, principalmente biotita, no provoca una gran distorsión ni pérdida de alineación de los espacios dejados por los átomos de silicio y de aluminio que constituyen a las arcillas. Sin embargo, al eliminar más de un 50% del potasio, se pierde la alineación, por lo que se produce una distorsión de las estructuras. Mediante la eliminación casi total del potasio en las láminas de la arcilla, se producen progresivamente nuevos tipos de minerales como son: la illita, vermiculita y la montmorillonita. La Illita y la vermiculita son, de hecho, consideradas por varios autores como minerales transicionales entre micas y arcillas cristalinas.

10.3.4 Adición de Aluminio a las Capas Intermedias de Minerales Arcillosos del Grupo de las Esmectitas (denominados 2:1)

La precipitación de hidroxi-aluminio en los espacios de las capas intermedias de la vermiculita, y, en menor grado, de la montmorillonita, es una importante alteración edafogénica de los minerales en los suelos ácidos. La arcilla, con capas intermedias de Al se denomina "*Intergrado 2:1-2:2*". Esta alteración afecta particularmente al *solum*, y da como resultado el bloqueo y la neutralización parcial de la capacidad de intercambio de cationes de la arcilla. El Al^{+3} de las capas intermedias contribuye a la acidez, y sólo se puede intercambiar con dificultad y en forma lenta.

10.4 INDICES DE ESTABILIDAD Y SECUENCIA DE INTEMPERIZACION

10.4.1 Serie de estabilidad mineral de Goldich

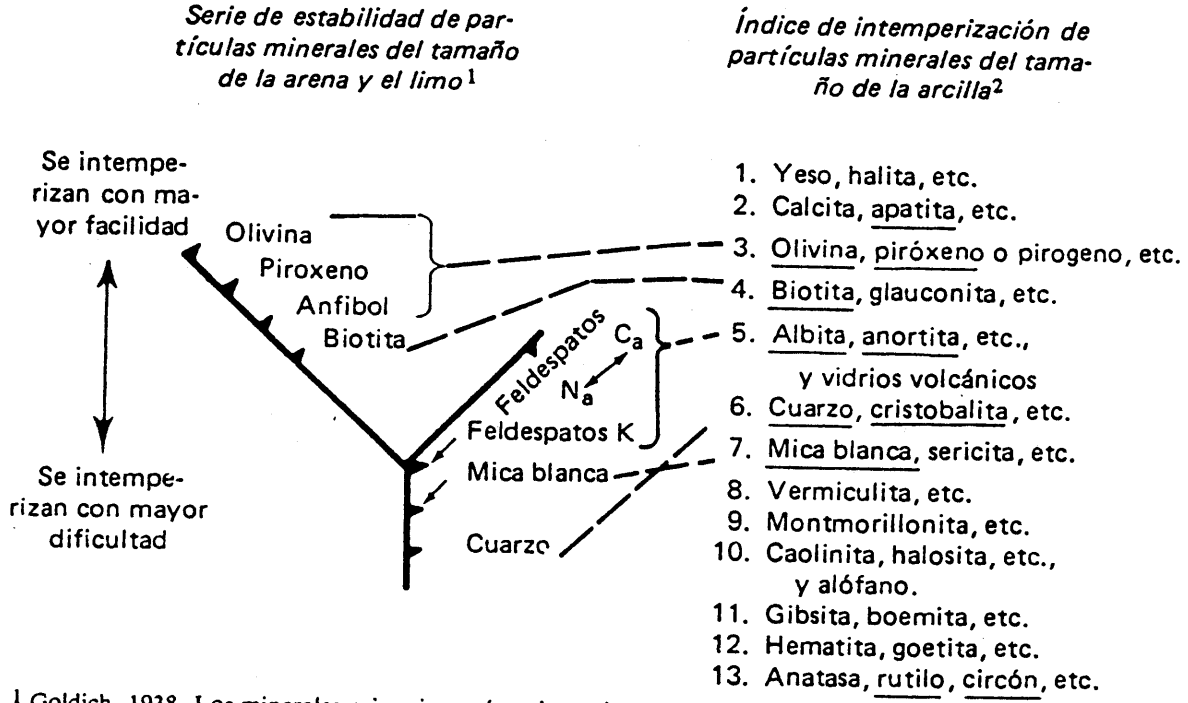
Dentro de la Geología y, particularmente en Geoquímica, se considera fundamental el conocimiento de la serie de reacción de los minerales que se produce durante la cristalización del magma llamada "fraccionada", durante el enfriamiento del mismo. Esta serie indica una sucesión de reacciones químicas complejas que dependen de varios parámetros, principalmente, de la composición química del magma original y de la velocidad de variación de la presión y de la temperatura. El termino "serie", indica el carácter transicional de los minerales. Experimentalmente, se han definido tres series principales: (i) la serie de Minerales Ferromagnesianos, llamada discontinua porque los minerales presentan sistemas cristalinos diferentes, (ii) la serie de plagioclasas (feldespatos sódico-alcalinos), llamada continua porque los cambios entre minerales son transicionales (enriquecimiento en Na) y todos pertenecen al mismo sistema cristalino (triclinico) y (iii) la serie de los feldespatos potásicos. La cristalización de los minerales en diferentes condiciones de presión y temperatura es indicativa de su grado de estabilidad, ya que se relaciona con su desequilibrio con el medioambiente actual en la interface entre la litósfera y la atmósfera. Consecuentemente, los minerales menos estables son los que se cristalizan a las temperaturas y presiones más altas.

Los minerales del suelo se pueden disponer en orden de estabilidad ante el intemperismo o, a la inversa, según su susceptibilidad a la intemperización. La "Serie de estabilidad" propuesta por Goldich (1938) ilustra bien dicha susceptibilidad en los minerales primarios más comunes de los suelos y, en general, coincide con las observaciones empíricas sobre la estabilidad. (Figura 15).

En la figura 15, se muestra una comparación entre la serie de estabilidad de las partículas minerales del tamaño de limo y arenas muy finas, y la serie de índice de intemperización de las partículas minerales del tamaño de la arcilla. En la rama "básica" (izquierda) de esta serie, hay un aumento de los enlaces tetraédricos de silicio con estabilidad creciente de arriba hacia abajo. Esto quiere decir que el mineral menos estable (olivino) se compone de tetraedros simples de silicio. La estructura se mantiene unida mediante enlaces con el magnesio (fácilmente hidrolizable) y el hierro (fácilmente oxidable). En el cuarzo, el mineral más estable, hay un enlace completo de

tetraedros de silicio, todos los átomos de oxígeno se comparten con más de uno de silicio. Asimismo, hay una disminución del porcentaje de bases fácilmente hidrolizables de los minerales de menos a más estables. En la rama de los feldespatos de la serie (rama derecha), se presenta una distorsión decreciente de las estructuras de los feldespatos cálcicos a los potásicos. El calcio bivalente (Ca^{+2}) se ajusta bien a la estructura de cadena del Feldespato, y satisface el desequilibrio de cargas mediante una sustitución considerable del silicio con aluminio. Por otra parte, el potasio monovalente (K^{+}) se adapta bien al papel de satisfacción del menor desequilibrio de cargas y del menor intercambio de aluminio y silicio, ajustandose muy bien en los huecos de las cadenas de Feldespatos. De esta manera, la ortoclasa presenta mayor estabilidad que la plagioclasa.

FIGURA 15: SERIE DE ESTABILIDAD DE GOLDICH



[1] Goldich, 1938. Los minerales primarios están subrayados en esta figura.
[2] Jackson, 1969.

19.4.2 Modelo de Jackson

La secuencia de intemperización propuesta por Jackson y sus colaboradores (1948), con modificaciones posteriores (Jackson 1968), es un modelo útil y conveniente para conocer la capacidad de intemperización de los minerales del tamaño de la arcilla. Esta secuencia se compone de 13 etapas, como se ilustra en la figura 15. En la misma figura, se presenta, también, una comparación gráfica de esta secuencia de intemperización, de los minerales del tamaño de la arcilla, con la serie de estabilidad de las partículas de tamaño arena muy fina - limo. Como se

observa en esta figura, el cuarzo cambia su posición de los tamaños más gruesos a los más finos, debido al incremento de solubilidad al aumentar la superficie específica, que se asocia al tamaño menor de las partículas. La mica blanca es, relativamente, más estable en el tamaño de la arcilla, a causa del efecto estabilizador de las capas de silicio y aluminio. Con el tiempo, debido a los efectos de los factores climáticos, se supone que la fracción arcillosa del suelo pasa por las diversas etapas de la secuencia.

OBSERVACIONES:

Al utilizar esta secuencia de intemperización como modelo, se debe estar conciente de varios inconvenientes: (1) de ellos es el efecto de climas previos en los suelos poligenéticos o paleosuelos.

Otro inconveniente es la contribución de la mineralogía del material inicial del suelo, puesto que un suelo rico en caolinita puede haber heredado este mineral de su material parental. Se debe recordar, también, que no hay ninguna trayectoria simple y/o principal para la intemperización. Las precipitaciones pluviales de gran intensidad, con índices rápidos de eliminación de los productos intemperizados, pueden producir rápidamente gibsita, en contraste con los millones de años que se requieren para ello en otras condiciones. La alta concentración de elementos en solución de los suelos, bajo un clima con una temporada seca pronunciada, puede producir secuencias muy distintas de minerales arcillosos, que en un suelo con la misma cantidad de lluvias, pero bien distribuidas a lo largo de todo el año.

11 PERFIL DE INTEMPERISMO Y ZONAS DE ALTERACION

11.1 PERFIL DE INTEMPERISMO; CONCEPTO ADOPTADO POR LA GEOTECHNICAL CONTROL OFFICE (USDA, 1988)

Dentro del ámbito geotécnico, se han integrado algunos conceptos edafológicos para definir un perfil teórico de intemperismo constituido por seis zonas con diferentes grados de alteración, producto de la interacción de los factores formadores del suelo. Es importante resaltar que, el perfil de intemperismo al que aquí se hace referencia sólo es correctamente aplicable bajo las condiciones del trópico ecuatorial. De las seis zonas del esquema, cuatro se refieren a los diferentes grados de alteración que la roca parental presenta, la quinta caracteriza a la roca parental inalterada y la última zona al suelo residual que se forma a partir de esta roca (Figura 16).

Con base en el esquema de zonación para la masa de roca alterada y la escala que define los grados de alteración, adoptados por la Geotechnical Control Office (1988), se hicieron las especificaciones que se indican en los párrafos siguientes. En lo sucesivo este concepto será referido en el texto como GEO-USDA.

11.1.1 Zona que ocupa el "Suelo Residual" propiamente dicho, RS

Debido al severo estadío de intemperismo que presentan sus horizontes, se le asigna el grado VI. Este grado implica que: (1) la textura original de la roca haya sido completamente alterada y (2) que los fragmentos puedan ser disgregados con la presión de la mano.

11.1.2 Zona de Completa Alteración, PW 0/30

Al material que aquí se localiza se le asigna el grado V, lo que significa que: (1) la textura de la roca original se haya preservado; (2) los fragmentos de roca puedan ser destruidos con la mano; (3) se pueda mellar fácilmente con el martillo de geólogo; (4) se disgregue cuando se sumerge en agua, y (5) muestre una decoloración significativa con respecto a la roca parental sana.

11.1.3 Zona de Alta Alteración, P/W 30/50

Se le da un grado IV, el cual se distingue por las siguientes características: (1) la roca puede ser disgregada en pequeños fragmentos con la presión de la mano; (2) se produce un sonido "apagado" con el impacto del martillo de geólogo; (3) no puede ser fácilmente mellada por el martillo; (4) no se disgrega cuando se sumerge en agua, y (5) muestra una decoloración significativa con respecto a la roca original.

11.1.4 Zona de Alteración Moderada, PW 50/90

Corresponde a un material con el grado III de alteración, el cual se caracteriza por tener las siguientes propiedades: (1) generalmente, la roca no se rompe por la presión de la mano, pero sí ante un golpe leve con el martillo de geólogo; (2) se produce un sonido "claro" ante un impacto, y (3) la masa de roca puede mostrar moteado.

11.1.5 Zona de Alteración Ligera, PW 90/100

Contiene material con el grado II, el cual corresponde con las siguientes características: (1) la roca no se rompe fácilmente con el martillo; (2) con el impacto, produce un sonido "metálico", y (3) muestra colores originales, excepto en algunas juntas donde puede haber moteado.

11.1.6 Zona con Ausencia de Alteración, UW

La roca se presenta en estado "sano", o inalterada por lo que se le asigna el grado I. Este grado se caracteriza por: (1) la roca no se rompe fácilmente ante el impacto del martillo; (2) cuando es golpeada, se produce un sonido "metálico", y (3) no presenta decoloración.

Como se mencionó anteriormente, las características citadas corresponden a las que se presentan, comúnmente, en un perfil de suelo situado en zonas del trópico ecuatorial cálido húmedo, por lo que son aplicables a países como Brasil y Colombia, entre otros, pero resultan poco aplicables a las condiciones medioambientales que prevalecen en México. Como se ha mencionado, las condiciones climáticas que se presentan en el territorio, la relativa juventud de las rocas y la inestabilidad medioambiental y geológica que caracteriza a nuestro país, limitan el desarrollo de este tipo de perfiles de intemperismo. En la figura 16 se presenta esta propuesta en comparación con el concepto geoquímico desarrollado en el inciso 11.2

OBSERVACIONES:

La anotación PW se refiere al porcentaje de roca que aún es distinguible en el material parental de un suelo. Así por ejemplo PW 0/30 indica que el suelo presenta aún características de roca que pueden oscilar de 0 al 30% de su volumen.

FIGURA 16 ZONAS DE INTEMPERISMO EN EL PERFIL

		GEOQUIMI CA	GEO-USDA 1988	
HORIZONTE		TERMINOLOGIA	DESCRIPCION DE LA ZONA	SIMBOLOGIA
	ZONA SUPERIOR	Suelo residual	La estructura, textura y fábrica	RS
			de roca han sido destruidas	Residual
A y B				Soil
C		Roca com-pletamente-alterada	<30% es roca (Saprolita)	Pw 0/30
CR	ZONA INTER-MEDIA	Roca altamente-alterada	50 a 90% roca (Saprolita)	Pw 30/50
CR		Roca moderada mente alterada	50 a 90% roca (Saprock)	Pw 50/90
R		Roca ligeramente alterada	>90% roca	Pw 90/100
R	ZONA INFE-RIOR	Roca sana	100% roca	UW

11.2 PERFIL DE INTEMPERISMO: CONCEPTO GEOQUIMICO

Considerando que el intemperismo se inicia en la superficie, su intensidad generalmente tiende a reducirse con el incremento en la profundidad. Las fases y etapas que sufre un suelo hasta constituir un perfil de intemperismo, han sido estudiadas por diferentes investigadores entre los que destacan Vargas y Pichler (1957), Litle (1969) y Polynov (1970) entre otros. Los primeros dos autores coinciden al afirmar que, desde el punto de vista físico y químico, el perfil de intemperismo de un suelo residual está constituido por tres zonas de alteración: (1) superior (2) intermedia y (3) inferior. Polynov (1970) propone un perfil complejo de intemperismo basado en el grado de alteración que presentan los productos residuales a los cuales este autor denomina "eluvio". A continuación se describen las zonas de alteración, y en la Figura 16 se ilustra esta propuesta.

11.2.1 Zona Superior

La zona superior generalmente está constituida por los horizontes A y B. Al primero de ellos se le ha denominado, dentro del contexto de Ingeniería aplicada a la construcción de Vías Terrestres (Velde, 1995), como "horizonte de enriquecimiento en materia orgánica", en tanto que al segundo se le llama "horizonte de enriquecimiento de productos iluviados". Ambos horizontes muestran un intemperismo alto, así como evidencias de actividad vegetal, animal y antrópica.

Dentro de algunas clasificaciones generales de suelos se considera que, en la denominada "zona superior", los fenómenos de alteración (intemperismo) se producen, fundamentalmente, en presencia de oxígeno. Consecuentemente, a esta parte del perfil también se le conoce como "zona de oxidación". A medida que se profundiza en el suelo, los contenidos de oxígeno disminuyen, por lo tanto la mayoría de las reacciones químicas propiciadas por la alteración se realizan en condiciones anaeróbicas, es decir, en condiciones de reducción. Por tal razón, la llamada "zona intermedia" también se denomina "zona de reducción".

11.2.2 Zona Intermedia

También muestra evidencias de alteración física y química y, en menor grado, biológica. Comprende a los horizontes C y CR, que algunos Geólogos y Pedólogos, denominan como "Regolita". Sin embargo, en el área de Ingeniería Civil a estos horizontes se les reconoce como "Saprolita" y "Saprock", respectivamente. Comúnmente, las rocas que constituyen la zona de "Saprock" conservan alguna estructura de la roca parental "sana". Las gravas presentes, en su mayoría, muestran una corteza de intemperismo evidente, cuyo espesor llega a ser mayor a 3 mm. Generalmente, esta zona también contiene materiales de origen pedológico como: nódulos de Manganeso, sales de Hierro, concreciones de carbonatos, en ocasiones materia

orgánica lixiviada, etc. Estos materiales frecuentemente le dan colores abigarrados (mezclados) a esta zona, o la apariencia de moteado.

11.2.3 Zona Inferior

Está constituida por materiales desintegrados física y químicamente, ligeramente alterados (PW 90/100). A menudo, se presenta como grandes bloques de roca parcialmente fracturada, aunque compacta y coherente. Corresponde con el horizonte pedológico R. A medida que se incrementa la profundidad se pasa gradualmente a la roca inalterada (UW).
Los productos de alteración que se forman en la "zona superior" (por oxidación) como en la "zona intermedia" (por reducción), normalmente son desplazados por efecto del drenaje hacia las partes más profundas.

La lixiviación de los productos formados en la zona superior de los suelos tropicales, es muy evidente en las capas profundas que constituyen la "zona inferior" del perfil. A este proceso se debe que esta zona también sea conocida como "zona de lixiviación".

OBSERVACIONES

En la actualidad, los conceptos de zonas de "oxidación", "reducción" y "lixiviación" son cada vez menos utilizados. Esto es debido a que muchos suelos presentan fenómenos de oxidación y reducción, en algunos de los horizontes de la "zona superior e, incluso, llegan a presentar lixiviación por efecto de drenaje lateral u oblicuo.

11.3 DINAMICA DE LA FORMACION DEL PERFIL DE INTEMPERISMO

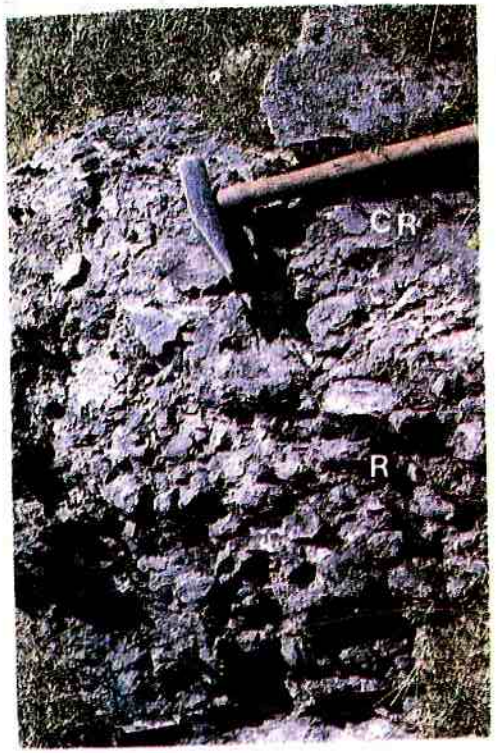
La formación de las tres zonas de alteración (mencionadas en el párrafo 11.2), según Tuncer y Lohnes (1977), ocurre en seis etapas en las que el intemperismo actúa, a través del tiempo, sobre la roca parental, el suelo que se forma, los minerales presentes y la fracción orgánica contenida. De modo sintetizado, cada etapa o conjunto de etapas, puede ser caracterizada del siguiente modo:

11.3.1 Etapas 1 y 2

La meteorización física, propiciada por la hidratación de la roca, el efecto mecánico de las raíces (bioclastía) y la agresividad del clima (termoclastía), entre otros factores, propician la disgregación de las capas (Figura 17). El impacto de estos factores puede constituir un perfil de alteración muy primitivo, formado por un horizonte A o AC o CR, que sobreyace al material parental. En la misma figura se observa que la intensidad de la descamación y grado de fracturamiento, son inversamente proporcionales a la profundidad. En esta etapa, se encuentra un suelo clasificado como ***Leptosol*** (FAO-UNESCO,1988-1990)

FIGURA 17 ETAPAS DE LA DINAMICA DE FORMACION DEL PERFIL DE INTEMPERISMO

ETAPAS: 1 Y 2



TERMINOLOGIA

Pedológica	Geológica	GEO-USDA 1988 Símbolo	Grado
HORIZONTE CR	Roca completamente alterada (0-15cm)	PW0/30	V (Saprolita)
HORIZONTE R Roca Parental	Roca altamente alterada (15-25cm)	PW 30/50	IV (Saprolita)
	Roca moderadamente alterada (25-40cm)	PW 50/90	III (Saprock)
	Roca ligeramente alterada (40-62cm)	PW 90/100	II (Saprock)
	Roca sana (62)	UW	I (Roca) (fresca)

Clasificación: Leptosol

OBSERVACIONES

Se presenta un perfil de intemperismo formado a partir de un aglomerado de fragmentos volcánicos. El intemperismo de esta roca es predominantemente físico, aunque la presencia de vegetación denota que se esta iniciando una alteración de carácter quimico y bioquímico, que corresponde con las etapas 1 y 2 de intemperismo propuestas por Tuncer y Lohnes (1977). En el cuadro se correlaciona la terminología utilizada por la Ciencia del Suelo y la adoptada por la GEO-USDA 1988.

en el cual el horizonte superior (AC-CR), según el grado de alteración que muestre es similar, por definición, a los conceptos de "Saprolita" o "Saprock" utilizados por la GEO-USDA 1988.

Durante la primera etapa, el intemperismo físico de la roca, al incrementar las superficies de alteración, prepara el inicio de la Etapa 2 (Figura 18), caracterizada por una meteorización química cuyos agentes son: el agua, los ácidos orgánicos y el incremento de temperatura y de oxígeno, propiciado por el fracturamiento. Durante esta segunda etapa, se empieza a formar un verdadero suelo constituido por un horizonte A, posiblemente un B Cámbico, muy primitivo, y un horizonte C (Saprolita) que sobreyace a una roca moderadamente alterada (Saprock).

11.3.2 Etapas 3 y 4

Estas etapas se caracterizan, generalmente, por una pérdida de sílice y de bases solubles, como: sodio, potasio, calcio y magnesio los que, al ser lavados, tienden a ser acumulados a cierta profundidad en el perfil. Durante estas etapas, se observa un incremento en el porcentaje de arcillas, lo que aumenta la cohesión del suelo decreciendo, en algunos casos, la porosidad y la permeabilidad. El intemperismo de los minerales primarios incrementa los contenidos de Fe_2O_3 y Al_2O_3 (sesquióxidos) y se inicia, plenamente, la Etapa 4. En este momento, el suelo ya muestra un horizonte B Cámbico bien diferenciado (Figura 19). La etapa 4 se caracteriza por las transformaciones, muy intensas, de los minerales presentes, principalmente de aquellos contenidos en el horizonte A. Las alteraciones de los minerales primarios constituyen un "complejo de alteración" rico en minerales secundarios como son: los geles de Si, Al, y Fe, así como en arcillas cristalinas las que, en zonas tropicales, generalmente son la Haloisita y la Caolinita. La Hematita, Goetita y el Oxido de Titanio también son comunes, observándose una disminución en el contenido de minerales primarios (feldespatos, micas, y ferromagnesianos).

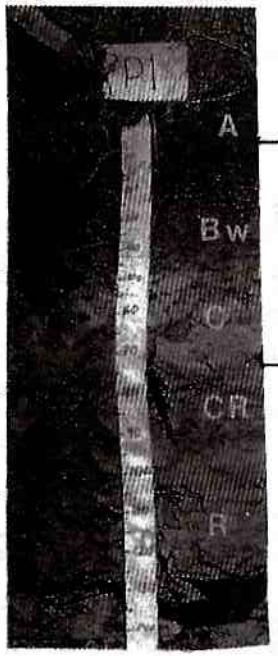
En la figura 20 (A y B), se observa al microscópio un corte de suelo (con aumento a 250 X) que muestra la organización interna de un horizonte B Cámbico (Bw), bien constituido y rico en minerales secundarios de Sílice y Hierro, así como en arcillas que migran a través de los poros y canales del suelo. Como se observa en la figura 20-B, todavía persisten algunos minerales primarios, como es el caso del vidrio volcánico, aunque estos minerales se encuentran muy alterados.

11.3.3 Etapa 5

Una vez que se ha formado un suelo cuyo perfil de alteración presenta un horizonte B Cámbico, los constituyentes solubles, óxidos, arcillas y coloides siguen siendo translocados y acumulados y, una gran parte, son lixiviados a profundidades considerables dentro del suelo. La acumulación gradual de arcillas dentro del perfil del suelo, constituye lo que se denomina

FIGURA 18 ETAPAS DE LA DINAMICA DE FORMACION DEL PERFIL DE INTEMPERISMO
ETAPA: 2

PERFIL DE SUELO RESIDUAL



TERMINOLOGIA

	Profundidad (cm)	Pedológica (Horizonte)	Geológica	GEO-USDA 1988 Símbolo	Grado
A	0-18	A	Suelo Residual	RS	VI
Bw	18-51	Bw			Suelo
C	51-67	C	Roca de completa a altamente alterada	PW 0/30 PW30/50	V-IV (Saprolita)
CR	67-95	CR	Roca de moderada a ligeramente alterada	PW 50/90 PW 90/100	III - II (Saprock)
	95-146	R	Roca fresca	UW (Roca fresca)	I

Clasificación: Phaeozem
Localidad:
Colectó: Dr. David Flores

OBSERVACIONES:

Suelo formado por el intemperismo de una toba andesítica. Se observa la formación de un horizonte A muy rico en materiales orgánicos (A mólico) así como el desarrollo incipiente de un horizonte Bw (Cámbico) que sobreyace a un horizonte C (Saprolita). Como puede notarse, en este perfil, la alteración corresponde con la etapa 2 de intemperismo de Tuncer y Lohnes (1977). A medida que el intemperismo del perfil se acentúa, resulta màs difícil establecer límites físicos para la roca en función de su grado de descomposición.

FIGURA 19 ETAPAS DE LA DINAMICA DE FORMACION DEL PERFIL DE INTEMPERISMO
ETAPAS. 3 y 4

PERFIL DE SUELO RESIDUAL

Clasificación: Cambisol
Localidad: Cerro Escondido, Oax.
Colectó: Carolina Jasso

TERMINOLOGIA

Profundidad (cm)	Pedológica (horizonte)	Geológica	GEO-USDA 1988 Símbolo	Grado
0-10	A			
10-22	AB			
22-32	Bw1	Suelo Residual	RS	VI
32-50	Bw2			Suelo
50-60	BC			
60 - 90	C	Roca completamente alterada	PW 0/30	V
90-200	CR	Roca altamente alterada	PW 30/50	(Saprolita)

OBSERVACIONES:

Suelo formado por un intemperismo severo en condiciones de clima cálido-húmedo. En este caso, la roca parental es una andesita que se localiza a 4.35 m. de profundidad (Roca fresca). El perfil muestra un horizonte Bw (Cámbico) bien diferenciado, rico en minerales secundarios en los que predominan los óxidos e hidróxidos de Al, Si y Fe. Las arcillas dominantes son la haloisita y la caolinita. Este perfil caracteriza adecuadamente las etapas 3 y 4 de intemperismo.

FIGURA 20 MICROMORFOLOGIA DEL HORIZONTE B CAMBICO

ETAPAS DE INTEMPERISMO 3 Y 4

FIGURAS

A: ESCALA 25 X
B: ESCALA 100 X
Preparo: Dr. Otilio Acevedo

Las figuras A y B representan la organización microscópica de un horizonte B cámbico. En ambas imágenes se observan las siguientes estructuras: (1) poros del suelo; (2) canales; (3) agregados; (4) migraciones de sílicio, hierro y arcilla; (5) migraciones de arcilla y materia orgánica y (6) vidrio volcánico. Esta organización sólo se presenta en horizontes de suelo, y está ausente en las capas.

un horizonte B argílico (Bt), en tanto que la acumulación de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio forman un horizonte B óxico (Bo)muy común en suelos del trópico ecuatorial. Sin embargo, una gran cantidad de sales, carbonatos, hierro y sílice son transportados, como ya se mencionó, a profundidades que llegan a exceder los 7 metros. Estos compuestos y elementos, al depositarse, actúan como cementantes entre las partículas. A través del tiempo, la acumulación de estos productos en las capas profundas del suelo, va rellenando los espacios vacíos (poros, canales y cámaras) propiciando un decremento en la porosidad y en la permeabilidad del agua y aire. Esta disminución de espacios propicia fenómenos de óxido-reducción dentro del suelo, debido a que el agua tiende a acumularse por encima de estas capas cementadas (agua freática). En este estadío, los fenómenos de óxido-reducción propician cambios evidentes de Eh y de pH.

11.3.4 Etapa 6

Esta etapa se presenta cuando, por cementación de las capas profundas del suelo, se acumula agua freática. El agua acumulada propicia condiciones alternantes de oxidación-reducción; dependiendo de las fluctuaciones en la profundidad del manto freático. Así, cuando éste desciende durante la estación de sequía, las capas libres de agua contienen más oxigeno y, consecuentemente, los minerales contenidos en esas capas se oxidan. Un ejemplo en los suelos tropicales, es el caso del hierro. Las aguas freáticas cargadas de hierro ferroso (Fe^{2+}) saturan al suelo con este elemento. Cuando el agua freática desciende, el hierro depositado en los horizontes se oxida, precipita y acumula. Esta acción, al repetirse a través del tiempo, llega a constituir una capa rica en hierro que, al evolucionar, constituye una Plintita (c.f. Figura 5, Capítulo 3).

La acumulación de agua freática, debido a la cementación de las capas subyacientes (Etapa 5), así como la formación de Plintita, debido a la alternancia de los procesos de oxidación-reducción (Etapa 6), son características de suelos evolucionados localizados en el trópico cálido húmedo

11.4 MEDICION DE LOS GRADOS DE INTEMPERISMO Y DESARROLLO DE LOS SUELOS

El grado de intemperismo y desarrollo de un suelo, es usado como una medida cualitativa de los cambios pedológicos que ha sufrido el material parental. Estos índices son frecuentemente utilizados en los estudios sobre la estratigrafía del Cuaternario, donde los suelos son utilizados para correlacionar los depósitos no consolidados.

Los índices más utilizados son los relativos al **Color** de los horizontes del suelo. Estos índices se basan en tres características o variantes físicas del color que son: ***matiz*** (hue), ***brillo*** (value) y la ***intensidad*** (chroma). El color del suelo, así como sus variantes se determinan por

coloreados distribuidos en tarjetas desmontables como la que se muestra en la figura 21. Como se observa en esta figura, todos los colores de una misma tarjeta tienen el mismo matiz, es decir el mismo color espectral que, en los suelos, varía desde rojo (R) hasta amarillo (Y) y que se designa mediante la clave que se encuentra en el ángulo superior derecho de la tarjeta. El brillo, en este caso, es la cantidad de luz reflejada y su valor aumenta de los colores oscuros a los claros. Su valor es cero para el negro absoluto y se incrementa hasta 10 para el blanco absoluto. La intensidad se refiere a la pureza relativa del matiz y su valor aumenta conforme disminuye el gris. Con esta base se determinan el matiz, brillo e intensidad de los horizontes. Los principales índices, según Birkland (1988), utilizados para evaluar el desarrollo de un perfil se presentan a continuación.

11.4.1 Indice de Buntley-Westin

El matiz se convierte a un número, se establece que la notación 7.5YR tiene un valor de 4, 10YR es igual a 3, 2.5YR es igual a 2 y 5Y es igual a 1. Este valor se multiplica por el valor de la intensidad. Un ejemplo se presenta en la Tabla 13

TABLA 13 : CARACTERISTICAS CROMATICAS DE UN PERFIL DE AGUAMILPA, NAYARIT

Perfil 1			Valor
Horizonte A	(color en húmedo 7.5YR, matiz con valor 4) x (Intensidad 3)	=	12
Horizonte Ab	(color en húmedo 7.5YR, matiz con valor 4) x (Intensidad 5)	=	20
Horizonte Bw	(color en húmedo 7.5YR, matiz con valor 4) x (Intensidad 7)	=	28
Horizonte BC	(color en húmedo 2.5YR, matiz con valor 2) x (Intensidad 5)	=	10
Horizonte C	(color en húmedo 5Y, matiz con valor 1) x (Intensidad 3)	=	3

Los valores obtenidos para los diferentes horizontes muestran grados de intemperismo significativos (columna de Valor) con respecto al material parental. En este caso, se deduce que el horizonte Bw es el más desarrollado. Esto permite interpretar que el suelo ha alcanzado un mayor grado de madurez evolutiva. En los suelos muy jóvenes y poco evolucionados, los valores más altos se obtienen en el horizonte A.

11.4.2 Indice de Hurst

Asigna los siguientes valores al matiz: 5R=5; 7.5R=7.5; 10R=10; 2.5YR=12.5; 5YR=15; 7.5YR=17.5 y 10YR=20. Estos valores se determinan tanto para el suelo en húmedo como para el seco y se multiplican por el producto de la fracción brillo/intensidad.

Figura 21. Tablas de color Munsell.

El nombre del color corresponde a la interpretación de la Notación Munsell que está en la contraportada de la tarjeta.

Ejemplo: matiz = 2.5YR
brillo = 5/
intensidad = /8

Notación Munsell= 2.5YR 5/8 = rojo

11.4.3 Indice de Harden

Compara el color de cada horizonte con el del horizonte C, o con el del CR si está presente. Los cambios en matiz e intensidad que muestren los horizontes con respecto al C son considerados, cada uno, con un valor de 10 puntos. Los valores obtenidos son, en cada caso, multiplicados por el espesor del horizonte.

11.4.4 Indice de Desarrollo del Perfil de Bilzi- Ciolkosz

Se toman en cuenta además del color de los horizontes, las siguientes propiedades del suelo: textura, estructura, tipo de cambio en el contacto entre horizontes y la presencia de película de arcilla. Estas características, determinadas en cada horizonte, se comparan con las del horizonte C o CR. La diferencia que se obtiene de esta comparación, se tabula para cada propiedad y la suma de valores para cada horizonte se interpreta como el grado evolutivo alcanzado por el suelo. La explicación detallada de este procedimiento está contenida en el artículo del autor (Bilzi-Ciolkosz, 1977), intitulado *"A field morphology rating scale for evaluating pedologycal development"*.

Recientemente, Machette (1990) presenta una modificación al índice de Bilzi-Ciolkosz que consiste, fundamentalmente, en introducir otras propiedades físicas y químicas que se relacionan con la alteración y evolución del suelo. Sin embargo, para el uso de este índice se requiere incrementar los análisis de laboratorio, por lo que para los objetivos de esta Guía resulta limitada su aplicación.

OBSERVACION:

Es evidente que en cualquiera de los índices mencionados, los valores altos denotan mayor alteración y mayor desarrollo pedológico. Bajo el esquema que presenta Bilzi-Ciolkosz, los valores obtenidos para cada horizonte pueden ser graficados en función de la profundidad de los diferentes horizontes.

12. PERFIL DE INTEMPERISMO EN SUELOS RESIDUALES DE ZONA TEMPLADA

Como se ha visto en los capítulos anteriores, las diferentes rocas y materiales que al intemperizarse forman suelos, tienden a alterarse química y mineralógicamente de un modo particular, en función de las condiciones medioambientales prevalecientes en el lugar en que se localizan. Las características del material parental también influyen en la dirección y velocidad de la formación del suelo y controlan los contenidos y tipos de las transformaciones minerales que toman lugar durante la génesis del mismo. Por ejemplo, si el material parental está constituído completamente de minerales "no intemperizables" (cuarzo, turmalina, zircón) o "difícilmente intemperizables" bajo un determinado régimen climático (como los feldespatos potásicos), no se forman minerales secundarios o su porcentaje es muy bajo.

Existen en la literatura especializada muchos ejemplos sobre la alteración de los minerales y perfiles de intemperismo, particularmente, en los suelos de zonas tropicales próximas al ecuador (suelos lateríticos) o de suelos de zonas templadas muy frías (suelos podzólicos). En ambos casos, los procesos de alteración involucrados, los minerales secundarios formados, así como los perfiles de intemperismo que se constituyen como resultado de esa alteración, son ampliamente conocidos. Sin embargo, como se ha mencionado en párrafos anteriores, en casi todos los ejemplos presentados, los esquemas sobre los perfiles de intemperismo típicos para esas zonas, en su mayoría, no se ajustan a los modelos presentes en México. Por esa razón, resulta importante mostrar ejemplos de perfiles de intemperismo comunes para el Territorio Nacional, particularmente de la zona templada.

12.1 PERFILES DE INTEMPERISMO FORMADOS A PARTIR DE CENIZAS VOLCANICAS Y BASALTOS

La distribución de basaltos y cenizas volcánicas coincide con las áreas de "suelos fértiles", debido a que estos materiales son particularmente inestables a las condiciones medioambientales, por lo que liberan una gran cantidad de elementos. Las cenizas volcánicas son muy ricas en vidrio, el cual es extremadamente reactivo con el agua. Debido a su intensa disolución, un depósito permeable de ceniza se transforma rápidamente en suelo, en comparación con la transformación de una lava basáltica.

12.1.1 Suelos derivados de Ceniza Volcánica en Zona Templada

Los suelos derivados de depósito de ceniza son ricos en materia orgánica y pertenecen, en su mayoría, al Grupo de los Andosoles, propuesto por FAO-Unesco (1990), Figura 22. Estos suelos, más recientemente llamados Andisoles, se caracterizan por formarse en un período relativamente corto, pero nunca presentan un espesor mayor de 2m. Mientras que los suelos que se forman más lentamente, particularmente sobre basaltos, llegan a alcanzar espesores de 6 ó 7 m, en México, y hasta 30 m en Brasil. La presencia de vidrio ha sido considerada, durante mucho tiempo, como una condición fundamental para la formación de Andosoles. Sin embargo, estos suelos también pueden formarse a partir de una roca cristalina, a condición de que esté constituida por minerales de grano fino, fácil y rápidamente alterables.

Debido a la alta capacidad de reacción del vidrio contenido en la ceniza, con relación a las soluciones del suelo, en estos suelos no existen horizontes transicionales entre los depósitos de ceniza fresca y el suelo (Figura 22). Esto significa que, en los Andisoles derivados de ceniza volcánica no existe ni la capa denominada "saprock" ni la "saprolita". La ceniza fresca es el equivalente aproximado, al concepto "roca no alterada" utilizado por la GEO-USDA (1988). En estos suelos se presenta un perfil de intemperismo de tipo A/Bw/C, siendo el horizonte Bw (B cámbico) la mejor evidencia de alteración de la ceniza. El horizonte Bw se caracteriza por presentar la estructura más parecida al suelo que a la del material que le dió origen. Además, los colores de la matriz del suelo son diferentes a los que caracterizan al horizonte A que le sobreyace y al horizonte C que le subyace. Como se observa en la tabla 14, las características diagnósticas de este perfil de intemperismo son: la disminución regular del contenido de materia orgánica con la profundidad, y un contenido menor de 0.2% de carbono orgánico a una profundidad de 125 cm.

Es necesario recordar que estos suelos, con mucha frecuencia, sepultan a un suelo preexistente (c.f. Figura 5-B), por lo que es indispensable un buen reconocimiento del perfil en campo, para una correcta interpretación de los datos de laboratorio. Como ejemplo se presentan los datos de un perfil de este tipo en la tabla 14.

TABLA 14: CARACTERES FISICOS Y QUIMICOS DE UN PERFIL DE INTEMPERISMO DERIVADO DE CENIZA VOLCANICA

Profundidad (cm)	Horizonte	Color en húmedo	Estructura	Materia Orgánica	PH (Agua)	C.I.C.T. (meq/100g)
0 - 33	A	10YR3/2	Migajosa	5.5%	6.9	29.5
33 - 75	Bw	7.5YR3/4	bloq.Ang.	2.7%	6.8	30.2
75 - 150	C	10YR6/2	Masiva	0.8%	6.4	15.7
SUELO SEPULTADO						
150 - 180	A_b	10YR3/2	Migajosa	3.5%	7.0	27.3
180 - 220	Bw_b	7.5YR5/4	bloq.Ang	2.3%	6.7	28.2

Material parental: Ceniza basáltica.
Clasificación del suelo superior: ***Andosol úmbrico***

FIGURA 22 SUELO DE ZONA TEMPLADA DERIVADO DE CENIZA VOLCANICA

PERFIL DE SUELO RESIDUAL

MORFOLOGIA			PERFIL DE INTEMPERISMO
Profundidad (cm)	Horizonte	Denominación	Geológica*
O			Suelo Residual:
+10	A	Horizonte orgánico	Horizontes enriquecidos con materia orgánica
0-33	Bw_1		
33-83		Horizontes iluviales (B Cámbico)	Horizontes enriquecidos con minerales secundarios iluviados
83-133	Bw_2		
133-175	C		
175	CR (Ceniza Fresca)		Roca parental (Roca sana)

Clasificación: Andosol
Localidad: Morelos. Mex.
Colectó: M. en C. Jose L. Hernández

OBSERVACIONES

- En los Andosoles derivados de ceniza volcánica no existen las capas denominadas "saprock" ni la "saprolita". Esto se debe a la rápida alteración de la ceniza volcánica que no permite la formación de esos estadios.
- La ceniza "fresca" podría ser el equivalente del concepto "roca no alterada" (UV) utilizado por la Geotechnical Control Office (1988).

* Términos adoptados por la GEO-USDA 1988

Como se observa en la tabla 14, los primeros 150 cm de espesor representan el perfil de intemperismo de un Andosol constituido por la alteración de ceniza volcánica de naturaleza básica. Este suelo está sepultando a otro Andosol derivado de ceniza andesítica. Son evidentes los cambios abruptos entre ambos suelos en cuanto a color (Horizonte C vs. A), estructura, porcentaje de materia orgánica, pH y el valor de la capacidad de intercambio catiónico. En el caso del porcentaje de materia orgánica, éste desciende gradualmente con la profundidad, dentro de los primeros 150 cm. Después, se incrementa notablemente (3.5 %) debido a la presencia de un horizonte A sepultado (A_b) y tiende a descender nuevamente (Bw_b).

El caso anterior, trata dos suelos residuales formados en épocas diferentes. Sin embargo, existen otros casos en los que un suelo se puede formar a partir de dos tipos de materiales parentales. Por ejemplo, la figura 23 muestra un depósito de ceniza volcánica, de 33 cm de espesor, que sobreyace a lo que fué un horizonte C de un suelo preexistente (de 33 a 55/67 cm). El horizonte C se formó por el intemperismo de capas lacustres asociadas con materiales piroclásticos. Actualmente, este horizonte C forma parte del suelo que lo sepultó, es decir, está aportando elementos al suelo volcánico que le sobreyace. En este caso, el suelo se denomina "policíclico", debido a que su perfil está constituido por materiales intemperizados en dos periodos diferentes. El suelo en su conjunto (A/C) se considera residual y la "saprolita" que se presenta entre los 33 y 91 cm de profundidad, es producto de la alteración de las capas lacustres.

12.1.2 Suelos derivados de Basalto en Zona Templada

Los perfiles de intemperismo formados sobre rocas basálticas son de gran espesor, algunos de ellos, presentan una organización en su perfil, similar a la descrita para suelos del trópico cálido-húmedo, especialmente, cuando se alteran en condiciones de buen drenaje. Estos suelos pueden presentar un perfil de intemperismo constituido por "roca sana", "saprock", "saprolita" y "suelo residual". En este último, es posible reconocer: (1) una zona enriquecida por arcillas y productos secundarios (Horizonte B) y (2) una zona enriquecida por materiales orgánicos (Horizonte A). En la figura 24 se ilustra un perfil de intemperismo que se ajusta a esta descripción.

Sin embargo, existen algunas diferencias entre estos perfiles de suelos de zona templada y los del trópico cálido-húmedo, como son: (1) diferencias en el porcentaje de óxidos; (2) en el tipo de arcilla y (3) en el espesor de los horizontes. Estas diferencias pueden ocasionar comportamientos diversos entre estos suelos. El contenido y tipo de arcillas diferentes dan, limites líquidos y plásticos muy distintos, por mencionar sólo algunas de sus propiedades.

FIGURA **23** SUELO DE ZONA TEMPLADA DE ORIGEN POLICICLICO

PERFIL DE SUELO RESIDUAL

MORFOLOGIA Profundidad (Cm)	Horizonte	Denominación	PERFIL DE INTEMPERISMO (GEO-USDA 1988) Suelo Residual:
0-33	A	Horizonte Orgánico	Horizonte enriquecido en materia Orgánica
33-55/67	Cb	Horizonte Sepultado	"Saprolita" Pw 0/30
55/67-91	Capas Lacustres	Material Parental formador del horizonte Cb	"Saprolita" Pw 30/50
91-141			"Saprock" Pw50/90 Pw90/100
141		Roca Parental	Roca inalterada UW

Clasificación: Andosol húmico

OBSERVACIONES:

El horizonte A se formó a partir del intemperismo de ceniza volcánica de edad Holocénica.Esta ceniza sepultó a un horizonte C formado por la alteración de capas lacustres de edad Pleistocénica (Paleosuelo)

- Actualmente, tanto el horizonte A como el horizonte C, participan de la misma dinámica medio ambiental, constituyendo un perfil de suelo residual. Debido a que su perfil está constituído por materiales intemperizados en dos periodos diferentes; el suelo se denomina policiclico.

Diversos autores como Blight (1990), Cen (1990), Sridharan (1990), entre otros, han desarrollado esquemas completos sobre el intemperismo de suelos tropicales y su aplicación práctica en Ingeniería civil, pero aún son muy escasas las investigaciones sobre la alteración, procesos y aplicación ingenieril en muchos suelos de zona templada. El estudio de la relación entre las condiciones de formación del suelo y la variación de sus características y propiedades geotécnicas es un tema actual de investigación en el Instituto de Geología (Carreón y Ortega, 1996; Carreón, 1997).

12.2 PERFIL DE INTEMPERISMO

Los suelos de zona templada resultan importantes debido a su extensión en México. El ejemplo del perfil de intemperismo que se describe a continuación, corresponde al de un suelo residual, bien desarrollado a partir de basalto, que se altera en condiciones de clima templado, en un medio bien drenado. En este contexto medioambiental, normalmente, el vidrio volcánico y los cristales de olivino contenidos en las lavas basálticas han sido alterados (alteración hidrotermal) durante el período de enfriamiento de esta roca en la superficie. Con frecuencia, el vidrio y el olivino han sido parcialmente remplazados por minerales arcillosos microcristalinos y por compuestos de óxidos de hierro. Consecuentemente, las reacciones de intemperismo abarcan no sólo a los minerales primarios (olivino, piroxenos y plagioclasas), sino, también, a los vidrios hidratados y a los minerales hidratados productos de alteración hidrotermal. En esta fase, la roca basáltica se considera, tomando como base a la GEO-USDA (1988), un integrado entre roca fresca (UW) y roca ligeramente alterada (PW90/100).

Los diversos compuestos originados durante este intemperismo temprano, no reaccionan al mismo tiempo. Algunos de ellos son transformados durante las primeras etapas de alteración como el olivino, el vidrio hidratado y los productos de hidrotermalismo. Otros, como las plagioclasas y piroxenos, sólo forman productos de alteración secundaria hasta que la roca está de moderada (PW 50/90) a altamente alterada (PW 30/50), es decir, hasta que presenta las características de una "saprolita" (GEO-USDA, 1988). La paragénesis de los minerales primarios de una roca basáltica que se altera bajo condiciones de clima templado, se presenta en la tabla 15 y se ilustra en la figura 25.

A medida que avanza el intemperismo y, consecuentemente, la alteración, como sucede con la mayoría de las rocas básicas, el calcio, sodio, potasio, magnesio y sílice, son lavados fuera del perfil del suelo. Mientras que el aluminio y el hierro (Fe^{3+}) se concentran en los horizontes y capas que han sufrido mayor intemperismo (PW 0/30). Se sabe que la celadonita, originada por la alteración hidrotermal del vidrio, es remplazada a medida que la roca se intemperiza más por Fe-Beidellita+Haloisita. La Saponita-Nontronita, originada por la alteración hidrotermal del olivino (iddingsita), es remplazada por Fe-beidellita+óxidos de hierro.

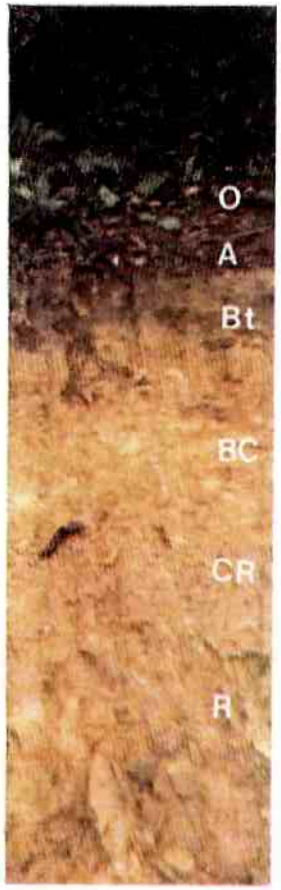
FIGURA 24 PERFIL DE SUELO RESIDUAL

CLASIFICACION
Cambisol
Colectó: Otilio Acevedo
Localidad: Edo. de Mex.

PERFIL MORFOLOGICO			PERFIL DE INTEMPERISMO
Profundidad			
--			
0-12 cm	A	Horizonte Orgánico	Horizonte de enriquecimiento en materia orgánica
–			
12-39 cm.	Bw	Horizonte B Cámbico	Horizonte de enriquecimiento en minerales secundarios
--			
39-59 cm.		Bc	
--			
59-80 cm.	C	Capa de Suelo (Ab)	
–	DISCONTINUIDAD LITOLOGICA		SAPROLITA
--		Capas Lacustres constituidas por piroclásticos	
–			Roca fresca
–			

FIGURA 25 SUELO DE ZONA TEMPLADA DERIVADO DE BASALTO

PERFIL DE SUELO RESIDUAL



MORFOLOGIA Profundidad (cm)	Horizonte	Denominación	PERFIL DE INTEMPERISMO (GEO-USDA,1988) SUELO RESIDUAL:
+2	O	Horizontes orgánicos	Horizontes enriquecidos en materia orgánica
0-17	A		
17-61	Bt	Horizonte argílico	Horizontes enriquecidos en arcilla iluvial
61-81	BC	Horizonte de alteración	Roca completamente alterada: PW0/30 ("Saprolita")
81-99	CR	Material parental	Roca altamente alterada: PW30/50 ("Saprolita")
99	R	Roca parental	Roca moderadamente alterada: PW50/90 ("Saprock")
			Roca ligeramente alterada: PW90/100 ("Saprock")
			Roca inalterada: UW (Roca fresca)

Clasificación: Luvisol
Colectó:Carolina Jasso
OBSERVACIONES:

- Las características que diferencian, de modo aproximado, los términos "saprock" y "saprolita" pueden ser definidos del siguiente modo: El término "saprock" hace referencia a una roca que comienza a ser friable. Los granos individuales pueden ser destruidos con los dedos, pero la estructura cristalina aún es observable. En la "saprolita", el material se caracteriza por una alteración mayor que la hace friable y porosa. Los minerales primarios han sido con excepción del cuarzo, prácticamente destruidos. El análisis petrográfico sólo muestra la presencia de minerales secundarios.

En cada mineral primario existe una reacción de remplazo: sin embargo, la alteración final del basalto, en condiciones de clima templado y buen drenaje, generalmente, conduce a la siguiente secuencia: Haloisita - Fe - Beidellita - Fe - Mn - óxidos. (Tabla 15)

TABLA 15 PRODUCTOS DE ALTERACION PRESENTES EN LAS CAPAS DE UN PERFIL DE INTEMPERISMO DERIVADO DE BASALTO.

Zonas de alteración GEO-USDA.	OLIVINO	MINERALES HIDRATADOS	VIDRIO	LABRADORITA	PIROXENO
Roca inalterada a lig.alterada (Uw-Pw 90/100)	• Iddingsita	• Celadonita • Fe-Beidellita • Haloisita	• Vidrio hidratado	----------	----------
Roca de ligera a moderadamente alterada (Pw90/100-) (Pw50/90)	• Nontronita • Fe-Saponita • Iddingsita	• Fe-Beidellita • Haloisita • Calcita	• Vidrio hidratado • minerales cripto cristalinos	----------	----------
Roca de moderada a altamente alterada Pw50/90-Pw30/50)	• Iddingsita • Fe-Beidellita • Haloisita	• Celadonita-Smectita • Fe-Beidellita • Haloisita	• Vidrio hidratado • minerales cripto cristalinos	• Haloisita	• Fe-Beidellita • Fe-óxidos
Roca completamente alterada (Pw 0-30)	• Fe-Beidellita • Haloisita	• Haloisita	• Haloisita	• Haloisita	• Fe-Beidellita
Suelo residual (zona enriquecida con arcillas)	• Haloisita	----------	• Fe-Beidellita	----------	Fe-Mn-óxidos

- Iddingsita: $MgO.Fe_2O_3.3S_1O_2.4H_2O$
- Celadonita: $K\ (Mg+Fe)\ (Fe^{+3}Al)\ Si_4O_{10}(OH)_2$
- Beidellita (Beidellita): Cu_2Se
- Nontronita: $Na_{2\cdot33}Fe_2^{+3}\ (Al,S_1)_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$
- Haloisita: $Al_2S_{12}O_5(OH)_4$
- Esmectita (Montmorillonita)
- Calcita: $CaCO_3$

Una característica importante de un suelo formado a partir de rocas basálticas, bajo condiciones de clima templado, es la presencia de fisuras y grietas en sus primeros estadíos de formación. En varios perfiles de intemperismo se ha observado que se depositan diversos tipos de minerales. De ahí que, en los estados iniciales (PW90/100, PW50/90), la presencia de Calcita sea dominante. Durante las etapas de alteración de moderada (PW50/90) a alta (PW30/50), la Haloisita, Fe-Beidellita y los óxidos de hierro predominan.

Finalmente cuando la roca está completamente alterada la Fe-Beidellita, Haloisita y óxidos de Fe-Mn. son muy abundantes. Cabe hacer notar que en este tipo de perfiles, cuando las arcillas predominantes (>85%) son halloisiticas no se observan fisuras ni grietas. De acuerdo al trabajo de Wilding (1988), se requiere un contenido mínimo de 15% de montmorillonita para que el suelo sea susceptible al agrietamiento. (carácter vértico).

Es importante recordar que el suelo de origen basáltico, presentado en este Texto Guía como ejemplo de un perfil de intemperismo, se ha constituido bajo condiciones de un clima templado y drenaje eficiente. En condiciones como éstas, el suelo tiende a formar Luvisoles (c.f. Figura 5F) pero, si existe mal drenaje y acumulación de bases, se forman los Vertisoles.(c.f. Figura 5B). En clima cálido-húmedo y con buen drenaje, es posible encontrar una secuencia de Acrisol-Nitosol-Ferralsol(c.f. Figura 5G).

En cada uno de los casos expuestos, los minerales secundarios, principalmente las arcillas, varían en su naturaleza minerológica y, consecuentemente, los suelos que conforman varían en algunas de sus propiedades geotécnicas. Por ejemplo, se ha observado que en suelos de zonas templadas, derivados de basalto y que contienen un 35% de arcilla haloisítica, el límite líquido es menor a 50%, en tanto que el índice de plasticidad oscila entre 13 a 16%. En suelos también derivados de basalto, pero formados en condiciones más secas y con drenaje restringido, se propicia la formación de arcillas montmorilloniticas. Como ejemplo, un suelo con 35% de esta arcilla, dió valores de límite líquido mayores de 50%, y un índice de plasticidad aproximado de 30%. Este ejemplo reitera la importancia del porcentaje y del tipo de arcilla presente, en las propiedades de un suelo, y permite resaltar la relación entre estas características con el medio en donde éste se desarrolla.

OBSERVACIONES:

1. Existen otros ejemplos de perfiles de intemperismo para suelos residuales que se alteran bajo las condiciones de clima templado. Para su análisis, se recomienda consultar el libro editado por B. Velde, "Origin and minerology of clays" (1995) Ed. Springer.Verlag, Berlin Heidelberg.

2. Con excepción de las soluciones verdaderas y de la eliminación del hierro, para los especialistas en suelos, la intemperización es un proceso que modifica los materiales del suelo y, por debajo de él, los procesos químicos de la intemperización tienden a reducir el material inicial al nivel de energía más bajo y estable ante las condiciones ambientales.

PARTE IV : DISCUSION, INTERPRETACION Y APLICACION DE LA INFORMACION

Objetivos:

- Establecer las limitaciones prácticas que tienen las definiciones actuales sobre los conceptos de Suelo Residual y Suelo Transportado.

- Proponer un método simplificado para el estudio ordenado y sistemático de los suelos residuales y tanto de campo como de los análisis transportados de México.

- Indicar los métodos y procedimientos aceptados por la Ciencia del Suelo, para caracterizar e interpretar, con un mínimo de incertidumbre, las condiciones formadoras de suelos en general y, en particular, de los suelos de interés en el ámbito de la Ingeniería Civil.

- Establecer un modelo para la interpretación de los datos de investigación edáfica, obtenidos en el campo, laboratorio y gabinete, a partir de este modelo.

- Proponer un sistema para el ordenamiento y aplicación de la información edáfica a proyectos de Ingeniería Civil, Sanitaria y Agronómica, a través de ejemplos.

13 APLICACION DE LOS CONCEPTOS DE LA CIENCIA DEL SUELO EN INGENIERIA CIVIL

13.1 LIMITACIONES EN EL USO DE LAS DEFINICIONES SOBRE LOS SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS

Lambe (1984), define al suelo como "el producto de la desintegración mecánica (física) o de la descomposición química de las rocas". Esta definición es correcta, aunque es necesario aclarar que tanto la desintegración física como la alteración química se presentan de modo simultáneo, y que depende, principalmente, de las condiciones climáticas el que una de ellas predomine durante la formación del suelo. Con base en esta definición de suelo se generan los conceptos de *Suelos Residuales* y *Suelos Transportados*. Así, si el suelo resultante de la alteración y desintegración permanece "in situ" sobre la roca que le dió origen recibe el nombre de "Residual"; pero si éste es removido por cualquier agente de transporte, el suelo se conoce como "Transportado". Ambos conceptos, aunque son correctos, plantean ciertas dificultades para su interpretación en la práctica.

Para una mejor identificación del origen de los suelos se recomienda considerar las siguientes observaciones:

- El hecho de que un suelo sobreyazca una roca, no indica necesariamente que éste suelo se haya formado a partir de la misma, es decir, que se trate de un suelo residual.
- Si se considera como una característica indicativa de un suelo residual la presencia de estructuras "relictas" o heredadas de la roca madre (como diaclasas o juntas estratigráficas), se debe tener en cuenta que existen muchos suelos residuales, tan evolucionados, que ya no muestran dichas estructuras.
- Si se considera a la estratificación como una característica indicativa de un suelo transportado, se debe tener en cuenta que en muchos de estos suelos, y particularmente aquellos de textura fina o media, los contactos entre estratos son a menudo difíciles de observar en el perfil.
- Existen suelos mixtos que presentan en su perfil tanto horizontes formados "*in situ*" (de origen residual) como capas de origen transportado. Las diferencias entre ambos generalmente son difíciles de reconocer a simple vista.
- Existen muchos suelos, semejantes desde el punto de vista de sus propiedades físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas, que tienen orígenes distintos. Estos suelos pudieron formarse a partir de una roca o a partir de un material transportado que se estabilizó después de su depósito. Es el caso de muchos Vertisoles y suelos derivados de cenizas volcánicas. (Andisoles).
- Es seguro que el uso de los términos "Residual" y "Transportado" así como la identificación de los suelos en cada caso, resulte menos complicada en los países donde exista un número reducido de grupos de suelos, pero que ocupan grandes extensiones. Se debe tener siempre en cuenta que éste no es el caso de México, en donde el número y variabilidad espacial en la distribución de los suelos es muy importante.

13.2 LIMITACIONES PARA LA APLICACION DEL CONCEPTO DE SUELO RESIDUAL TROPICAL

Recientemente investigadores como Brand (1985), Mitchell y Coutinho (1991), Rahardjo (1993) y Lacerda, W.A. (1996) han realizado importantes trabajos sobre los suelos del trópico cálido-húmedo de América. En estos trabajos se ha intentado establecer definiciones sobre el origen y características del suelo para fines de Ingeniería. A partir de esto se ha propuesto la utilización de varios conceptos, entre los que destacan los de "suelo residual", "suelo transportado", "suelo laterítico", "suelo saprolítico" y de "perfil de alteración". Estos conceptos son aceptables, sin embargo es importante hacer notar que el esquema general que caracteriza a estas definiciones, sólo es aplicable en la realidad a suelos antiguos altamente evolucionados, que muestran un equilibrio perfecto con su entorno. Este es el caso de las Unidades de Suelos denominadas Ferralsoles, Nitisoles, Plintisoles y Acrisoles (c.f. Figura 5, Capítulo 3). Estos suelos son muy frecuentes en el Trópico Ecuatorial y en países como Colombia y Brasil, en regiones que se caracterizan por tener una precipitación y temperatura promedio anual superior a 1000 mm y 26°C, respectivamente un paisaje antiguo asociado a una gran estabilidad del relieve. Se hace

notar que en el Territorio Nacional, las áreas que reúnen estas condiciones son mínimas (c.f. Parte II).

En México existen aproximadamente 417 000 km^2 de zonas con climas tropicales y subtropicales (Gama, 1996). Sin embargo, debido a la variedad de eventos geodinámicos que se han presentado en estas regiones, los suelos que se han formado en ellas evolutivamente no se pueden ajustar a los esquemas teóricos establecidos para zonas ecuatoriales. Esto indica la necesidad de establecer conceptos y definiciones propios a los suelos de México, si se desea lograr una correlación adecuada entre las características de los mismos y una mejor comprensión de su comportamiento, particularmente con el objeto de conocer sus posibilidades de utilización en obras de Ingeniería Civil.

De lo anterior se entiende que la propuesta realizada por el Comité sobre Suelos Tropicales de la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, que sugiere el uso de términos específicos como "Suelos Lateríticos" y "Suelos Saprolíticos", sólo puede ser totalmente válida para países localizados en el Trópico cálido-húmedo. La utilización de estos términos para los suelos de México debe ser limitada y considerar los siguientes puntos:

- Muchos suelos residuales existentes en México, no presentan un perfil de alteración como los descritos de modo ortodoxo.

- Con alguna frecuencia, en los suelos del trópico cálido-húmedo de México la roca parental, así como la roca alterada, se localizan a tal profundidad que resulta muy difícil, y a veces imposible, observarla.

- Normalmente es muy difícil diferenciar, en campo, una roca altamente alterada (saprock) de una saprolita y más aún establecer límites físicos entre estos horizontes, ya que normalmente se trata de un cambio muy gradual. Cabe mencionar que el esquema del perfil de alteración que presenta Pastore (1992), en donde se diferencian ambos horizontes, sólo es aplicable a suelos lateríticos o a suelos que muestran procesos de laterización, los cuales son muy raros en México.

- A menudo es fácil confundir un material coluvial, e incluso aluvial, con una saprolita o con un saprock. Por esta razón, Brand (1985) incluye el coluvión y los suelos residuales maduros bajo la misma clasificación para propósitos de Ingeniería Geotécnica.

- El concepto de "suelo residual joven" o "saprolítico" también es limitativo, ya que sólo contempla, en el caso de México, aquellos suelos que muestran un horizonte B Cámbico o B_w (c.f. Capitulo 2, Parte I).

14 ESTUDIO SISTEMATICO DE LOS SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS

A continuación se presentan las etapas y fases que integran la metodología sobre la investigación básica y aplicada de los suelos. Cabe señalar que, para evaluar adecuadamente la planeación y un desarrollo metodológico, es necesario establecer una ruta óptima de trabajo estableciendo un cronograma de actividades, así como el presupuesto a cada una de ellas. En este caso, la metodología ha sido adaptada al estudio de suelos residuales y transportados.

14.1 ETAPA A . TRABAJO DE GABINETE PRELIMINAR

14.1.1 Fase A.1 . Compilación de la Información Básica

Consiste en reunir la información documental y cartográfica existente sobre el área de estudio. La información documental se refiere a todo tipo de estudios realizados en la zona: Geología de detalle, Geofísica, antecedentes de obras civiles, planeación urbana en su caso, etc. La información cartográfica deberá incluir, cuando menos, la siguiente temática (de acuerdo a la cartografía de INEGI):

- Geología (ambiente y litología: Cartas geológicas escala 1:50 000; factor: material parental).
- Geomorfología (pendientes y drenaje superficial).
- Climatología (precipitación y temperatura: Cartas climatológicas; factor: clima).
- Topografía y Planimetría: Cartas topográficas escala 1:50 000 (factor: relieve).
- Suelos (Grandes Grupos y distribución); Cartas edafológicas.
- Uso del Suelo escala 1:50 000
- Riesgos Ambientales escala 1:50 000

14.1.2 Fase A.2 . Empleo de Técnicas de Teledetección

Con base en la información compilada y seleccionada (Fase A.1) se procede a la determinación, sobre fotografías aéreas pancromáticas (blanco y negro). Las escalas pueden ser 1: 25 000 o 1:50 000, de los diferentes "patrones espectrales" presentes, en particular, los relativos a las características estructurales, geológico-litológicas, y topográficas-geomorfológicas del medio, así como de la distribución de suelos y uso de los mismos. Sobre esas fotografías, se indican los sitios que deben ser estudiados y muestreados y se establece el recorrido a seguir, de tal manera que se cubran las áreas más representativas de la zona de estudio. Es importante establecer durante esta etapa, diversas hipótesis de trabajo.

14.1.3 Fase A.3 . Análisis y Valoración de la Información

En esta fase se determina la calidad, nivel de detalle (escala) y antigüedad de los datos. Solamente se deben utilizar aquellos datos que muestren el menor nivel de incertidumbre, de acuerdo al criterio y experiencia del investigador. No es conveniente asociar indiscriminadamente información de diferentes épocas o a diferentes escalas.

14.2 ETAPA B. TRABAJO O LEVANTAMIENTO DE CAMPO

14.2.1 Fase B.1. Inspección de Campo Preliminar

Con base a la información seleccionada durante la fases A.2 y A.3, se lleva a cabo un primer recorrido de campo en la zona de estudio. Para este recorrido que, en general, es de corta duración se deben fijar los siguientes objetivos:

- Identificar en campo los "patrones espectrales" observados en la fotografía, (tono y textura fotográfica).
- Rectificar y/o ratificar los sitios seleccionados para el análisis y muestreo.
- Evaluar los riesgos ambientales presentes.
- Evaluar las posibles dificultades para llevar a cabo el estudio.

En esta fase, es importante obtener una idea clara sobre la distribución de los suelos residuales y transportados en la superficie del terreno. Además, se establecerán los principales rasgos de la morfología de los suelos. Es recomendable realizar esta primera inspección con el apoyo de un Geólogo y un Edafólogo.

14.2.2 Fase B.2 . Trabajo de campo

A partir de las observaciones e ideas establecidas durante la inspección de campo preliminar, procede la realización de las siguientes actividades:

- Localizar los sitios definitivos, donde se hará la descripción y el muestreo, en las fotografías aéreas y/o en una carta topográfica.
- Definir el número representativo de sitios de muestreo, así como el número necesario de verificaciones (entendiéndose por éstas las observaciones suplementarias, análisis de cartas, barrenaciones, etc.) para cubrir el área de estudio.
- Planear el recorrido considerando los sitios representativos, desde el punto de vista de los suelos, para estimar el número de días necesarios para ello, así como los costos involucrados.
- Iniciar el trabajo de campo propiamente dicho.

Durante esta etapa, es importante tener en mente los siguientes aspectos:

- Durante el levantamiento en campo, deben identificarse con exactitud las capas y/u horizontes que constituyen el perfil del suelo. Los conceptos presentados en esta Guía deben hacer posible, en la mayoría de los casos, esta evaluación.
- Con base al reconocimiento arriba mencionado, es necesario inferir en el campo si se trata de un suelo residual o transportado. Los análisis de laboratorio sólo deben ser utilizados para validar las propuestas establecidas en el campo, no para definir el origen del suelo ya que, frecuentemente, las aseveraciones solamente basadas en estos resultados son incorrectas.
- Es recomendable establecer, con base en las técnicas de análisis físicos y químicos utilizadas en campo, las posibilidades y limitantes que presenta un suelo para un determinado uso.

Durante el trabajo de campo, se deben considerar los siguientes objetivos:

⇒ Descripción y muestreo de los perfiles de suelos representativos.
⇒ Clasificación de los suelos.
⇒ Reconocimiento de las características que denotan su posible origen.
⇒ Evaluación de los riesgos que implica su uso.
⇒ Estimación de los factores medioambientales que pueden influir o limitar el alcance y realización del proyecto de trabajo, con relación a los suelos.

14.3 ETAPA C . ANALISIS DE LABORATORIO

Las determinaciones físicas y químicas fundamentales para verificar si un suelo es residual o transportado son presentadas en la siguiente tabla:

TABLA 16. ANALISIS BASICOS DE SUELOS

Físicas	Químicas
1. Color	1. pH
2. Granulometría (textura)	2. Materia Orgánica (%)
3. Estructura	3. Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT)
4. Permeabilidad	4. Bases intercambiables (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+})

Con frecuencia, los análisis relativos a la granulometría (llamada *textura)* en lo concerniente al material fino y al porcentaje y distribución de la materia orgánica en el perfil del suelo, son suficientes para la identificación del origen residual o transportado del suelo.

La información detallada sobre estos procedimientos en campo y laboratorio es presentada en la siguiente publicación:

- USDA, 1986. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D.C., U.S.A. 90 p.

14.4 ETAPA D: PREPARACION DE RESULTADOS.

Previamente a la interpretación de resultados se debe cumplir con dos aspectos metodológicos que a continuación se indican:

14.4.1 Ordenamiento de la Información Compilada.

Consiste en presentar, de manera sistemática, a través de tablas, figuras y/o gráficas, los datos generados durante el estudio del suelo. Cada tabla, figura o gráfica debe estar acompañada de un **texto** descriptivo y/o interpretativo, claro y breve.

14.4.2 Establecimiento de Conceptos Básicos.

Con el fin de realizar una interpretación rápida y confiable sobre las características de los suelos identificados en campo, y de los datos generados en el laboratorio, es conveniente tener en cuenta los siguientes principios:

- Los datos de laboratorio tienen como única finalidad, validar las observaciones e hipótesis elaboradas en el trabajo de campo. Esto significa que los datos de laboratorio están subordinados a la calidad de información de campo. En este contexto, por ellos mismos, tienen en la mayoría de los casos una importancia secundaria.

- Es importante que los datos de laboratorio sean obtenidos, por duplicado, y que sea una sola persona la que se encargue de los análisis físicos y otra persona la que realice los análisis químicos.

- Para la interpretación de los datos siempre debe existir un orden establecido. De tal forma que, primero se deben analizar los datos de campo, tanto los relativos al medioambiente como los concernientes al perfil de suelo. Posteriormente, los datos físicos y químicos obtenidos en laboratorio y finalmente los mecánicos.

14.5 METODO Y PROCEDIMIENTO

14.5.1 Información Geográfica y Ambiental

Como se discute en la Parte II de esta Guía, la información más importante que debe, inicialmente, obtenerse es la correspondiente al medio físico: (1) localización y delimitación del área de estudio; (2) tipo climático, precipitación y temperatura; (3) litología; (4) relieve, con sus componentes: geoforma, pendiente y drenaje; (5) presencia o ausencia de manto freático ; (6) presencia o ausencia de encharcamiento o inundación; (7) altitud; (8) uso del suelo; (9) erosión, tipo y magnitud; (10) unidades de suelos y (11) riesgos (Tabla 17). La definición y evaluación de estas variables está contenida en el Anexo 5

Entre las Instituciones a las que se puede tener acceso para obtener esta información están:
INEGI y los Institutos de Geología y Geografía.
Generalmente, la información disponible permite tener una visión regional, o primera aproximación y, en algunos casos, semidetallada de una determinada zona.

El objetivo de compilar esta información es el de caracterizar, con un mínimo de incertidumbre, las condiciones ambientales en las cuales se forman los diferentes suelos de interés para Ingeniería Civil y Geotecnia. Como se mencionó en la Parte I, Capítulo 3, el número de unidades de suelos presentes en el Territorio Nacional es grande, y cada una puede presentar un comportamiento físico y mecánico diferente. Por lo tanto, en la medida en que en los sitios estudiados y descritos se incluyan las 11 variables medioambientales antes mencionadas, se incrementarán las probabilidades de pronosticar, con más del 85% de confiabilidad, las unidades taxonómicas de suelos de una determinada región, y también se incrementará significativamente el Banco de Datos.

Información adicional sobre el suelo y, en general, sobre el medio ambiente, se puede obtener de fotografías aéreas, utilizando la metodología y cálculos indicados en el capítulo 4.2., sobre los índices de Weinert y los relativos a la lixiviación de suelos y alteración de rocas, los cuales probablemente se correlacionan con la estabilidad de taludes y, en varios casos, con el movimiento en masa. Otros datos importantes son los correspondientes al clima del suelo, (como se discute en el Subcapítulo 4.4) ya que pueden dar una idea muy aproximada sobre el intemperismo de la roca y del suelo, así como de los minerales presentes, incluyendo el tipo de arcillas (Parte III)

14.5.2 Información sobre la Morfología del Perfil

En los datos sobre la morfología del perfil de suelo, se deberán incluir las características definidas en el Anexo 5 de esta Guía, como son: (1) profundidad efectiva del suelo y espesor de los horizontes; (2) determinación de los horizontes o capas presentes utilizando, para ello, los conceptos establecidos en la Parte I, Capítulo 2 de esta Guía; (3) límite entre capas u horizontes, incluyendo la forma del límite (plano, ondulado, irregular, etc.) y el contraste en color y textura entre éstas (difuso, claro, abrupto, etc.); (4) color en seco y en húmedo de cada horizonte y/o capa; (5) textura al tacto; (6) tipo, tamaño y grado de desarrollo de la estructura; (7) la consistencia; (8) adhesividad; (9) plasticidad; (10) tamaño, densidad y forma de poros (densidad por dm^2); (11) presencia de recubrimientos (películas) sobre gravas, terrones, etc. y su naturaleza; (12) presencia de facetas de presión - fricción; (13) presencia de gravas y piedras, forma y porcentaje; (14) presencia de grietas y/o fisuras; (15) concreciones; (tamaño y naturaleza); (16) manchas (color, tamaño, forma y contraste); (17) inclusiones; (18) raíces; (19) características de la superficie y (20) drenaje interno. La definición y cuantificación de estas variables, como se mencionó anteriormente, están contenidas en el Anexo 5.

Estos datos resultan suficientes para decidir, en campo, si se trata de un suelo residual transportado o de un suelo, de origen transportado, que ya se comporta como un suelo residual. Los conceptos establecidos en la Parte III de esta Guía, resultan útiles para cumplir con este objetivo. Además como es necesario dar, en un principio, una clasificación para los suelos estudiados, aunque ésta sea de carácter provisional, la Tabla 1 y las fotografías correspondientes a los perfiles de suelo presentados en el Capítulo 3, Subcapítulo 3.4, permiten que, por comparación, se alcance este segundo objetivo.

OBSERVACIONES

- El tipo climático puede ser definido fácilmente, al consultar la carta de climas editada por INEGI, a escala 1:500 000
- Como se observa en la tabla 17, (ficha de descripción), existen algunos casilleros que han sido subdivididos, por ejemplo:
- **Separación.** La primera subdivisión se utiliza para expresar la forma y la segunda para caracterizar el contraste (Anexo 5). Así, 3 3 indica que la forma de la separación es irregular (3) y que el contraste es gradual (3).
- Otro caso es el de la **estructura**; por ejemplo: la clave 1 3 3 significa que la estructura tiene forma similar al migajón (1), que es de tamaño mediano (3) y presenta un desarrollo moderado (3).

Estos ejemplos deben ser aplicados, además, a los siguientes casos: consistencia, poros, gravas-piedras, grietas-fisuras, manchas y raices. (casilleros 7, 10, 13, 14, 16, 18)

14.5.3 Información sobre el Análisis de Laboratorio

Para la interpretación de los datos de laboratorio es necesario seguir un orden lógico. En primer lugar, se deben interpretar los análisis físicos, iniciando por los básicos como: color, granulometría, estructura y permeabilidad; los cuales se consideran absolutamente necesarios de realizar. Entre algunos análisis especiales que ocasionalmente se requieren, está el potencial de contracción - expansión de cada horizonte. Se continúa con los fisicoquímicos como: el pH; la conductividad eléctrica del extracto de saturación (mmhos/cm^3); capacidad de intercambio catiónico total (CICT), terminando con los químicos como: bases intercambiales y materia orgánica. Para los suelos salinos y/o sódicos; como es el caso de los Solontchak y Solonetz (representados en el Subcapítulo 3.4 de esta Guía) es necesario determinar, además, salinidad (mmhos/cm^3) como conductividad eléctrica.

En algunos casos se requiere también realizar los análisis e incluir los datos relacionados con la Clasificación Unificada y sobre el Indice de Grupo AASHTO (Capacidad de carga).

En párrafos posteriores se discute toda la información antes indicada, la cual es necesaria para evaluar las posibilidades de uso de un determinado suelo en obras de Ingeniería civil, sanitaria y de construcción, incluyendo vías terrestres e Ingeniería hidráulica.

14.6 INTERPRETACION DE LA INFORMACION CON FINES DE APLICACION

14.6.1 Consideraciones Previas.

En la tabla 17 (correspondiente a la ficha para la descripción ambiental y del suelo) se da un ejemplo de un suelo de cuya adecuada interpretación puede depender la realización de obras de Ingeniería civil. Según las propiedades del suelo que se ejemplifica, éste puede ser evaluado, para su uso, en tres categorías: (1) con limitaciones ligeras; (2) con limitaciones moderadas y (3) con limitaciones fuertes o severas.

Un suelo con limitaciones ligeras no presenta ningún obstáculo para un uso determinado. Las limitaciones moderadas, indican que el suelo presenta restricciones para su uso, superables con ciertas modificaciones en el diseño. Finalmente, un suelo con limitaciones severas significa que, para usarlo, se requieren grandes cambios en el diseño, una construcción muy especial y un mantenimiento contínuo de las obras civiles construídas.

Para lograr una decisión adecuada sobre el probable uso del suelo, con base en una interpretación confiable sobre las limitantes que presenta, se debe utilizar el siguiente procedimiento:

- Interpretación de la información medioambiental.
- Interpretación y relaciones entre los datos ambientales y el perfil del suelo.
- Interpretación de los análisis físicos, fisicoquímicos, químicos y mecánicos.

Con base en estas normas se discuten, a modo de ejemplo, las propiedades del suelo, con la finalidad de establecer si el suelo en discusión es adecuado para la construcción de: (1) caminos y calles y (2) un campo de absorción para pozos sépticos (ejemplos 1 y 2)

El suelo se califica como la sub-base para la construcción de caminos y calles. La interpretación de la información permite detectar las características del suelo que influyen en el excavado, manejo y su capacidad de carga. En el caso de los campos de absorción, se consideran las limitaciones del suelo para absorber el efluente de las fosas sépticas; considerando la profundidad a la que se coloca la tubería de descarga. El suelo, para este uso, se califica de los 60 a los 150 cm de profundidad y debe ser lo suficientemente permeable para que el efluente pueda absorberse, pero no tan permeable como para que el efluente contamine los cuerpos de agua subterránea. La interpretación, para ambos usos, se realiza siguiendo el orden de interpretación antes establecido.

14.7 INTERPRETACION DE LA INFORMACION MEDIOAMBIENTAL

Como se observa en la Tabla 17 (correspondiente a la ficha de descripción) el suelo que se cita como ejemplo, está localizado en la Sierra Chichinautzin, a 2000 metros de altitud, situado en una planicie que no se inunda ni se encharca debido, en gran parte, a que presenta un drenaje eficiente en los primeros 150 cm de profundidad. El clima ambiental es templado-subhúmedo con una precipitación de 850 mm y una temperatura de 22°C que, en conjunto, da un Indice de Weinert (Parte II, Capítulo 4, Subcapìtulo 4.2.2) con un valor de-(N<5). El edafoclima, calculado, según el método de Thornwhaite, 1948, (Subcapítulo 4.4.1.) indica que el régimen de humedad del suelo es transicional de ústico a údico. Debido al uso agrícola al que está sometido este suelo, la erosión eólica se presenta con una magnitud moderada después de la cosecha, cuando el suelo carece de cobertura vegetal. Desde el punto de vista taxonómico, el suelo se clasifica como un Luvisol Crómico (ver subcapítulo 3.4.1) y se estima que este suelo se formó a partir de una roca basáltica (capítulo 5). Toda esta información permite interpretar y, en algunos casos, pronosticar los siguientes hechos:

A. La geoforma y pendiente donde se localiza el suelo sugiere, claramente, que se trata de un suelo residual que, posiblemente, se formó a partir de una roca basáltica (Capítulo 6).

B. Las condiciones de altitud, precipitación, temperatura e Indice de Weinert que caracterizan esa área indican que el suelo se está intemperizando bajo condiciones de clima templado, por lo cual es posible inferir que:

- El perfil de intemperismo que presente no corresponda con los esquemas típicos de los suelos tropicales (Subcapítulo 4.1.2), es decir, existe la posibilidad de que no se ajuste al concepto de suelo-Geotécnico (Capítulo II).
- Las condiciones medioambientales y la naturaleza básica del basalto, (Tabla 17) condicionen la formación de arcillas *in situ,* su translocación (Capítulo I) y acumulación dentro del perfil. Es muy probable que también se formen, en estas condiciones, algunos óxidos e hidróxidos de hierro, los cuales pueden estar actuando como agregantes de las partículas del suelo.
- Las condiciones ambientales, la roca parental y el régimen del suelo de tipo ústico-údico, permitan establecer a priori, según lo discutido en los Capítulos 4, 4.4 y 10, que las arcillas formadas deben ser una mezcla en la que predominen las arcillas haloisíticas, y se presenten cantidades significativas de arcillas montmorilloníticas.(*1)
- El hecho de que no se presente manto freático, ni encharcamiento y/o inundación en este suelo (Tabla 17) indica que, cuando menos dentro de los primeros 100 cm de profundidad, no existen capas compactadas ni cementadas, por lo que debe tener un buen drenaje interno y, consecuentemente, una buena estructura.
- La característica de tener un buen drenaje, anula la posibilidad de acumulación de sales, por lo que no se trata de un suelo corrosivo. Por otra parte, el hecho de que exista erosión eólica, permite inferir que es un suelo de pobre a moderado en sus contenidos de materia orgánica.

- El riesgo inmediato que se debe evitar es el que se incremente la erosión eólica, como resultado del desmonte para el trazo de los caminos, o que se genere una erosión hídrica debido a los drenajes en construcción.

Esta interpretación es necesario realizarla previamente al trabajo de campo. El uso de fotografías aéreas simplifica esta labor ya que los suelos igual que las rocas, geoformas y vegetación muestran "patrones espectrales" característicos, que, una vez conocidos, se repiten y permiten extrapolar la información.

OBSERVACIONES

*1 Desde 1980 el incremento de los problemas ambientales, especialmente de aquellos relacionados a la contaminación con deshechos radioactivos de suelos y mantos freáticos, ha conferido a la mineralogía de arcillas una importancia significativa para los proyectos de Ingeniería geotécnica a nivel mundial.

TABLA 17 FICHA DE DESCRIPCIÓN AMBIENTAL Y DEL SUELO

INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

FECHA: No. Foto aérea F3 - L33

DATOS DE CAMPO

MEDIOAMBIENTE

1. Localización: Eje Neovolcánico: Sierra Chichinautzin: Carretera-Mex-Cuernav.Km. 65
2. Roca o Material parental. Basalto.
3. Tipo climático Cw. Precipitación (mm) 850 Temperatura 22 °C
4. Relieve Montuoso Geoforma: Planicie Pendiente <2 % Drenaje: Eficiente.
5. Manto freático: No se observa Encharcamiento y/o inundación No ocurre.
6. Altitud (m) 2000 Uso del Suelo: Agricultura de temporal.
7. Erosión: Tipo: Eólica Magnitud: Moderada.
8. Unidad de Suelo Luvisol. No. de Fotografía 3-333.
9. Riesgos: Erosión eólica e hídrica.

MORFOLOGIA DEL PERFIL No. KJ-33.

1	Horizonte o Capa	A	AB	B_1	B_{2t}	C	Roca	DIAGRAMA DEL PERFIL	MUESTRAS
2	Profundidad cm	0-27	27-55	55-93	93-150	150-185	185→	10 cm Ap	1
3	Separación	3 3	3 3	3 3	3 3	3 3			
4	Color:-Húmedo	10YR5/5	10YR4/5	7.5YR3/3	7.5YR4/5	7.5YR5/5		----------	
5	Textura	MLr	MLr	Mr	Mr	Mr		A B	2
6	Estructura	1 3 3	4 3 3	4 3 3	3 3 3	4 3 1		55 cm	
7	Consistencia	2 2	2 2	3 2	3 3	2 1		----------	
8	Adhesividad	2	2	3	3	2		B 1	3
9	Plasticidad	2	2	3	3	1			
10	Poros	2 5 3	2 4 2	2 3 2	2 2 3	1 1 1		----------	
11	Películas	2	2	1	1	2		100 cm	4
12	Facetas	2	2	1	1	2			
13	Grava-Piedras					G3 2	G3 2	B_{2t}	
14	Grietas-Fisuras	- -	- -	1-2 55	2-3 43	- -			
15	Concreciones	2 -	- -	- -	- -	2 3			5
16	Color Manchas	- - -	- - -	- - -	- - -	o c r e 2 1		150 cm ----------	6
17	Inclusiones	Plástico	Vidrio					C	
18	Raices	1-2 3	1-2 3	2 1					7
19	Superficie *								
20	Drenaje interno	5	4	3	3	2			

OBSERVACIONES: En este perfil fueron tomadas 7 muestras de suelo para ser analizadas. En el caso del horzonte B_{2t}, se obtuvieron tres muestras de la siguiente forma: la muestra 4 representa al horizonte B_{2t} en la totalidad de su espesor (93-150cm); la muestra 5 representa la profundidad de 130 a 140 cm, y la muestra (6) la profundidad de 140 a 150 cm.

*Microrelieve: montículos pequeños.

14.8 INTERPRETACION Y RELACIONES ENTRE LOS DATOS AMBIENTALES Y EL PERFIL DEL SUELO

La ficha para la descripción de la morfología del perfil (Tabla 17) está diseñada para reunir la siguiente información:

- Profundidad (Anexo 5). El suelo utilizado como ejemplo tiene una profundidad total mayor de 150 cm (0-185 cm). Consecuentemente, este hecho, por sí mismo, incrementa su potencial de uso para las obras de infraestructura planeadas, según lo establece el National Soils Handbook, USDA-SCS- (1983). Los números que a continuación se presentan, corresponden al valor que se le dió a cada una de las características que se relatan, con base en el anexo 5.
- Las características del límite entre estratos, relativas a la irregularidad de su forma (3) y a su contraste gradual (3), la presencia de una estructura que oscila de migajón (1) a bloques angulares (4) y bloques subangulares (3) de tamaño medio y bien desarrollados (3), así como el cambio gradual de color y textura (tabla 17) indican que este suelo presenta en su perfil horizontes y no capas. Por lo que se saca en consecuencia que se trata de un suelo residual, derivado de basalto que es la roca basal presente en este sitio.
- La textura de campo indica que el porcentaje de arcilla se incrementa, gradualmente, en los horizontes a medida que se profundiza, hasta alcanzar su máximo entre los 93 y 150 cm de profundidad para, posteriormente, empezar a decrecer.

Las características, relativas al contenido de arcilla, así como a la presencia de revestimientos arcillosos sobre los agregados del suelo ("películas"), permite confirmar el origen residual del suelo (Anexo 5). En este caso, la textura de campo puede ser confirmada a través del análisis granulométrico realizado en el laboratorio.

- Como se observa en la Tabla 17, la consistencia de los agregados, en seco y en húmedo, sigue un patrón de comportamiento similar al de las arcillas. Es decir, su estabilidad se incrementa con la profundidad, alcanzando su máximo entre los 93 y 150 cm de profundidad (3-3). Esta peculiaridad indica que se trata de un suelo evolucionado, que muestra un horizonte de acumulación de arcillas a los 93 cm y que, por lo tanto, según lo discutido en el Capítulo 2, subcapítulo 2.2, debe considerarse como un horizonte Bt. Por otra parte, la consistencia y estabilidad de los agregados de este suelo, está en función directa con los porcentajes de arcillas presentes ya que, como se mencionó anteriormente, alcanzan su máximo porcentaje entre los 93 y 150 cm. de profundidad.
- El hecho de reconocer la presencia de un horizonte Bt, resulta muy importante para la clasificación del suelo. Como se muestra en la Figura 5E, sobre los "Suelos que muestran una Acumulación Significativa de Arcilla", el suelo estudiado pertenece a esta clase y, según las características medioambientales que se muestran en la Tabla 1, este suelo se puede clasificar dentro de los Luvisoles.

- La Tabla 17 indica que la adhesividad y plasticidad del suelo se incrementan con la profundidad, de modo similar, los contenidos de arcilla, el desarrollo de la estructura y la mayor estabilidad. El hecho de que este suelo sea moderadamente adhesivo (3) y moderadamente plástico (3), así como el que presente fisuras, algunas grietas y facetas de presión-fricción, valida el hecho de la presencia de arcillas del Grupo de las Caolinitas y del Grupo de las Esmectitas, constituyendo una mezcla de tal modo que, si sólo se tratara de arcillas esmectíticas, el agrietamiento sería muy significativo y la adhesividad y plasticidad serían altas (Capítulo 10).
- El color de los horizontes superficiales A y AB es claro, lo cual indica, *a priori*, que se trata de un suelo con cantidades de pobres a moderadas de materia orgánica (<1 a 1.5%); esto permite inferir que el suelo presenta un riesgo bajo a ser colapsable; aunque sí puede tender a compactarse por efecto de carga confinada.
- La porosidad, en este caso representada por la existencia de poros gruesos y medianos, tiende a disminuir con la profundidad (Tabla 17, Anexo 5) y, prácticamente, no existen macroporos en los horizontes B, y menos aún en el horizonte C. En estos horizontes, los poros finos y muy finos son dominantes pero, a medida que se llega al límite entre los horizontes B y C, los microporos se incrementan en número (Anexo 5). Esta distribución de los poros indica que la permeabilidad, aereación y drenaje interno del suelo, son rápidos y eficientes en los primeros 55 cm de profundidad para, posteriormente, tender a ser más lentos y menos eficientes, alcanzando su mínima velocidad y eficiencia en, o próximo a los límites entre los horizontes B y C. (drenaje interno).
- La presencia de concreciones, generalmente de manganeso de tamaño fino (2) y en cantidad frecuente (3), así como el moteado de color ocre, en cantidad frecuente (2) y de tamaño pequeño que caracterizan al horizonte C, indican condiciones de mal drenaje estacionales, sobresaturación de humedad y anaerobiósis. Estos hechos están íntimamente relacionados con la abundancia de microporos y con fenómenos de oxidación-reducción, similares a los que fueron tratados en el subcapítulo 10.2 de esta Guía.
- Dentro del horizonte A, fueron localizadas algunas inclusiones de origen antrópico, como son: restos de plástico, objetos pequeños de metal y fragmentos de vidrio. La presencia de estas inclusiones indica una presión demográfica alta sobre los suelos de esa área. También es una prueba de que existe un riesgo, mediato, a la degradación de esos suelos. Ambas características tienden a demeritar, desde un punto de vista económico, al suelo. La consideración de este hecho es muy importante cuando existe la necesidad de cubrir indemnizaciones.

  Al observar el perfil de suelo se ve que las raíces finas y medias son predominantes en el horizonte A y AB y que, bruscamente, se presentan en cantidad escasa en los horizontes B. Esta distribución puede indicar: (1) pobreza de nutrimentos, en el horizonte B; (2) propiedades físicas inadecuadas para el crecimiento radical y (3) presencia de algún elemento antagónico para el desarrollo de las raíces. Esta observación puede ser importante para fines prácticos pero, en la mayoría de los casos, se requieren de numerosos análisis de laboratorio para obtener una informacion concluyente. Con respecto a la presencia de gravas y/o piedras, las primeras sólo fueron observadas en el horizonte C, particularmente en la proximidad del contacto con el horizonte R (Subcapítulo 2.2). Estas gravas se

caracterizan por su forma angular y su alto intemperismo, presentándose en cantidad escasa (<10% por vol.). Son importantes porque: su naturaleza basáltica, forma (angulares) y posición (límite entre horizontes C y R) denotan, con alta probabilidad, que el suelo que las sobreyace se ha formado *in situ*, a través de su intemperismo. También resulta importante observar, como se discute en los capítulos 11 y 12, que el concepto clásico de "Perfil de Intemperismo" y "Zonas de Alteración" no se cumple según lo establecido a través del estudio Geotécnico.

- La presencia de pequeños montículos de suelo acumulado alrededor de los tallos de algunas plantas, así como de pequeños depósitos de limo en las superficies de las escasas rocas que afloran, resulta ser un criterio visual que indica la presencia de erosión eólica. En pocos casos, la superficie del suelo muestra algunos canalillos ("rígolas") que deben considerarse como un precursor de la erosión hídrica.

  Finalmente la Tabla 17 muestra que el drenaje varía, gradualmente, con la profundidad, de muy drenado (horizontes Ap y AB) a drenado (horizonte B_1 y B_{2t}) y a imperfectamente drenado (horizonte C). Como se ha discutido anteriormente, la porosidad, la diversidad en permeabilidad, el tipo textural, presencia de moteado y concreciones, entre otras evidencias, permiten establecer estas categorías de drenaje.

14.9 INTERPRETACION DE LOS DATOS DE LABORATORIO.

En la Tabla 18 se muestran algunos datos sobre las propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas que caracterizan al suelo utilizado como ejemplo en este Capítulo.

TABLA 18 ANALISIS FISICOS Y QUIMICOS DEL SUELO EJEMPLO

Prof.	Horizonte	Color		Textura %			Clasificación
(cm)		seco	húmedo	Arena	Limo	Arcilla	Textural
0-27	A	10YR6/6	10YR5/5	30	40	30	Mr
27-55	AB	10YR6/6	10YR4/5	25	35	40	R
55-93	B1t	7.5YR3/4	7.5YR3/3	20	30	50	R
93-150	B2t	7.5YR5/5	7.5YR4/5	18	25	57	R
150-185	C	7.5YR6/7	7.5YR5/5	20	35	45	R
185	Roca						

Prof.	Permeabilidad	Cole	pH	M.O	CICT	Bases			
(cm)	cm/h	*2	1:25	%	meq/100	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^{+}	K^{+}
0-27	3.0	.01	6.7	1.2	25.0	12.7	9.0	0.5	0.2
27-55	2.7	.02	6.8	1.0	24.7	12.1	8.1	0.6	0.3
55-93	1.5	.03	6.9	0.8	23.2	11.3	7.3	0.6	0.3
93-150	1.2	04	6.9	0.5	23.9	11.5	7.5	0.8	0.4
150-185	0.3	.02	6.8	0.3	18.3	9.3	5.1	0.5	0.2
185									

A través de la observación de los datos contenidos en esta tabla, es posible hacer las siguientes interpretaciones:

- Un horizonte A que muestre valores de color en seco, con un "brillo" (numerador) y una "intensidad" (denominador) iguales o menores a 5/5 y en húmedo, iguales o menores a 3/3, debe ser considerado, casi siempre, como un horizonte altamente orgánico o humificado. En este caso, los valores en seco (10YR6/6) y en húmedo (10YR5/5) rebasan este límite. Consecuentemente, no es un horizonte altamente orgánico, lo que implica que su comportamiento mecánico, prácticamente no se ve influido por este factor.

Se observa además que: (1) los colores de los horizontes en seco y en húmedo, cambian gradualmente con la profundidad; (2) los porcentajes de arcilla tienden a incrementarse regularmente, alcanzando su máximo entre los 93 a 150 cm de profundidad para posteriormente, tender a disminuir. Lo mismo ocurre con las bases, particularmente con el sodio, el potasio y con el pH. Los valores de COLE muestran un comportamiento similar. En contraste, la permeabilidad, porcentaje de materia orgánica y capacidad de Intercambio Catiónico Total, decrecen regularmente con la profundidad. Todo este comportamiento físico y químico del suelo, si fuera graficado, indicaría la presencia de una dinámica edáfica regular y ordenada. Así por ejemplo:

1. Los cambios de color de pardo (10YR) a pardo amarillento o rojizo (7.5YR) se deben, principalmente, al intemperismo de minerales primarios, particularmente ferromagnesianos (Capítulos 4, 5, 10, 10.2 y 11.4) cuyos productos de alteración solubles son eluviados (translocados) de los horizontes A, para ser iluviados (acumulados) en el horizonte B_{1t} y B_{2t}
2. Las arcillas también muestran, junto con el sodio y el potasio, una eluviación en los horizontes A y AB, y una iluviación en los horizontes B_{1t} y B_{2t}. El incremento que se observa en los valores de COLE*[2], así como el decremento en la permeabilidad, están en función directa e inversa, respectivamente, con los porcentajes y tipos de arcillas presentes.
3. Es importante recordar que estos fenómenos de comportamiento regular, sólo ocurren en los suelos residuales (Capítulo 10) lo que junto con los datos obtenidos en campo, relativos al límite entre horizontes, presencia de estructura y cambio gradual en color, confirman el origen *in situ* de este suelo. Además, la distribución ordenada de la materia orgánica, la cual tiende a disminuir con la profundidad, no deja dudas sobre su origen y evolución (Capítulo 12).

OBSERVACIONES

1. Los símbolos (letras) utilizados para determinar la clasificación textural *[1] están definidos en el Anexo 5 "Clave para la Descripción del Perfil", en el inciso 5, "Textura".
2. El término COLE*[2] significa "Coeficiente de Extensión Linear", y se refiere al hecho de la capacidad que tiene un suelo para expanderse o contraerse en presencia o ausencia de humedad. Para su determinación se utiliza la siguiente fórmula:

$$COLE = (Dbd/Dbm)^{-3}-1.$$

donde Dbd es la densidad aparente del suelo secado al aire y Dbm es la densidad aparente del suelo húmedo a 33kPa (1/3 bar).

3. Para el COLE, se consideran los siguientes valores: (1) no crítico = 0-0.3; (2) marginal = 0.03-0.06; (3) crítico = 0.06-0.10 y (4) muy crítico = > 1

4. Se puede estimar el COLE por la contracción de una muestra de suelo que ha sido empaquetada en un molde, a capacidad de campo, y posteriormente secada.

5. Se denomina Extensibilidad Lineal Potencial (ELP) a la suma de los productos de cada horizonte de su espesor en centímetros y del COLE de cada horizonte.

Retomando la interpretación de los datos obtenidos en laboratorio (Tabla 18) también es posible observar e interpretar lo siguiente:

- La presencia de grietas, fisuras y facetas de presión, descritas en la Tabla 17 (ficha de descripción de campo), junto con algunos valores marginales obtenidos para el COLE, así como la presencia de valores de moderados a altos de capacidad de intercambio catiónico total, indican que el suelo estudiado esta constituído, como se mencionó antes, por una mezcla de arcillas haloisíticas y montmorilloníticas. Lo que significa que no se trata de un suelo constituído únicamente por arcillas montmorilloníticas; como es el caso de un Vertisol (subcapítulo 3.4). Si fueran predominantes las haloisitas, prácticamente no existirían grietas y/o fisuras y/o facetas; y los valores de COLE y de C.I.C.T. serían más bajos (Capítulo 10). Por el contrario, si dominaran las montmorillonitas, los fenómenos de agrietamiento, fisuras y presencia de facetas de presión-fricción, serían evidentes en todos los horizontes, particularmente cuando existiera deficiencia de humedad (Capítulo 10).

Los porcentajes y tipos de arcilla presentes en el suelo y que, en este caso, se consideran como "Arcillas mixtas" es decir, arcillas haloisíticas mezcladas con cantidades considerables de arcillas montmorilloníticas dan, a priori, un conocimiento muy aproximado de algunas características mecánicas como son el límite líquido y el índice de plasticidad. En la Tabla 19 se presentan diferentes estimaciones de los valores de Límite líquido e Indice de plasticidad con base al tipo y contenido porcentual de arcillas.

TABLA 19 ESTIMACION DEL LIMITE LIQUIDOS E INDICE DE PLASTICIDAD DE ACUERDO AL TIPO Y CONTENIDO DE ARCILLA

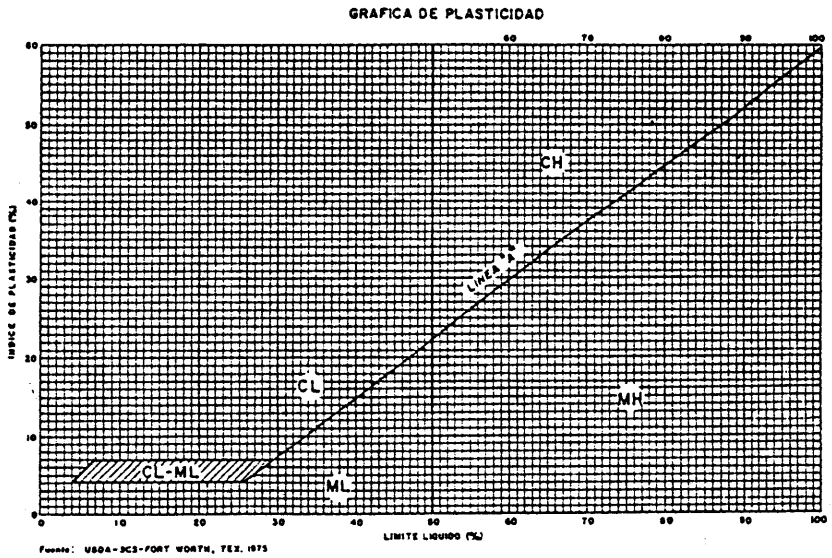
Porciento arcilla	Arcillas tipo Montmorillonítico		Arcillas mixtas 2/1 con cantidades considerables del tipo 2:1		Arcillas mixtas 3/ con cantidades considerables del tipo 1:1	
	LL	IP	LL	IP	LL	IP
10	26	9	21	4	16	3
12	28	11	23	6	18	4
14	30	12	25	7	20	5
16	32	14	26	8	21	6
18	34	15	28	9	23	7
20	36	17	30	11	25	8
22	38	19	32	13	27	9
24	40	20	34	14	29	10
26	42	22	35	15	30	11
28	44	23	37	16	32	12
30	46	25	39	18	34	13
32	48	27	41	20	36	14
34	50	28	43	21	38	15
36	52	30	44	22	39	16
38	54	31	46	23	41	17
40	56	33	48	25	43	18
42	58	35	50	27	45	19
44	60	36	52	28	47	20
46	62	38	53	29	48	21
48	64	39	55	30	50	22
50	66	41	>57	>32	52	23
52	68	43	59	34	54	24
54	70	44	61	35	56	25
56	72	46	62	36	57	26
58	74	47	64	37	59	27
60	76	49	66	39	61	28

1/ Basado en las relaciones: LL = 16 + (% de arcilla) e IP = LL-15 + 0.2 (% de arcilla).
2/ Basado en las relaciones: LL = 12 + 0.9 (% de arcilla) e IP = LL-15 +0.2 (% de arcilla).
3/ Basado en las relaciones: LL = 7 + 0.9 (% de arcilla) e IP = LL-9 + 0.4 (% de arcilla).

NOTA. NO SE DEBE UTILIZAR ESTE CUADRO PARA ARCILLAS CAOLINITICAS
Fuente: USDA-SCS, Fort Worth. tx. Oct. 1982.

En la Tabla 19 se observa, también, que basta con conocer ambas características: tipo y porcentaje para obtener valores aproximados de LL e IP. Como ya se mencionó, el suelo que se ha puesto como ejemplo esta constituído por "Arcillas mixtas" con porcentajes de 50 en el horizonte B_{1t} y de 57 en el horizonte B_{2t} (Tabla 18). Con base en la Tabla 19 a un porcentaje de arcilla de 50 (Arcillas mixtas) le corresponde un valor de límite líquido (LL) de 57 y un valor de plasticidad (IP) de 32. En el caso del horizonte B_{2t}, los valores de LL son, aproximadamente, de 63 y los de IP de 37. Ambos valores, según el sistema unificado de clasificación de suelos, al ser representados en la Gráfica de Plasticidad (Figura 26) darían, una lectura, arriba de la línea A, como CH, es decir, como "arcillas. inorgánicas de alta plasticidad"

FIGURA. 26 **GRAFICA DE PLASTICIDAD**



- Otro ejemplo que ilustra como los datos edafológicos pueden ser facilmente trasformados para su uso práctico en Ingieneria Civil, es el relativo a la textura del suelo. De este modo, que la clasificación textural, que se muestra en la Tabla 20, también puede ser útil para estimar, de modo aproximado, el porcentaje de suelo que pasa por los tamices número 4 (4.76 mm), 10 (2.0 mm) 40 (0.42 mm) y 200 (0.74 mm).

Por ejemplo, el suelo estudiado presenta una clasificación textural que, según el triángulo de texturas es, en el horizonte A, migajón arcilloso (Mr) en el horizonte B_{2t}, Arcilla (R) y en el horizonte C también Arcilla (R). Esta clasificación, como se observa en la tabla 20, indica que el 100% de suelo que constituye el horizonte A, pasaría por los tamices No. 4 y No. 10; del 90 al 100% de suelo pasaría por el tamiz No. 40, y sólo del 70 al 80% por el tamiz No. 200. En el caso de los horizontes B_{2t} y C, cuya textura es arcilla, el 100% del suelo pasaría por los tamices No. 4 y No. 10, del 90 al 100% por el tamiz 40 y del 75 al 95% por el tamiz No. 200.

OBSERVACIONES.

- Es necesario recordar que un suelo está constituído por partículas individuales y por grupos de partículas (agregados) y que los valores de las propiedades como son: esfuerzo, permeabilidad y compresibilidad, están determinadas por el tamaño, forma, arreglo y grado de unión entre ellas.

TABLA 20 PORCENTAJE DE MATERIAL QUE PASA POR LOS TAMICES

Textura	Porcentaje que pasa por los tamices			
	No. 4 (4.76 mm)	No. 10 (2.0 mm)	No. 40 (0.42 mm)	No. 200 (0.074 mm)
Arcilla	100	100	90-100	75-95
Arcilla limosa	100	100	95-100	90-95
Migajón arcillo limoso	100	100	96-100	85-95
Migajón arcilloso	100	100	90-100	70-80
Migajón	100	100	95-85	60-75
Migajón limoso	100	100	90-100	70-90
Limo	100	100	100	90-100
Arcilla arenosa	100	100	85-95	45-60
Migajón arcillo arenoso	100	100	80-90	35-55
Migajón arenoso mediano	100	100	60-70	30.40
Migajón arenoso fino	100	100	85-95	40-55
Migajón arenoso muy fino	100	100	90-100	50.65
Arena migajosa muy fina	100	100	90-95	40-60
Arena migajosa fina	100	100	80-90	25-40
Arena migajosa mediana	100	100	50-75	15-30
Arena muy fina	100	100	75-90	35-55
Arena fina	100	100	80-90	20.35
Arena mediana	100	100	50-70	5-15

NOTA. Esta información representa el porcentaje de material , sin fragmentos de roca que pasa por cada tamiz.

Fuente: Guide for interpreting engineering uses of soils.
USDA-SCS, 1971.

En la mayoría de las cartas edafológicas editadas tanto por INEGI, como por otras dependencias y centros de investigación, normalmente, se presentan los datos relativos a la textura y clasificación textural. El acceso a esta información permite tener una idea aproximada de algunas características relativas a la granulometría de los suelos de una región del país.

15 APLICACION PRACTICA DE LA INFORMACION INTERPRETADA

Siguiendo con el ejemplo del suelo antes discutido y, considerando que los objetivos hipotéticos del estudio son: (1) la construcción de caminos y calles y (2) la construcción de un campo de absorción para pozos sépticos, en ese suelo es necesario tener presentes los siguientes aspectos:

- 1. Nivel de limitación o de viabilidad del proyecto
- 2. Determinación de las características mecánicas, físicas y químicas importantes del suelo, congruentes con los objetivos planteados.

15.1 NIVEL DE LIMITACION

Dependiendo de las características del suelo, éstas pueden ser limitantes en tres niveles: (1) ligeras; (2) moderadas y (3) severas. De acuerdo con el National Soils Handbook, USDA-SCS, 1983, las principales características del suelo que deben tomarse en cuenta para establecer estos niveles son:

1. Profundidad del suelo de la superficie al lecho rocoso; (2) profundidad del suelo de la superficie al horizonte que muestre compactación o cementación; (3) potencial de contracción y dilatación (COLE*); (4) profundidad del suelo de la superficie al nivel freático; (5) drenaje y textura; (6) pH y conductividad del extracto de saturación; (7) contenido de sulfato de sodio y/o de magnesio; (8) permeabilidad; (9) encharcamiento y/o inundación; (10) porcentaje de fragmentos en el suelo, mayores de 7.5 cm; (11) porcentaje de sodio (RAS); (12) espesor de los horizontes; (13) porcentaje de carbonatos; (14) densidad aparente; (15) presencia o ausencia de azufre; (16) agua aprovechable (mm/cm); (17) contenido en yeso; (18) pendiente; (19) disponibilidad de áreas de descarga; (20) erosionabilidad; (21) régimen de humedad de suelo y (22) geoforma.

Estas 22 características no se utilizan, en conjunto, para establecer el nivel de limitación de un suelo ya que basta, según el caso, con determinar algunas de ellas para lograr este fin. En párrafos posteriores se dan ejemplos al respecto. Es muy importante recordar que estas características del suelo deben ir, necesariamente, acompañadas de algunos análisis de mecánica de suelos como son:

1. Riesgo de asentamientos; (2) Clasificación Unificada de las Capas; (3) riesgo de movimiento en masa y (4) índice de grupo AASHTO.

Tanto las características del suelo (22) como el análisis de mecánica de suelos (4), permiten establecer el nivel de limitación, para los siguientes proyectos.

1. Determinación de la corrosividad del suelo, en materiales de acero sin revestimientos; (2) determinación de la corrosividad del suelo en concreto; (3) posibilidades de uso del suelo como campos de absorción para pozos sépticos; (4) posibilidades de uso del suelo para lagunas de oxidación de aguas negras; (5) posibilidades de uso del suelo para basureros de trinchera; (6) posibilidades de uso del suelo para basureros municipales de área; (7) posibilidades de uso del suelo como bancos de material de cobertura para basureros municipales de área; (8) posibilidades de uso del suelo para la construcción de casas de uno o dos pisos; (9) posibilidades de uso del suelo para la construcción de caminos y calles; (10) posibilidades de uso del suelo como jardines; (11) posibilidades de uso del suelo como banco de relleno para carreteras; (12) posibilidades de uso del suelo como bancos de arena o de grava; (13) posibilidades de uso del suelo para construir represas; (14) posibilidades de uso del suelo como bancos de material para bordos y diques; (15) posibilidades del suelo para introducir drenaje o riego y (16) posibilidades del suelo para construir terrazas. Estos datos también son útiles para establecer el nivel de limitación, en una gran cantidad de proyectos agrológicos.

Si se evalúan los análisis que se requieren para determinar con exactitud los niveles de limitación relativos a una gama de proyectos como los antes mencionados, se encontrará la justificación para la realización de dichos análisis.

15.2 DETERMINACION DE LAS CARACTERISTICAS PARA ESTABLECER EL NIVEL DE LIMITACION DE UN PROYECTO.

Continuando con el ejemplo del suelo antes descrito (Tablas 17 y 18) y considerando que los objetivos, antes mencionados, siguen siendo la construcción de caminos y calles, así como la construcción de un campo de absorción para pozos sépticos, el primer paso a realizar sería el de consultar el National Soils Handbook, USDA-SCS, (1983) el cual puede ser adquirido, en español, en la Comisión Nacional del Agua como "Manual de Clasificación Cartografía, e Interpretación de Suelos, con Base en el Sistema de Taxonomía de Suelos".

En ese manual se presentan una serie de tablas que integran las características del suelo, así como los analísis mecánicos que deben realizarse en cada caso.

15.2.1 Ejemplo 1: Construcción de Caminos y Calles

La Tabla 21 fué tomada del "Cuadro Guía 7-16", del MANUAL DE CLASIFICACION CARTOGRAFICA DE LA CNA 1989, sobre la interpretación de suelos para caminos y calles"

TABLA 21. GUIA PARA INTERPRETAR SUELOS PARA CAMINOS Y CALLES
CUADRO-GUIA 7-16

CARACTERISTICA DEL SUELO	LIMITACION			FACTOR LIMITANTE
	LIGERA	MODERADA	SEVERA	
1. Profundidad al lecho rocoso (cm)				
Duro	>100	50-100	<50	Profundidad a la roca
Semiduro	>50	<50	-------	
2. Profundidad a un horizonte endurecido (cm)				Capa endurecida
Grueso	>100	50-100	<50	
Delgado	>50	<50	--------	
3. 1/ Potencial de contracción y dilatación.	Bajo	Medio	Alto	Contracción y dilatación
4. 1/2/3/ índice de grupo AASHTO	<5	5-8	>8	Baja capacidad de carga
5. Profundidad al nivel freático (cm)	>75	30.75	<30	Muy húmedo
6. Encharcamiento	------	------	Encharca	Encharcamiento
7. Pendiente (%)	<8	8.15	>15	Pendiente
8. 4/ Fracción > 7.5 cm (% por peso)	<25	25-50	>50	Piedras
9. Movimiento en masa	------	------	Ocurre	Movimiento en masa

1/ De la capa más gruesa entre 25 y 100 cm

2/ Si la familia mineralógica, es caolinítica,se califica el suelo en una clase mejor, por ejemplo, "moderada limitación" en vez de "severa", si la experiencia lo demuestra.

3/ Índice de Grupo AASHTO = (F-35) (0.2+0.005(LL-40) + 0.01 (F-15) (1P-10) donde F =% que pasa por el tamiz #200, LL = límite líquido, e 1P = índice de plasticidad. Si F $\leq$ 35 e IP $\geq$ 11, sólo se utiliza la segunda parte de la ecuación.

Fuente: National Soils Handbook, USDA-SCS, 1983.

En la Tabla 21 se observa que el nivel de limitación para realizar la construcción de caminos y calles, dependen de siete características propias del suelo y de dos características mecánicas del mismo: movimiento en masa e Indice de grupo AASHTO.

Si se toman en cuenta los datos obtenidos para el suelo utilizado como ejemplo (Tablas 17 y 18) se obtendrían los siguientes resultados:

- La profundidad del suelo es de 185 cm, por lo tanto, no se considera ésta una limitante, según la Tabla 21 (Cuadro-Guía).
- El suelo utilizado como ejemplo, no presenta en su perfil ningún horizonte endurecido dentro de los primeros 100 cm de profundidad, consecuentemente, no existe ninguna limitante por este concepto.
- El potencial de contracción y dilatación, inferido por la determinación del valor COLE para cada horizonte, indica que existe una limitación moderada de los horizontes B_{1t} y B_{2t} (Tabla 18) ya que los valores obtenidos (0.03 y 0.04), respectivamente, se consideran como marginales. Esta característica representaría una limitación moderada y, por lo tanto, superable para la construcción de caminos.
- Como el perfil no presenta manto freático, (Tabla 17) consecuentemente, no existe limitante por este concepto.
- En la descripción de campo se menciona que este suelo no se encharca, ni se inunda, (Tabla 17) por lo que no existe limitación para realizar la obra de construcción planeada, según la Tabla 21.
- Con base en la ficha de descripción de datos relativos al medioambiente, el suelo se localiza en una planicie , sobre una pendiente < 2%. Estas características no representan ninguna limitante para el proyecto (Tabla 21).
- Con relación a la fracción >7.5 cm (Gravas), ésta tampoco representa problemas debido a que se presentan a una profundidad mayor de 100 cm y, también, a que está en cantidad escasa (<15%).

Desde el punto de vista edáfico, las características del perfil no representan, en ningún caso, una limitante severa para el Proyecto de construcción. Sin embargo, para dar un dictamen final, aún sería necesario efectuar dos determinaciones mecánicas relacionadas con el Indice de grupo AASHTO (Capacidad de Carga) y con la posibilidad de movimiento en masa.

15.2.2 Ejemplo 2: Campo de Absorción para Pozos Sépticos.

Como se observa en la Tabla 22, existen 10 características, la mayoría con un bajo grado de dificultad analítica para su realización, con las que se determina el nivel de limitación para este proyecto. Tres de estas características se relacionan con los datos ambientales: inundación, encharcamiento y pendiente; dos con aspectos de mecánica de suelos: asentamiento total (cm) y movimiento en masa, y las cinco restantes con propiedades y características del suelo: profundidad al lecho rocoso, profundidad a un horizonte endurecido,

profundidad al nivel freático, permeabilidad determinada a las profundidades de 60-150 y de 60-100 cm; y porcentaje de la fracción >7.5 cm (gravas).

De acuerdo a las características medioambientales, el suelo no presenta limitaciones para este proyecto de construcción (Tabla 17). Sin embargo, con relación a las propiedades del suelo, particularmente a la permeabilidad, ésta representa una limitación severa, cuando al estimarse a la profundidad comprendida entre los 55 y 150 cm es menor que la requerida (Tabla 18). Esto significa que la percolación, estimada de 1.5 a 1.2 cm/hr, es lenta en los horizontes B_{1t} y B_{2t} y por lo tanto, un obstáculo dificilmente superable, lo que implica tener que realizar grandes cambios en el diseño. Debido a la limitación que presenta el suelo (lenta percolación) las determinaciones sobre su asentamiento total y el movimiento en masa, resulta no necesario practicarlas. De hecho, una evaluación sobre impacto ambiental daría un dictamen negativo para este proyecto, basado en la lenta percolación que muestra el suelo en el horizonte B. Como se mencionó en párrafos anteriores, el suelo debe ser, de los 60 a los 150 cm de profundidad, lo suficientemente permeable (5 a 15 cm/hr) para que el efluente pueda percolar, sin llegar a ser excesivamente permeable (>15cm/hr) como para que el efluente llegue a los cuerpos de agua subterránea.

TABLA 22 GUIA PARA INTERPRETAR SUELOS PARA CAMPOS DE ABSORCION PARA POZOS SEPTICOS

CARACTERISTICA DEL SUELO	LIMITACION			FACTOR
	LIGERA	MODERADA	SEVERA	LIMITANTE
Asentamiento total (cm)	-----	-------	>60	Asentamiento
Inundación	No inunda	Rara	Común	Inundación
Profundidad al Lecho rocoso (cm)	>180	100-180	<100	Profundidad a la roca
Profundidad a un horizonte endurecido	>180	100-180	<100	Capa endurecida
Profundidad al nivel freático (cm)	>180	120-180	<120	Exceso de agua
Encharcamiento	-------	--------- Encharca		Encharcamiento
Permeabilidad (cm/hr)				
60-150 cm	5.0-15	1/1.5-5.0	<1.5	Lenta percolación
60-100 cm	-------	----------	<15	Filtración
Pendiente (%)	<8	8-15	>15	Pendiente
2/ Fracción >7.5 cm (% por peso)	<25	25-50	>50	Piedras
Movimiento en masa	-------	--------	Ocurre	Movimiento en masa

1/ Verificar si debe ser una ligera limitación.

2/ Promedio ponderado hasta los 100 cm de profundidad.

Fuente: National Soils Handbook, USDA-SCS, 1983

En general, existen muchos ejemplos que prueban cómo algunas características del suelo, determinables con un bajo grado de dificultad tanto en campo como en laboratorio, resultan elementos útiles que pueden simplificar y disminuir el tiempo y costo de la investigación para la realización de obras en las disciplinas de Ingeniería sanitaria, civil y agronómica.

En términos generales, es posible tener acceso a la información relativa al medioambiente y a las caracrterísitcas del perfil del suelo. Como se mencionó anteriormente, una gran parte de esta información está impresa en las cartas de INEGI, o está disponible en otras dependencias como son las de Ciencias de la Tierra en la UNAM, CNA, y SARH, entre otras.

Por otra parte, se puede generar directamente la información de suelos mediante la metodología establecida en esta Guía, aunque resultaría conveniente que el trabajo de campo, inicialmente, estuviera asesorado por un Edafólogo. En términos generales, cuatro o cinco salidas a campo, acompañados de un especialista en suelo, son suficientes para obtener un nivel de experiencia suficiente para llenar correctamente la ficha de descripción de datos ambientales y morfológicos de perfil. Finalmente, desde un punto de vista práctico, es recomendable planear las obras para ser realizadas en aquellos suelos que muestran limitaciones severas para la agricultura, y que su uso sea limitado o muy limitado para pastos, árboles o la vida silvestre. Estos suelos corresponden con las clases VI, VII y VIII, de la carta de Uso Potencial editada por INEGI.

BIBLIOGRAFIA

Alexander, L.T., y J. G. Cady, 1962. Genesis and hardening of laterite in soils. U.S. Dept. Agr. Tech. Bull., 1-282

Alexander M., 1977. Introdution to Soil Microbiology, John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. 467 p.

Besoain, E., 1985. Mineralogía de Arcillas de Suelos. San José, Costa Rica; Inst. Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA/Serie de libros y materiales educativos; No.60, 1216 p.

Bilzi, A.F., y Ciolkosz, E.J., 1977. A field morphology rating scale for evaluating pedological development. Soil Science, v. 124, pp 45-49.

Birkeland, P.W. 1984. Soil and geomorphology. Oxford Univ. Press, New York.

Birkeland, P. W., Machette and K.M. Haller. 1991. Soils as a tool for applied Quaternary Geology. Utah Geological and Mineral Survey, 63 pp.

Blight, G.E., 1990. Keynote paper. Construction in tropical soils. In Geomechanics in tropical soil; Editors, publications Committed of 2 ICOTS; pp 449-492.

Bohn, L.H., B.L. McNeal y G.A. O'Connor, 1993. Química del Suelo. México, D.F., Ed. Noriega-Limusa, 371 p.

Brewer, R., 1964. Fabric and mineral analysis of soils. John and Wiley, Sons, N.Y.

Bryson, R.A.., y W.M. Wendland., 1967. Radiocarbon isochromes of the retreat of the Laurentide ice sheet. Tech. Rept. 35. Dept. Meteorol. Univ. Wis., Madison.

Buckman, H.O. y Brady, N.C., 1985. Naturaleza y propiedades de los suelos. Copyright by the MacMillan Company, Nueva York, U.S.A., Editorial UTEHA, México D.F., 590 p.

Buol, S.W., 1965. Present soil-forming factors and processes in arid and semiarid regions. Soil Sci. 99: 45-49 p.

Buol, S.W. F. D. Hole y R. J. McCracken. 1990, Génesis, clasificación y distribución de los suelos. México, Edit. Trillas; 417 p.

Bushnell, T.M., 1942. Some aspects of the soil catena concept. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 7; pp 466-476.

Caillére y Henin., 1968. Sci. du sol; in Duchaufour, Ph.,1984, Edafología, España, Ed. Masson, S.A.

Chandler, R.F., Jr., 1937. A study of certain calcium relationships and base exchange properties of forest soil. J. Forestry 35: 27-32 p.

Clarke, F.W., 1924. Data of geochemistry, 5th de. U.S. Geol. Survey Bull. 770 Dept. Interior, U.S. Gout. Printing Office, Washinton.

Crocker, R. L., y J. Major, 1955. Soil development in relation to vegetation and surface age at Glacier Bay, Alaska, J. Ecol. 43: 427-428 p.

Davis, W:M:, 1902. Base level, grade and peneplain. J. Geol. 10., pp. 77-111-

Dalrymple, J. 1968. Modelo esquemático de superficie terrestre, de nueve unidades: In: Fitzpatrick, Suelos, su formación, clasificación y distribución; México; Edit. CECSA; p.70

Dickson, B.A., y R.L. Crocker, 1954. A chronosequence of soil and vegetation near Mt. Shasta, California. III. Some properties of the mineral soils. J. Soil. Sci. 5, 173- 191 p.

Dokuchaev, V.V., 1883. Russian Chernozem (Russkii Chernozem). (Traducido del ruso por N. Kaner) Israel Prog. For Sci. Trans., Jerusalem, 1967. Disponible en ruso e inglés, U.S. Depto. Commerce, Springfield, Va.

Duchaufour, Ph., 1984. Edafología 1. Edafogénesis y clasificación. Masson, S.A. Barcelona. 493 p.

Duchaufour, Ph., 1977. Atlas ecológico de los suelos del mundo. Barcelona; Masson, S.A., 178 p.

Duchaufour, p., 1987. Pédologie: Paris; Ed. Masson; 224 p.

Fanning, D.S., and M.C.B. Fanning., 1989. Soil. Morphology, genesis and classification. John Wiley and Sons, New York; 395 p.

FAO-Unesco, 1970. Definitions of soil units for the soil map of the world. Roma, Food and Agricultural Organization, World Soil Resources Office, report 33, 16 p.

FAO, 1981. Report on the Agroecological Zones Projet, vol. 3. Methodology in South and Central America. World Soil Resources, Report 48/3, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma., 150 p.

FAO-Unesco, 1988-1990. Soil map of the world, revised legend. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. WSR, Report 60, escala 1: 5 000 000, mapa y texto, 119 p.

Fassbander, W.H., E. Bornemisza., 1985. Química de Suelos. San José, Costa Rica. De. 11CA; 5° Reimpresion., 420 p.

Fitzpatrick, E.A., 1987, Suelos. Su formación, clasificación y distribución. México, Edit. CECSA., 398 p.

Foucault, A., J.F. Raoult., 1995. Dictionnaire de géologie: Paris; Ed. Masson; 324 p.

Gama-Castro, J.E., 1996. Los Suelos Tropicales de México. I., Génesis, Dinámica y Degradación: México; UNAM; Facultad de Ciencias. Tésis Doctoral, 420 p.

García, E., 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana) UNAM., Instituto de Geografía, 246 p.

Gaucher, G., 1971. Tratado de Pedología Agrícola. El suelo y sus características agronómicas. Barcelona, Ed. Omega, 647 p.

Geothechnical Control Office, 1988, Guide to rock and soil descriptions (Geoguide 3) G.C.O., Hong.Kong, 295 p.

Geyh M.A. y Schleidoer,H. 1991. Absolute age determination. Springer Verlag.

Goldich, S.S., 1938. A study in rock-weathering. J. Geol. 46: 17-58.

Harden,J.W. 1982. A quantitative index of soil development from freld descriptions; examples from chronosequence in Central California Geoderma 28: 1-28 p.

Heitier, J.M., 1975. Formation et èvolution des Andosols en climat tempèrè, Tesis. Doc., Univ. Nancy . 258 pp.

Hilgard, E.W., 1892. A report on the relations of soil to climate. U.S. Dept. Agr. Weather Bull, 3: pp-1-59.

Hissink, D.J., 1938. The reclamation of the Dutch saline soils (Solonchak) and their further weathering.

Hütt, G., H. Junger, R. Kuhansuu and M. Saarnisto, 1993. Osl and Tl dating of buried paleosols and overlying sands in Ostrobothnia, Western Finald. J. Quaternary Sci. 8: 125-132 pp.

Ishizawa, S., and Toyoda, H., 1964. Microflora of Japoneses soils 3. Comparasion between volcageneous and non volcageneous soils. Soil Sci & Plant Nutr. 10 (4): 1-8

Jackson, M.L. y G.D. Sherman, 1953. Chemical weathering of minerals in soils. Adv. Agron. 5: 219-318 pp.

Jackson,M.L., T.W. Levelt y G. Uehara, 1971. Geomorphological relationships of Tropospherically derived quartz in the soil. Soil. Sci. Soc. Amer. 35: 515-525.

Jenny, H, 1941. Factors of soil formation. Nueva York, McGrawhill, 281 p.

Jenny, H., 1980. The Soil Resource. Origen and Behavior. New York; Springer-Verlag., 350 p.

Juárez Badillo, E., Rico, A.R., 1963. Mecánica de suelos; (tomo 1). México, D.F., Ed. Rabasa, S.A., 275 p.

Kaurichev, I.S,N.P. Panov, M.V. Stratonovich, I.P. Grechin, V.I. Savich, N.F. Ganzhara y A.P. Mershing, 1984. Prácticas de Edafología. Moscú., Edit. Mir.

Killham K., 1994. Soil Ecology. Cambridge University Press, Great Britain. 242 p.

Köppen, W., 1948. Climatología. México, D.F., Fondo de Cultura Económica, 125 p.

Krauskopf, K.B., 1979. Introduction to Geochemistry. Tokio, McGraw-Hill, Kogakusha; 617 pp.

Ku, T., W.B. Bull, S.T. Freeman and K.G. Knauss, 1979. Th 230-234 U dating of pedogenic carbonates in gravelly deser of Vidal Valley, Southeastern California. Bull Geol. Soc. Amer. 90: 1063-1073 pp.

Lal R., 1987. Tropical Ecology and Physical Edaphology; John Wiley & Sons., Chichester Great Britain, 732 p.

Lohm, U., 1989. Increased weathering rate in experimental field acidification ishort communication. *In*: A. Barto-Kyriakidis (De.) Y. Processes. Teophratus Publishing & Proprietary Co. S.A. Greece, Athens.

Lugo Hubp, J. y Aceves-Quesada, 1984. Amplitud del relieve: Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. de Geografía. Atlas Nacional de México, hoja Morfometría 2, num. IV. 3.2. escala 1: 8 000 000.

Lugo Hubp, J., 1989,.Diccionario Geomorfológico. México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. Edit. AGT., 80 p.

Machette, M.N., 1985. Calcic soils of the southwestern United States, p.-1-21; Ln D.L. Weide (ed.) Soils and Quaternary geology of the southwestern United States. Spec. Publ 203., Geol. Soc-Am., Boilder, CO.

Munsell, A.H., 1988. Munsel- A color notation, 15th de. Macbeth, Drv. of Kollmorgen, Baltimore.

Palacios Mayorga S. y Gama - Castro J., 1994. Suelos: génesis, dinámica y degradación. *In*: De la Cruz - Reyna S. Ciencias de la Tierra Hoy. Ediciones Científicas Universitarias. Las ciencias en el siglo XX. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica, México, 205 p.

Palacios-Mayorga S., Sánchez Marroquín A. y Aguilera-Herrera N., 1973. "Contribución al Conocimiento Microbiológico de Suelos de Ando del Popocatépetl, Edo. de Morelos. Memoria del III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. pp 10-20

Palmer G.R. y R.F. Troeh, 1989. Introducción a la ciencia del suelo. Manual de Laboratorio: México, Edit. AGT., 80 p.

Papadakis, J., 1980. El suelo, con referencia especial a los suelos de America Latina, Península Iberica y Ex-Colonias Ibéricas: Buenos Aires; Edit. Albatros: 347 p.

Pedro, G., 1964. Contribution à L´ étude experimentale de L´alteration geochimique des roche cristallines., Tesis Doc. Univ. París., 334 p.

Polynov, B.B., 1937. The cycle of weathering. (Traducido por A. Muir) Murby and Co., Londres.

Proudfoot, V.B., 1958. Problems of soil history. Podzol development at Goodland and Torr Townlands, Country Antrim, Northen Ireland. J. Soil. Sci. 9: 186-198 p.

Rico, R.A., y del Castillo, H., 1996. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres: Vol. 1. México, D.F., Edit. Limusa; 459 p.

Robert, M. 1970. Estude expérimentale de la désagrégation du granite et de évolution des micas. Tesis Dos. Univ. Paris, 195 pp.

Ruhe, R.V., 1960. Elements of the soil landscape. Trans. 7th Intern. Congr. Soil Sci. (Madison, Wis.) 4: 165-169 p.

Ruhe, R.V. 1965. Landscape erosion-geologic and historic. J. Soil Water Conserv. 20: 52-57 p.

Ruhe, R, V, 1969. Quaternary landscapes in Iowa. State Univ., Press, Ames.

Russell E.W., 1973. Soil Conditions and Plant Gronth, 10th Edition, Longman Group Limited London. 849 p.

Simmonson, R.W., 1959. Outline of a generalized theory of soil genesis. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 23:, pp. 152-156.

Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R. 1993. Volcanic Ash, Soils. Amsterdam; Ed. Elsevier; 288 p.

Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo, 1994. Modificaciones propuestas por Guthrie y Witty (1981) para designar los horizontes del suelo: in USDA-SCS., 5 p.

Soil Survey Staff-USDA; 1988. Keys to Soil Taxonomy. Agency for International Development; SMSS Technical Monograph #6; Cornell University; 280 p.

Soller, D.R., and J.P. Owen., 1991. The use of mineralogy technical as relative age indicator for weathering profiles of the Atlantic Coastal Plain. USA., Geoderma., 51: III., 132 p.

Solleiro, R.E., 1992. Estudio sobre alteración, desarrollo y evolución de suelos derivados de rocas básicas: México, D.F., UNAM; Tesis de Maestría; 108 p.

Stremme, H., 1960. Bodenbildung auf Geschiebelehman Verschiedenen alters in Schleswigholstein. Zeit. Deutch. Geol. Gesell. 112. 299-308 p.

Swindale, L.D., 1969. The properties of volcanic ash soils, In Panel on volcanic ash soils in Latin America. T.R.C. of Inter-American Inst. of Agr.Sci. Turrialba, Costa Rica; pp. B 10.1-B10.9.

Tardy, J., 1969. Contribution á l étude de l 'altération expérimentale de verres volcaniques. Tesis Doc., Univ. París, 152 p.

Tate R.L. III, 1995. Soil Microbiology. John Wiley & Sons, Inc., New York, 398 p.

Thornwhaite,C.W., 1984. An approach towards the rational classification of climate: Geographical Review, v.22, p. 27-40.

Thwaites, F.T., 1946. Outline of glacial geology: Edwards Brothers, Ann Arbor, Mich.

Tuncer, A.L., Lohnes, A., 1977. An engineering classification of certain basalt derived lateritic soils: Eng. Geol. 11 (4)., pp. 319-339.

Uehara, G., 1982. Soil Science for the tropics. Engineering and construction in tropical and residual soils. ASCE Geotech. Div. Spec. Conf. Honolulu, Hawaii. pp.13-26

Ugolini, F.C., Dehlgreen, R. y, Shoji, S. 1988. Un ejemplo de Andosolización y Podsolización que revela los estadios del suelo; Ed. Japan Soil Sci., N° 11- 1-25 p.

USDA-SCS, 1986. Manual de Métodos de laboratorio y procedimientos para recoger muestras de suelo. México, D.F. Edit. Trillas, 4° reimpresión, 90 p.

USDA-Soil Survey Staff, 1990. Keys to soil Taxonomy, 4th edition, AID, USDA-SMSS Technical Monograph No.19, Blacksburg, Virginia.

USDA-SSS; 1993. Keys to Soil Taxonomy, 5th-ed. Soil Management Support Serv. Tech. Monogr. 19. Pocahontas Press, Inc., Blacksburg, V.A.

Vargas, M., and Pichler, E., 1957. Residual soil and rock slides in Santos, Brazil. Proc. 4th, Int. Conf. for Soil Mech. and Found. Eng. London.

Velde, B., 1995. Origin and mineralogy of clays: Berlin; Ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg., 345 p.

Weinert, H.H., 1974. A climatic index of wethering and its application in read construction. Geotechnique. 24 (4)., pp. 478-488.

Wintle, A.G. and D.J. Huntley, 1982. Thermoluminiscence dating of sediments. Quaternary Sci.Rev. 1: 31-53 p.

Wright, H.E., Jr y D.G., Frey, 1965. The Quaternary of the Unites States. Princeton Univ. Press, Princeton, N.J.

Yang, T.N., 1982. Methods for determining factors Contribuiting to soil aggregate formation; Soil and Fertilizar in Taiwan, 59-69.

GLOSARIO

Absorción. Proceso mediante el cual un gas es retenido por un líquido o sólido, o un líquido por un sólido, que penetra en la masa del material. Los sólidos que absorben gases o líquidos tienen estructuras porosas. La penetración de sustancias externas en los tejidos orgánicos, determinada por la acción de estos mismos.

Acidez. Medida de la actividad de los iones de hidrógeno y aluminio en un suelo húmedo. Por lo general, se expresa como valor de pH.

Actinomicetos. Bacterias pertenecientes al orden Actinomycetales, que producen un pseudomicelio fino, al unirse por sus extremos, formando estructuras filamentosas parecidas al micelio de los hongos.

Adhesión. Atracción molecular entre dos sustancias, que ocasiona que ambas superficies permanezcan en contanto.

Adición. Incorporación de material o energía al suelo.

Adsorción. Proceso por el cual una capa de átomos o moléculas de una sustancia se incorpora a la superficie de otra (sólida o líquida) ejem: Materia Orgánica, Arcilla. La capa adsorbida puede sostenerse por enlaces químicos que involucran cargas, o por fuerzas débiles (de Van der Waals).

Agregación. Es un fenómeno dinámico que afecta las propiedades físicas, mecánicas y biológicas del suelo. Se define como un grupo de dos o más partículas del suelo que se adhieren entre sí, las cuales presentan mayor cohesión con relación a las partículas que las rodean.

Agua de gravedad. Es el agua contenida en los espacios vacíos del suelo, la cual se drena por gravedad o por libre escurrimiento.

Alifático. Los compuestos orgánicos en los cuales el esqueleto de carbono se encuentra, ya sea en forma de cadena o como anillo alicíclico.

Aluviación. Se refiere al depósito de materiales, previamente erosionados, que han sido transportados por los agentes geológicos como el agua y el viento principalmente. Este fenómeno se debe considerar como un proceso natural de adición.

Amonificación. Transformación de las macromoléculas de las proteínas, ácidos nucléicos y otros compuestos nitrogenados, depolimerizados por las enzimas protolíticas producidas por los microorganismos del suelo, hasta convertirse en amoniaco (NH_3).

Anión. Ion cargado negativamente que se forma por la adición de electrones, átomos

o moléculas.

Anisotropía del perfil. Del griego: an, no, iso, igual = desigualdad). Se refiere a la presencia de horizontes diferentes, sobrepuestos, que conforman una anisotropía vertical, la cual es diagnóstica de un suelo residual evolucionado.

Anfótero. Que tiene, simultáneamente, propiedades ácidas y básicas. También se llama anfófilo. Dícese de una molécula en cadena cuyos extremos están cargados con signos opuestos.

Antrosoles (suelo) Del griego: antropos, hombre. Connotativo de actividades humanas intensas sobre el suelo hasta producir su modificación. El suelo así formado se denomina Antrosol.

Arcilla. Pueden considerarse como:

- Material mineral fino que, para algunos investigadores, tiene un diámetro de 4 micras y para los investigadores de suelos su diámetro es menor a 2 micras. Mineral silicatado con estructura cristalina, cuyo diámetro es menor de 2 micras. Se trata de un material natural, terrígeno, que desarrolla plasticidad cuando se mezcla con agua y que, bajo este estado, puede ser deformado por presión y mantenerse así cuando la misma cesa.
- Su análisis químico muestra que está compuesta por sílice, aluminio y agua; además, frecuentemente, presenta cantidades apreciables de hierro, álcalis y alcalinotérreos.
- Constituye una clase textural de los suelos.

Arena. Fragmentos de roca o minerales que tienen un diámetro de 2-0.2 mm en el sistema internacional, y de 2-0.02 mm en el sistema USDA.

Aromático. Compuestos orgánicos en los cuales, cuando menos una parte de su esqueleto de carbono, está basado en la estructura química del benceno (anillo de 6 átomos de carbono con un átomo de hidrógeno unido a cada uno).

Bases cambiables. Es la suma de los cationes: Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+}

Calcáreo. Se aplica a materiales edáficos que presentan fuerte efervescencia con HCl al 10%, o que contienen más del 2 por ciento de carbonato de calcio equivalente.

Calcificación. Acumulación de carbonato de calcio en los horizontes del suelo y capas del subsuelo Es el resultado de una eluviación moderada. El calcio tiende a ser dominante en el complejo de intercambio.

Caliche. Capas endurecidas de carbonato de calcio. Muchos de los "caliches" que afloran representan un relicto de erosión de un horizonte originalmente presente en

un paleosuelo. La densidad aparente de este material puede alcanzar valores > 2.0 g/cc y su resistencia a la presión confinada, generalmente, varía de 15 a 25 Kg/cm^2.

Cambio textural abrupto. Los lineamientos para definirlos son los siguientes:

- Si el contenido de arcilla en un horizonte o capa es <20 porciento, el contenido de arcilla con el horizonte que le sobreyace o subyace, deberá ser el doble dentro de una distancia, en profundidad, de 7.5 cm o menos.

- Si el contenido de arcilla excede del 20 porciento, el incremento de arcilla en los horizontes o capas sub o suprayacientes, deberá ser del 20 porciento dentro de una distancia de 7.5 cm en profundidad.

Si cumple con cualquier de los dos requisitos, se considera que existe un cambio textural abrupto, y se incrementa la posibilidad de que el suelo sea transportado.

Capacidad de campo. Cantidad de humedad que queda en el suelo después de que el agua libre (gravedad) ha escurrido o se ha drenado

Capacidad de intercambio catiónico total (C.I.C.T.). Son los procesos reversibles por los cuales las partículas sólidas del suelo adsorben **iones** de la fase acuosa y, al mismo tiempo, desadsorben cantidades equivalentes de otros cationes estableciendo un equilibrio entre ambas fases. Estos fenómenos se deben a las propiedades específicas del complejo coloidal del suelo que tienen cargas electrostáticas y una gran superficie. La materia orgánica, las arcillas y los hidróxilos funcionan como "cambiadores".

Caras de deslizamiento y superficies de fricción. Ambas denominadas "slickensides". Las caras de deslizamiento son superficies planas, pulidas y estriadas que se producen debido a que una masa de suelo resbala sobre otra. Algunas de ellas, se presentan en la base de una superficie de deslizamiento, donde una masa de suelo se mueve hacia abajo sobre una pendiente relativamente fuerte. Las caras de fricción son comunes en arcillas expandibles en las cuales existen cambios marcados en el contenido de humedad.

Carboxilo. Radical ácido. Grupo carboxilo (-COOH).

Catena. Secuencia de suelos desarrollados de un material parental moderno similar y en condiciones climáticas semejantes, pero cuyas características difieren debido a variaciones en relieve y drenaje.

Catión. Ion cargado positivamente que se forma por la remoción de electrones, de átomos o moléculas. Como cationes cambiables en el suelo se presentan principalmente: Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Al^{3+}, Fe^{3+}, Mn^{2+} e H^{+}

Coeficiente de extensibilidad lineal (COEL). Es la relación de la diferencia entre la longitud en húmedo y la longitud en seco de un terrón respecto a su longitud en seco. Esto es: (Lm-Ld)/(Ld)

donde:

Lm = Terrón húmedo (33kPa)
Ld = Terrón seco (1500 kPa)

Coloide. Materiales orgánicos e inorgánicos con partículas de tamaño muy pequeño (10^{-5} - 10^{-7} cm) , por tanto, con gran área superficial que, usualmente, presenta propiedades de intercambio.

Coluvio. Materiales de suelo, con o sin fragmentos de roca, que se acumula en la base de una pendiente por acción de la gravedad.

Columna Geológica. Estructura cronológica, vertical que muestra la subdivisión, de todo o parte, del tiempo geológico y la secuencia de unidades estratigráficas presente en una región o localidad particular.

Compactación. Aumento en la densidad aparente debido a la acción de fuerzas mecánicas (ver definición de valor n). Un ejemplo de estas fuerzas es la presión que ejercen las ruedas de un tractor. Generalmente, cuando un horizonte presenta una densidad aparente mayor de 1.3 gr/cc, se infiere un grado de compactación.

Conductividad hidráulica. Representa la razón entre la velocidad de flujo y la fuerza impulsora, en condiciones saturadas, de un líquido específico en un medio poroso.

Consistencia. Resistencia del suelo a la deformación o a la ruptura, según lo determina el grado de cohesión o adhesión de las partículas del suelo entre si.

Consistencia untuosa. Se usa con relalción a los Andisoles y se refiere al material del suelo que es tixotrópico.

Consolidado. Término que, por lo general, se refiere a rocas u otros materiales compactados y, en algunos casos, cementados.

Contacto lítico. Se refiere al contacto que se establece verticalmente entre una parte del horizonte C y la roca basal. Límite entre el suelo y un material subyacente coherente

Croma. Es la intensidad de un color.
Crotovina. Galería grande hecha por un animal y que está llena de material de otro horizonte.

Cumúlico. Del Latin cumulare; connotativo de capas superficiales de suelos que acumulan sedimentos.

Cután. Películas constituidas por materiales alterados, que se forman en las paredes de los canales y en las superficies de las partículas del suelo. Por ejemplo, existen cutanes de óxidos de hierro, arcilla carbonatos, y sílice.

Deflación. Remoción preferencial de partículas finas (principalmente limo) de la superficie del suelo por el viento.

Deflocular. Dispersar o separar partículas de las dimensiones de la arcilla, cuando estos materiales (arcillas) están en un estado floculado.

Denitrificación biológica. Procesos que conducen a la reducción de los nitratos hasta nitrógeno molecular (N_2) llevada a cabo, generalmente, por bacterias anaeróbias facultativas que usan los nitratos o nitritos como aceptor del hidrógeno en ausencia del oxígeno.

Densidad aparente. Es una medida del peso del suelo por unidad de volumen (g/cc) en seco (105°C). La variación en D.A. se atribuye a la proporción relativa y a la densidad específica de las partículas orgánicas e inorgánicas, así como a la porosidad del suelo.

Densidad de partícula. Se define como la masa (peso) de los sólidos del suelo por unidad de volumen (g/cc). También se le denomina densidad real.

Degradación del suelo. Es un proceso que rebaja la capacidad actual o potencial del suelo para producir cuantitativa y cualitativamente bienes o servicios.

Depósito. Material colocado en una nueva posición geográfica por la actividad del hombre o de procesos naturales originados por: el agua, viento, hielo o gravedad.

Depósitos téfricos: Del griego: tephra, ceniza. Connotativo de materiales piroclásticos (>60% por volumen) que han sido retrabajados y mezclados con materiales de otra fuente (<40%). Se denomina también materiales aluviales vulcanogénicos.

Deslizamiento de Tierras (creep). Movimiento lento de tierras por pendientes usualmente pronunciadas. El proceso se efectúa en respuesta a la gravedad, facilitado por la suturación con agua.

Dispersión. Proceso por el cual se destruye la estructura o agregación del suelo, de tal manera que cada partícula es separada y se comporta como una unidad.

Drenaje impedido. Restricción del movimiento del agua hacia abajo por gravedad. Puede conducir al desarrollo de condiciones anaeróbicas por encharcamiento.

Duripan (hardpan). Horizonte medio o inferior, cementado con materia orgánica y/o sílice, y/o sesquióxidos. La dureza se mantiene en seco o mojado. No se desmorona

en agua. En México, estos materiales soportan una presión confinada que oscila de 8 a 32 kg/cm^2 (Flores, et.al; 1996 y 1997).

Edafología. Estudia las relaciones entre el suelo y los organismos; incluyendo el uso de la tierra por el hombre.

Edafoturbación. Se refiere al proceso por el cual los componentes de un suelo se han mezclado, sin la intervención de la iluviación. Se habla de faunaedafoturbación cuando el suelo es mezclado por organismos que viven en él; Argiloedafoturbación cuando el suelo es mezclado por procesos de expansión y contracción de las arcillas (vertisoles); Crioedafoturbación cuando el suelo es mezclado por el crecimiento de cristales de hielo y el subsecuente descongelamiento que produce colapsos en la capas; Sismoedafoturbación, es el resultado de los temblores de tierra y Antroedafoturbación es la mezcla que se propicia en el suelo por efecto de las actividades del hombre.

Eluviación e iluviación. Ambos procesos están muy relacionados. Eluviación es el proceso de remoción de constituyentes de un horizonte del suelo, capa o zona por solución o lavado, casi siempre con agua. Los horizontes donde la eluviación es dominante pueden ser referidos como horizontes E eluviales. La iluviación puede ser definida como el proceso que permite recibir o acumular materiales movidos por eluviación. Los horizontes iluviales más comunes son los B.

Epipedón. No es sinónimo de horizonte A, debido a que puede incluir a parte o a todo el horizonte B iluvial, si el oscurecimiento por la materia orgánica se extiende desde la superficie hasta o a través del horizonte B.

Erosión. Remoción de los materiales de la superficie terrestre por intemperización.

Espacio poroso del suelo. La red de canales ocupados por aire o agua, limitados por superficies sólidas en los cuales pueden crecer las raíces finas de las plantas.

Estabilidad mineral. Se refiere a la resistencia de diferentes minerales en un determinado medio ambiente, el cual genera que éstos tiendan a concentrarse, formarse o desaparecer del suelo.

Estructura. Es la distribución espacial y la organización total del sistema suelo, expresados por el grado y tipo de agregación, así como por la distribución de los poros y el espacio poroso.

Espacio poroso. Son los espacios continuos e interconectados del suelo.

Evapotranspiración. Procesos de evaporación y transpiración combinados.

Evolución del CO_2. Mineralización del carbono. Transformación microbiana de los compuestos orgánicos hasta bióxido de carbono.

Extensibilidad lineal potencial (ELP). Esta característica es la suma de los productos de cada horizonte; del espesor del horizonte y del coeficiente de expansión lineal del horizonte (COEL).

Fábrica del suelo. Naturaleza y arreglo de los constituyentes del suelo y sus relaciones entre si.

Fase freática. Es una capa freática que se presenta dentro de una profundidad de 5m, ó menos, a partir de la superficie.

Ferrólisis. Es el empobrecimiento en hierro y materiales arcillosos debido a cambios bruscos de Eh, que acompañan a la formación y desaparición de una capa de agua superficial. Generalmente, este proceso constituye horizontes E álbicos.

Fijación biológica del Nitrógeno. Capacidad que tienen ciertas bacterias (*Eubacteriales* y *Cyanophyta*) las que, por tener la enzima nitrogenasa, son capaces de tomar el N_2 del aire y reducirlo en amoniaco (NH_3), base para la síntesis de proteínas.

Fitociclaje. Se refiere a los procesos por los cuales los elementos son tomados de las capas del suelo por las plantas y, nuevamente, adicionados al suelo por la mineralización de los restos orgánicos que las plantas depositan sobre éste. Algunos elementos que se incluyen son: boro, calcio, cobre, hidrógeno, potasio, magnesio, manganeso, nitrógeno, sodio, oxígeno, fósforo, azufre, sílice, zinc. Otros elementos como: el carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre, normalmente, se presentan en estado gaseoso y, en esta forma, son fácilmente intercambiables entre la atmósfera y el suelo, bajo condiciones normales.

Fitolito. De modo general, se refiere a los restos de vegetales recubiertos por sílice en forma de ópalo (S_1 O_2). Estas estructuras generalmente se presentan en la fracción limo y, debido a que pueden permanecer durante mucho tiempo en el suelo ($^{\pm}$14000 años) son utilizados para la reconstrucción paleobotánica y paleoedafológica.

Flujo no saturado. Movimiento del agua en un suelo que no está completamente lleno de agua.

Flujo saturado. Movimiento del agua en un suelo completamente lleno de agua.

Fragipán (densipan). Horizonte medio o inferior compactado. La dureza sólo se mantiene en seco, ya que en presencia de agua se desmorona en su totalidad. Su densidad aparente es > 1.3 g/cc y su resistencia a la presión confinada oscila de > 1 a > 8 kg/cm^2.

Gleyización. Este fenómeno consiste en la reducción del hierro anaeróbico,

conducente a la formación de colores grises o azules en la matriz del suelo, aunque existen otros constituyentes que también imparten color, como son, por ejemplo, los óxidos de manganeso que generan colores negros; la jerosita colores amarillos; la glauconita colores verdes; las arcillas cilicatadas que dan tonos claros y los sulfatos que dan tonos obscuros.

Heteropolar. Que tiene una distribución de cargas desigual, como es el caso en los enlaces semipolares.

Hidratación. Proceso mediante el cual una sustancia absorbe agua.

Hidrólisis. En los suelos, es el proceso por el cual los iones de hidrógeno del agua son intercambiados por cationes como sodio, potasio, calcio y magnesio, y los iones hidroxílicos se combinan con los cationes para formar hidróxidos.

Hidroxilo. Radical monovalente formado por un átomo de H y otro de O, del que puede quedar libre una valencia; su fórmula es -OH.

Hierro-pan. Horizonte endurecido y cementado de un suelo, generalmente tropical (> 4 g/cm^2), en el cual los óxidos de hierro y aluminio son los principales agentes cementantes.

Hifas. Estructura celular de los hongos. Microscópicamente, tienen el aspecto de filamentos simples o ramificados.

Horizontes. Materiales transformados por los procesos edafogénicos, dispuestos de manera horizontal o paralelamente a la superficie del suelo; los cuales se extienden continua o discontinuamente en la unidad edáfica. El conjunto de horizontes constituye el "perfil".

Horizonte cámbico. Denominado Bw, es un horizonte subsuperficial que, generalmente, subyace al horizonte A. Presenta una textura más fina que la franco arenosa fina. En este horizonte, los materiales minerales han sido moderadamente alterados o removidos, pero no acumulados. Las evidencias de intemperismo incluyen: (1) eliminación de estratificaciones finas; (2) cambios originados por humedad tales como colores grisaceos y/o moteado; (3) redistribución de carbonatos y (4) presencia de colores más amarillos y/o rojos que los de los horizontes supra y subyacentes. Este horizonte de diagnóstico, también, suele presentar: (1) estructura ; (2) bajos contenidos de materia orgánica y (3) restos muy alterados de la roca o depósito parental.

Horizonte eluvial. Horizonte del que ha sido removido material ya sea en solución o en suspensión.

Horizonte de diagnóstico. Es aquel horizonte del suelo que tiene una serie de propiedades que son utilizadas para la identificación de unidades de suelo.

Horizonte iluvial. Horizonte que recibe y acumula material en solución o suspensión de alguna otra parte del suelo.

Horizonte sulfúrico: Se forma como resultado de un drenaje artificial y oxidación de los materiales minerales u orgánicos, ricos en sulfuros. Tiene como mínimo 15 cm de espesor, un pH < de 3.5 (1:1 en agua) y manchas del mineral jarosita.

Humedad capilar. Cantidad de agua que tiene la capacidad para moverse después de que ha sido drenado el suelo. Es mantenida por adhesión y tensión superficial alrededor de las partículas y en los espacios porosos más finos.

Humificación. Descomposición de la materia orgánica, por la actividad microbiana, que conduce a la formación de humus.

Humina. Término generalmente aplicado a la parte de la MO que queda después de la extracción con un álcali diluido (NaOH).

Humus. Está compuesto por los restos postmortales, muy alterados, de vegetales y animales propios del suelo. Estos restos están sometidos constantemente a procesos de descomposición muy enérgicos, a transformaciones y resíntesis.

Humus. Parte muy descompuesta y relativamente estable de la MO que se encuentra en suelos aeróbicos.

Humus amorfo. Materia orgánica muy descompuesta de tamaño coloidal.

Iluviación. El proceso que permite recibir o acumular materiales movidos por la eluviación. Los horizontes iluviales más comunes son los B.

Infiltración. Proceso por el cual el agua entra al suelo desde la superficie.

Inmovilización. Es equivalente a la asimilación de los nutrimentos inorgánicos (C, N, P, S, K, etc.) por las plantas y los microorganismos del suelo, como fuente de energía o para la síntesis celular. Es el fenómeno opuesto a la mineralización.

Intemperización. Todos los procesos físicos, químicos y biológicos que, inicialmente, originan la desintegración de la roca y que, posteriormente a ello, conducen a la diferenciación genética del suelo formado.

Intergrado, (Suelo intergrado). Suelo que muestra características físicas, químicas y mecánicas que lo relacionan con dos unidades diferentes de suelo.

Ion. Partícula cargada eléctricamente, formada por un átomo o grupo de átomos que han ganado o perdido uno o más electrones.

Laterización. Se refiere al proceso en el que se involucra la adición o acumulación de hierro por lixiviación, principalmente en su forma ferrosa el que, por oxidación y precipitación, propicia el enriquecimiento de un horizonte en óxidos de hierro y la formación de una plintita o material "laterítico".

Látice. Del Inglés: lattice, red de estructura cristalina.

Latosolización. Proceso en el que la sílice y las bases han sido soluviadas (están en solución) quedando Fe, Al y Ti (Sesquióxidos) que llegan a formar minerales como la caolinita después de un lavado intenso y de una compleja transformación. Este proceso permite que los suelos presenten características dominantes de intemperismo asociados con una fuerte laterización. Entre otras características se incluyen: relaciones molares bajas de sílice/sesquióxidos, baja capacidad de intercambio, baja saturación de bases, baja actividad de las arcillas, bajo contenido de minerales primarios, muy bajo contenido de constituyentes solubles y colores rojos en la matriz del suelo. La pérdida de sílice y bases es distintiva de este proceso.

Lessivage. Término utilizado para indicar el desplazamiento mecánico de materiales en solución y, en sentido más estricto, el movimiento de arcillas en suspensión (lavado).

Lignina. Polímero derivado del fenilpropano. Se aceptan dos estructuras básicas del fenol en la lignina con uno o dos radicales metoxi ($-OCH_3$) en su estructura. Junto con la celulosa, forma la pared celular de las células de las plantas. Especialmente abundante en el tejido leñoso o madera.

Limo. Partículas minerales cuyo diámetro fluctua de 0.02 a 0.002 mm en el sistema internacional o de 0.05 a 0.002 mm, en el sistema internacional, USDA.

Lixiviación. La remoción y acumulación de los materiales del suelo, por la acción del agua y los ácidos.

Material amorfo. Es un material coloidal que incluye al alófano y que tiene todas o muchas de sus propiedades. Si el material amorfo domina en el complejo de intercambio, se cumplen las siguientes condiciones:

- La C.I.C.T, en la fracción arcilla a pH 8.2, es > a 150 meq/100g de arcilla (> a 150 cmol $^{(+)}$/Kg arcilla).
- A una presión de 15 bars (1500 kPa) el contenido de agua es > 20%.
- El pH en una solución de un gramo de suelo en 50 ml de una solución M de NaF es> 9.4 después de 2 minutos.
- La relación de agua retenida (15 bars/arcilla) es > 1.0.
- El contenido de carbono orgánico > 0.6%.
- La densidad aparente del suelo es < 0.85 g/cc a 0.33 bars.

Materiales téfricos. Del griego, tephra, ceniza. Connotativo para indicar una acumulación, de piroclásticos no alterados *in situ.*

Materiales úrbicos. Del inglés urbic. Connotativo de suelos formados por rellenos de basura ricos en materiales para construcción

Materia Orgánica (MO) En el suelo, la MO está constituída por los compuestos de origen biológico que sa presentan en los horizontes o capas. La MO comprende tanto la flora como la fauna del suelo (Edafon) así como sus rastos, débil o moderadamente, descompuestos.

Micela. Partícula de tamaño coloidal.

Micelio. Estructura formada por el crecimiento de las hifas de un hongo. A simple vista,puede tener un aspecto algodonoso. En el suelo rodea o envuelve las partículas del suelo formando microagregados.

Micorriza. Asaciación simbiótica entre un hongo y una planta vascular, consistente en una relación intima entre el micelio y las raíces de la planta.

Microrrelieve. Pequeñas diferencias en relieve, incluyendo montículos u hoyos que tienen pocos metros de diámetro, y no tienen diferencias de altura mayores de dos metros.

Minerales primarios. Se les denomina a los que, originalmente, constituyen o contituyeron a la roca o depósito parental del suelo.

Minerales accesorios. Se encuentran en pequeñas cantidades en una roca y cuya presencia o ausencia no afecta la estructura de la misma.
Minerales intemperizables. Los minerales que se incluyen en este concepto, son:

- Todas las arcillas de estructura 2:1, excepto la clorita- Al interestratificada.
- Minerales del tamaño del limo y/o arena (0.02 a 0.2 mm de diámetro) feldespatos feldespatoides, minerales ferromagnésicos, vidrios, micas, zeolitas y apatita.

Minerales secundarios. Aquellos que se forman del material liberado por intemperización. Los principales minerales secundarios son las arcillas y óxidos.

Mineralización. Cambio de una sustancia de una forma orgánica a inorgánica. Este cambio lo efectuan los microorganismos del suelo.

Moteado. Manchas de diferentes colores que, generalmente, se desarrollan en el patrón de color del suelo (matriz) debido a anaerobiosis parcial.

Nitrificación. Comprende la transformación del amoniaco (NH_3) o de los iones amonio (NH_4) en nitratos (NO_3^-) pasando por la forma de nitritos (NO_2^-). El proceso lo llevan a cabo las bacterias nitrificantes Nitrosomonas y Nitrobacter.

Nivel freático. Se le llama al nivel superior del suelo, o del material subyacente que está permanentemente saturado con agua.

No consolidados. Materiales que están sueltos y no endurecidos.

Panes. Horizontes del suelo que están muy compactados, cementados, o tienen un elevado contenido de arcilla.

Pedología. Estudia el origen o génesis de los suelos como fenómeno de ocurrencia natural, tomando en cuenta su composición, distribución y procesos de formación.

Percolación. Movimiento vertical o lateral del agua, y/o aire a través del suelo.

Pérdida. Disminución de los materiales del suelo por lavado a través del agua de drenaje.

Perfil del suelo, (pedón). Es un corte plano del suelo en dos dimensiones (largo y ancho) que se extiende verticalmente desde la superficie del suelo, de tal manera pue se expongan todos los horizontes (o capas superpuestas) presentes en él, y parte del material relativamente inalterado.

Permeabilidad. Se refiere a la resistencia que muestra cada horizonte o capa del suelo, para que el agua fluya a través de ella por gravedad. La permeablidad se mide en cm/hora o cm/minuto. En la Ciencia del suelo, rara vez se denomina el tipo de régimen de flujo, es decir, los conceptos de flujo laminar o flujo turbulento son de uso limitado. También se relaciona con la facilidad con que el aire, el agua o las raíces de las plantas penetran en o pasan a través de un horizonte específico.

pH del suelo. Logaritmo negativo de la actividad de los iones de hidrógeno en el suelo. El grado de acidez o alcalinidad de un suelo, expresado en términos de la escala de pH, de 1 a 14.

Phyla. Plural de phylum. Categoría taxonómica para los seres vivos. Grupo o división primaria dentro del reino animal como por ejemplo: Phylum Arthropoda. Dentro de la concepción de reinos: Monera, Protistas, Plantae, Fungi, y Animalia, los phyla son los grandes grupos que los constituyen; Ejem: Phylum *Cyanophyta* (cianobacterias) del reino monera.

Plasticidad. Propiedad de ciertos materiales por la cual la deformación debida a un esfuerzo permanece, en gran parte, después de la desaparición de éste.

Plástico. Suelos plásticos. Aquellos que, mojados o húmedos, pueden moldearse sin romperse.

Plintita. Mezcla de arcilla con cuarzo y otros diluyentes; rica en hierro y pobre en humus. Comúnmente se presenta como moteados de color rojo oscuro.

Podzolización. Proceso que da origen a suelos clasificados como Podzoles, en los cuales, particularmente, se forma el horizonte espódico.

Poro. Volumen discreto de atmósfera de suelo rodeado por completo por suelo.

Porosidad. Volumen de la masa del suelo ocupado por los poros y espacios porosos

Porosidad. Es la porción del suelo ocupada por el aire y/o el agua. Para obtener el porcentaje de porosidad, se requieren los valores de la densidad aparente (DA) y de la densidad de partícula (DP), sustituyendo los valores de la siguiente relación:

$$\text{Porosidad} = 1 - \left(\frac{DA}{DP}\right) \times 100$$

Protozoarios. Microorganismos unicelulares pertenecientes al Reino de los Protistas. En el campo de la microbiología del suelo se les considera la microfauna; los *phyla* de este reino, considerados como miembros importantes del suelo, son los: *Zoomastigina (flagelados); Sardodina* (amibas) y *Ciliophora* (ciliados).

Reemplazo isomórfico. Sustitución de un ion por otro en el "látice" de un cristal sin cambiar la estructura del mineral.

Regolita. Es la parte no consolidada de la corteza terrestre.

Retención de fósforo en el suelo. Transformación de fosfatos solubles en compuestos insolubles o de muy baja solubilidad y disponibilidad para ser tomados por las plantas. Ocurre en suelos de áreas tropicales, asociados con un pH bajo y grandes cantidades de hidróxidos de Al y Fe. Aunque también puede presentarse en suelos calcimagnésicos, con cantidades elevadas de calcio libre. Algunos autores le llaman fijación de fósforo.

Roca. Masa sólida formada por un solo mineral o por varios. Atendiendo a su origen, se divide en: R. eruptiva; R.sedimentaria y R. metamórfica.

Roca parental. Se refiere a la roca consolidada.

Salinización. Es el proceso de acumulación de sales en un horizonte superficial del suelo que, a menudo, permite la formación de un horizonte.

Saturación de bases. Grado en que los sitios de intercambio de un material están ocupados por cationes básicos intercambiables.

Sesqui. Que contiene dos clases de átomos, radicales etc., en las proporciones 2:3; ejemplo: sesquióxido.

Sesquióxidos. Por lo general, se refiere a los óxidos amorfos combinados de hierro y aluminio.

Soliflucción. Flujo lento de materiales en terrenos inclinados característico, aunque no limitado, a regiones expuestas a períodos alternos de congelación y deshielo.

Solodización. Es el proceso que permite que un solonetz se transforme en un soloth. Este suelo se forma por lixiviación intensa de los horizontes superiores, constituyéndose un horizonte E, el cual muestra un pH ácido.

Solonización. Es el proceso que permite la formación de un solonetz, también llamado suelo de álcali negro, que se caracteriza por su concentración alta de sodio y por la existencia, en ocasiones, de un horizonte E. Los pH altos en estos suelos son resultado de la presencia de carbonato de sodio.

Solum. Incluye los horizontes O, A, E, B y parte del C (si está alterado por procesos edafogenéticos).

Soluviación. Ha sido definida como solución + lavado. Se considera que la solución debe ser simple, en el sentido de que la solubilidad de los constituyentes no este incrementada por fenómenos de quelatación o de óxido-reducción.

Subsuelo. Desde el punto de vista edafológico, incluye a los horizontes B y E.

Substrato. Incluye el material que subyace al solum.

Suelos expansivos. Generalmente arcillosos, compuestos por partículas minerales que tienen una gran afinidad por el agua. La cual absorben del medio ambiente y la incorporan a su estructura molecular. Las arcillas montmorilloníticas y bentoníticas poseen esta particularidad. Generalmente, los suelos expansivos caen dentro del grupo de las arcillas finas de alta plasticidad (CH) y, en menor proporción, en las de baja plasticidad (CL). Los suelos típicamente expansivos son los Vertisoles. La mayoría de los Solonchaks, los Cambisoles, Gleysoles, Luvisoles vérticos y Planosoles solódicos.

Suelos dispersivos. Esencialmente arcillosos y altamente erodables en presencia de agua debido a un proceso electroquímico de floculación o dispersión. La floculación en estos suelos implica la formación de grumos constituída por partículas minerales individuales. Inversamente, "deflocular" es la acción de separar dichas partículas las cuales, cuando hay flujo de agua, son susceptibles de ser arrastradas a través de los poros del suelo, propiciando la formación de canalículos que dan lugar a fallas por tubicación, principalmente, en bordes homogéneos para almacenamiento de agua.

Todos los suelos del orden Solonetz son, por naturaleza, de carácter dispersivo. En tanto que los Planosoles solódicos presentan siempre un horizonte B que adolece de esta propiedad negativa y que, mezclado con los demás horizontes, podría volver dispersivo al conjunto del suelo.

Suelos Colapsables. Los que sufren fuertes asentamientos repentinos cuando se saturan parcial o totalmente. En su gran mayoría, estos suelos son de origen eólico y se conocen con el nombre de "Loess"; también pueden serlo algunos suelos aluviales poco compactados y prácticamente secos.

Los suelos "loésicos" son sedimentos de materiales feldepáticos plásticos, compuestos de una mezcla uniforme de arena fina, limo y arcilla, y dispuestos en una textura abierta. Generalmente, son poco cohesivos y de baja a mediana plasticidad. Algunos suelos "loésicos" tienen una película envolvente de arcilla alrededor de los granos de limo o arena la cual, al adicionarles agua, se reblandece y motiva que estos granos resbalen unos sobre otros, provocando el colapso de la masa del suelo. El asentamiento de la masa del suelo puede también atribuirse a la disolución del carbonato de calcio por el agua. Todos los Andisoles (antes llamados Andosoles) son colapsables por naturaleza.

Suelos contaminados. Aquellos que muestran elementos ajenos a su naturaleza los cuales han sido adicionados, de forma natural o inducida, generalmente de origen antrópico, estos elementos o compuestos propician una disminución de los caracteres ecológicos de aptitud del suelo.

Suelos corrosivos. Desde el punto de vista geotécnico, la corrosividad de un suelo se refiere a la acción química de disolver o deteriorar ciertos materiales estructurales, como el concreto o el acero carentes de protección o tratamiento, en diversas instalaciones de Ingeniería. La rapidez e intensidad con que estos materiales, sin recubrimiento, van siendo atacados por corrosión, está intimamente ligada a ciertas propiedades del suelo como son: (1) drenaje interno del suelo; (2) Textura; (3) acidez total; y (4) conductividad eléctrica. La corrosividad del concreto está asociada, fundamentalmente, al contenido de sulfatos de sodio o magnesio. Los Solonchaks y Solonetz son suelos por naturaleza corrosivos.

Suelos de grano suelto. Generalmente constituídos por capas que carecen de estructura, es decir, sin agregación. Son suelos, frecuentemente, muy erodables constituídos, en porcentajes muy altos, por partículas cuyo diámetro oscila de 0.04 a 2 mm aunque, algunos de ellos, muestran partículas sueltas con diámetro de hasta 4 mm. Muchos de los Regosoles y Arenosoles se comportan como suelos de grano suelto.

Suelos orgánicos. En general, se trata de suelos que muestran contenidos altos de materia orgánica (M.O.) y contenidos bajos de arcilla. Los contenidos de M.O. son > al 30%, en tanto que los contenidos de arcilla, generalmente, son < al 20%. Los

Histosoles y algunos suelos lacustres o de "ciénega" son representativos de este grupo.

Suelo poligenético. El que se ha formado por dos o más procesos contrastantes, de tal manera que todos sus horizontes no están relacionados, genéticamente, entre sí.

Sulfidización. Es el proceso por lo cual los sulfuros se acumulan o toman lugar como parte activa del material parental del suelo.

$$Fe\ (II)+HS^{-}+OH^{-}\rightarrow FeS+H_2O$$

Sulfurización. Proceso por el cual los materiales que contienen sulfuros son oxidados, y los minerales del medio son intemperizados por efecto del ácido sulfúrico que se produce, creándose nuevos minerales a partir de los productos de disolución. Estos nuevos minerales formados incluyen la mayoría de los compuestos sulfatados.

Superficie específica de partícula. El término se refiere al área por unidad de masa del suelo; por lo general, se expresa en m^2 por gramo. Cuando se conoce la masa (Ms), la densidad de partículas sólidas (Pp), el radio (r) y el grosor (t) de las mismas, se puede calcular la superficie total (As) mediante la siguiente ecuación:

$$As = Kp\ \frac{r+t}{rt}$$

$$\text{donde: } Kp = \frac{2Ms}{Pp} = \text{a una constante}$$

Terrón. Masa de suelo producida por disturbio.

Textura.- Está relacionada con el tamaño de las partículas minerales que constituyen la parte sólida del suelo. Específicamente, se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. Estos grupos están constituidos por Arena (0.05 a 2 mm de diámetro); Limos (0.002 a 0.05 mm de diámetro y Arcillas (<0.002 mm de diámetro) según la clasificación USDA.

Transferencia. Se refiere a la eluviación e iluviación de materiales del horizonte A al B.

Transformación. Corresponde a la alteración simple o compleja de materiales minerales y orgánicos presentes en el suelo.

Translocación. Movimiento del material de un horizonte a otro en solución, suspensión o por organismos.

Unidad pedológica. Columna seleccionada de suelo, que contiene en cada horizonte suficientes características diagnósticas, para efectuar una caracterización

adecuada de campo y laboratorio.

Valor n. Se refiere a la relación entre el porcentaje de agua en condiciones de campo y los porcentajes de arcilla y materia orgánica. Este valor es útil en la predicción del grado de soporte del suelo al peso del ganado y a otras cargas, o para determinar el grado de subsidencia que podría ocurrir después del drenaje. Para materiales edáficos que no son tixotrópicos, el valor n se puede calcular por la formula:

$$n = (A - 0.2R) / (L + 3H)$$

donde:

A = porcentaje de agua en el suelo en condiciones de campo.
R = porcentaje de limo más arena.
L = porcentaje de arcilla.
H = porcentaje de materia orgánica.

ANEXO 1: TIPOS DE ESTRUCTURA

- **Estructura**

La estructura se refiere a la forma en que están agregadas las partículas de arena, limo y arcilla.

La unidad individual de estructura se denomina ped.

La descripción de la estructura se compone de tres partes: forma, tamaño y grado de desarrollo.

- Forma

LA **Laminar**. Los peds son en forma de láminas; las dimensiones horizontales son mayores a las verticales; las caras normalmente se traslapan en forma horizontal.

PR **Prismática**. Los peds semejan prismas; las caras verticales son planas o ligeramente redondeadas y más largas que las horizontales; las caras son moldeadas por las de los peds circundantes; los verticales son angulares o subredondeados; las superficies horizontales son algo indistintas y normalmente planas.

CO **Columnar**. Los peds son parecidos a los de la estructura prismática con la diferencia de que en la estructura columnar las superficies superiores de los peds son redondeadas.

BA **Blocosa angular**. Los peds están en forma de bloques o poliedros; las tres dimensiones son casí de la misma magnitud; las caras son planas o ligeramente redondeadas y se intersectan en ángulos relativamente abruptos; las caras son moldeadas por las de los peds circundantes.

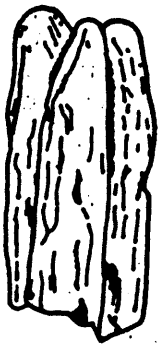
BS **Blocosa subangular**. Los peds son parecidos a los de estructura blocosa angular a excepción de que las caras son planas y redondeadas y los vértices son redondeados.

GR **Granular**. Los peds son esferoides o poliedros; las caras son muy irregulares y no son moldeadas por las de los peds circundantes.

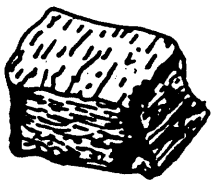
FE **Falta de Estructura**

ANEXO 1: TIPOS DE ESTRUCTURA

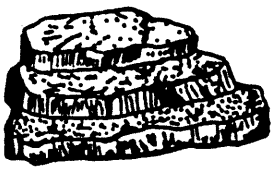
Estructura prismática



Estructura columnar



Estructura blocosa angular



Estructura laminar

Estructura granular

Estructura blocosa subangular

ANEXO 2

ETIMOLOGIA DE LAS PALABRAS USADAS PARA DENOMINAR LOS GRUPOS DE SUELOS, NIVEL 1

ACRISOLES. Del lat. acer, acetum, muy ácido; el términò es indicativo de suelos con baja saturación en bases y de reacción ácida.

ALISOLES. Del lat. alumen; significa alto contenido en aluminio.

ANDOSOLES. Del japonés an, oscuro y do, suelo; relativo a suelos formados a partir de materiales ricos en vidrios volcánicos (cenizas volcánicas) y que, generalmente, tienen un horizonte superficial oscuro.

ANTROSOLES. Del gr. anthropos, hombre; suelos cuyo origen se relaciona a las actividades humanas.

ARENOSOLES. Del lat, arena, arena; relativo a suelo de textura gruesa, poco desarrollados.

CALCISOLES. Del lat. calx, cal; el término indica acumulación de carbonato cálcico.

CAMBISOLES. Del lat. tardío cambiare, cambiar; se relaciona con cambios de color, estructura y consistencia.

CHERNOZEM. Del ruso chern, negro y zemlja, tierra, terreno; el término es indicativo de suelos ricos en materia orgánica, que tienen un color negro.

FERRALSOLES Del lat. ferrum y alumen; con este término se designa a suelos ricos en fierro y aluminío (sesquióxidos).

FLUVISOLES. Del lat. fluvius, río; relativo a depósitos aluviales.

GLEYSOLES. De la palabra local rusa gley, masa de suelo pastosa; denota un exceso de agua.

GREYZEMS. Del anglosajón grey, y del ruso zemlja, tierra, terreno; el término indica granos de cuarzo y limo sin recubrimientos, presentes en capas ricas en materia orgánica.

GYPSISOLES. Del lat. gypsum, yeso; suelos con acumulación de sulfato cálcico.

HISTOSOLES. Del gr. histos, tejido; se caracterizan por su riqueza en material orgánico fresco o parcialmente descompuesto.

KASTANOZEMS. Del lat. castanea, castaña, y del ruso zemlja, tierra, terreno; suelos ricos en materia orgánica, de color pardo o castaño.

LIXISOLES. Del lat. lixivia, lavado; indica acumulación de arcilla y fuerte meteorización.

LUVISOLES. del lat. luere, lavar, "lessiver"; denota acumulación de arcilla.

NITISOLES. Del lat nitidus, brillante; se caracteriza por las superficies brillantes de sus unidades estructurales.

PHAEOZEMS. Del gr. phaios, oscuro y del ruso zemlja, tierra, terreno; suelos ricos en materia orgánica, de color oscuro.

PLANOSOLES. Del lat. planus, plano horizontal; suelos desarrollados, generalmente, en una posición topográfica horizontal o en una depresión con encharcamiento superficial estacional.

PLINTOSOLES. Del gr. plinthos, ladrillo; denota la presencia de materiales arcillosos abigarrados que se endurecen cuando se exponen a la intemperie.

PODSOLES. Del ruso pod, debajo y zola, ceniza; suelos con un horizonte fuertemente blanqueado.

PODSOLUVISOLES. Relativo a Podsoles y Luvisoles.

REGOSOLES. Del gr. rhegos, manta; indica la existencia de un manto de material no consolidado, situado encima del núcleo duro de la tierra. Suelos poco evolucionados sobre material no consolidado

SOLONTCHAK. Del ruso sol, sal y chak; suelos de áreas salinas; solontchak sódico o cálcico.

SOLONETZ. Del ruso sol, sal y etz, fuertemente expresado. Suelos alcalinos lavados.

VERTISOLES. Del lat. vertere, invertir; denota movimiento de la superficie del suelo. Suelos de color oscuro ricos en arcillas expandibles, con drenaje prácticamente nulo.

ETIMOLOGIA DE LAS PALABRAS USADAS PARA DENOMINAR LAS UNIDADES DE SUELOS, NIVEL 2

ALBICO. Del lat. albus, blanco; relativo a suelos con un fuerte blanqueado.

ANDICO. Del japonés and, oscuro, y do, suelo; relativo a los Andosoles.

ARICO. Del lat. arare, arar; connotativo de capa arable.

CALCAREO. Del lat. calcarius, calcáreo; denota la presencia de material calcáreo.

CALCICO. Del lat. calx, cal; se refiere riqueza en calcio.

CAMBICO. Del latín tardío cambiare, cambio; se relaciona con cambios de color, estructura o consistencia.

CARBICO. Del lat. carbo, carbón; indicativo de un elevado contenido en carbono orgánico en los horizontes B espódicos.

CROMICO. Del gr. chromos, color; relativo a suelos con colores brillantes.

CUMULICO. Del lat. cumulare, acumular; denota acumulación de sedimentos.

DISTRICO. Del gr. dys, malo, desnutrido, infértil; caracteriza a suelos con baja saturación en bases.

EUTRICO. Del gr. eu, bueno, nutritivo, fértil; se refiere a suelos con alta saturación en bases.

FERRALICO. Del lat. ferrum y alumen; indicativo de un elevado contenido en sesquióxidos.

FERRICO. Del lat. ferrum, hierro; denota manchas o acumulación de hierro.

FIBRICO. Del lat. fibra, fibra; relativo a material orgánico poco descompuesto.

FIMICO. Del lat. fimum, estiércol, purín, fango; relativo a un horizonte formado por abonado continuo durante mucho tiempo.

FOLICO. Del lat. folium, hoja; indica material orgánico sin descomponer.

GELICO. Del lat. gelu, helado; suelos sometidos a congelación permanente (permafrost).

GERICO. Del gr. geraios, viejo; denota fuerte meteorización.

GLEICO. Del nombre local ruso gley, masa de suelo pastosa.

GLOSICO. Del gr. glossa, lengua; indica interpenetración de un horizonte en las capas subyacentes.

GYPSICO. Del lat. gypsum, yeso; denota acumulación de yeso.

HAPLICO. Del gr. haplous, simple; relativo a suelos con una secuencia de horizontes simple y normal.

HUMICO. Del lat. humus, tierra; rico en materia orgánica.

LITICO. Del gr. lithos, roca; se aplica a suelos muy poco profundos.

LUVICO. Del lat. luere, lavar, "lessiver"; indica acumulacion de arcilla.

MOLLICO. Del lat. mollis, blando; relativo a suelos con buena estructura en superficie.

PETRICO. Del lat. petra, piedra; denota la presencia de una capa dura a escasa profundidad.

PLINTICO. Del gr. plinthos, ladrillo; indicativo de materiales arcillosos abigarrados que se endurecen irreversiblemente cuando se exponen a la interperie.

RENDSICO. Del polaco coloquial rzedzic, se relaciona al ruido que hace el arado cuando se labran suelos pedregosos superficiales.

RODICO. Del gr. rhodon, rosa; se aplica a suelos de color rojo.

SALICO. Del lat. sal, sal: se refiere a una alta salinidad.

SODICO. Del lat. sodium; denota un elevado contenido en sodio de cambio.

ESTAGNICO. Del lat. stagnare, inundar; indica encharcamiento superficial.

TERRICO. Del lat. terra, tierra; relativo a materiales orgánicos bien descompuestos y humificados.

TIONICO. Del gr. theion, azufre; denota la presencia de materiales sulfurosos.

UMBRICO. Del lat. umbra, sombra, indica la presencia de un horizonte A úmbrico.

URBICO. Del lat. urbs, ciudad; relativo al vertido de basuras.

VERTICO. Del lat. vertere, invertir; se relaciona con el movimiento de la superficie del suelo y con algunas de las propiedades físicas de los vertisoles.

VITRICO. Del lat. vitrum, vidrio; se aplica a suelos ricos en material vitrificado.

XANTICO. Del gr. xanthos, amarillo; relativo a suelos de color amarillo.

ANEXO 3

CALCULO DE ELEMENTOS CLIMATICOS

Cálculo de los elementos climáticos para la **Estación Tres Cruces**

Concepto	Enero	Feb.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anual	media
T (°C)	7,40	8,90	10,80	11,40	12,30	11,30	10,10	10,30	10,10	10,00	8,60	7,90		9,93
P (cm)	2,37	0,84	0,14	4,08	8,86	30,98	37,84	39,28	31,58	13,10	1,06	1,13	171,26	14,27
i	1,85	2,39	3,21	3,48	3,91	3,44	2,90	2,99	2,90	2,86	2,27	2,00	34,20	5,55
EP´ (cm)	3,63	4,34	5,31	5,60	6,08	5,55	4,94	5,04	4,94	4,90	4,18	3,82	58,33	4,86
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,11	1,14	1,11	1,02	1,00	0,93	0,94	12,31	1,03
EP (cm)	3,45	3,91	5,47	5,88	6,87	6,16	5,63	5,59	5,04	4,90	3,89	3,59	60,38	5,03
MHS (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	8,01	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,83	-7,17	0,03	0,00
HA (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	1,99	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	7,17	0,00	59,16	4,93
s (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,81	32,21	33,69	26,54	8,20	0,00	0,00	117,44	9,79
d (cm)	1,08	3,07	5,33	1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,46	13,73	1,14
EPR (cm)	3,45	3,91	5,47	5,88	10,85	38,99	37,84	39,28	31,58	13,10	3,89	3,59	197,82	16,49
E (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,10	24,89	25,72	16,96	0,00	83,68	6,97
RP	-0,31	-0,78	-0,97	-0,31	0,29	4,03	5,72	6,02	5,27	1,67	-0,73	-0,69	19,21	1,60

Estación Tres Cruces
Latitud 19°03'
Longitud 99°14' Altitud 2810 msnm

Cálculo de los elementos climáticos para la **Estación Cuernavaca**

Concepto	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anuales	medias
T (°C)	18,80	19,80	21,80	23,20	23,20	21,70	20,70	20,80	20,20	20,10	19,50	18,70	248,50	20,71
P (cm)	1,34	0,38	0,59	1,62	5,77	23,55	23,60	23,68	22,66	9,35	1,74	0,38	114,66	9,56
i	7,43	8,03	9,29	10,21	10,21	9,23	8,69	8,66	8,28	8,22	7,85	7,37	103,47	16,63
EP' (cm)	6,25	7,02	8,71	10,02	10,02	8,63	7,76	7,84	7,34	7,26	6,78	6,17	93,80	7,82
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,10	1,14	1,10	1,02	1,00	0,93	0,94	12,29	1,02
EP (cm)	5,94	6,32	8,97	10,52	11,32	9,49	8,85	8,62	7,49	7,26	6,31	5,80	96,89	8,07
MHS (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,57	-5,43	0,00	0,00
HA (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	5,43	0,00	55,43	4,62
s (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,06	14,75	15,06	15,17	2,09	0,00	0,00	51,13	4,26
d (cm)	4,60	5,94	8,38	8,90	5,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,42	38,79	3,23
EPR (cm)	1,34	0,38	0,59	1,62	5,77	9,49	8,85	8,62	7,49	7,26	6,31	0,38	58,10	4,84
E (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,03	8,39	11,78	6,94	3,47	0,00	32,61	2,72
RP	-0,77	-0,94	-0,93	-0,84	-0,49	1,48	1,67	1,75	2,03	0,28	-0,72	-0,93	1,59	0,13

Estación Cuernavaca
Latitud 18°55'
Longitud 99°44'
Altitud 1529 msnm
Periodo de observación 32 años

Cálculo de los elementos climáticos de la **Estación Temixco**

Concepto	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Nov	Dic	anuales	medias
T (°C)	20,50	21,80	24,10	25,70	26,00	24,50	23,30	23,10	22,60	22,40	21,40	20,50	275,90	22,99
P (cm)	1,35	0,15	0,55	0,97	5,73	19,57	16,64	17,88	18,02	7,89	1,89	0,43	91,07	7,59
i	8,47	9,29	10,82	11,92	12,13	11,09	10,28	10,15	9,82	9,68	9,04	8,47	121,16	19,49
EP' (cm)	6,79	8,02	10,51	11,23	12,90	10,99	9,59	9,37	8,83	8,63	7,62	6,79	111,27	9,27
F	0,95	0,90	1,03	1,05	1,13	1,10	1,14	1,10	1,02	1,00	0,93	0,94	12,29	1,02
EP (cm)	6,45	7,22	10,83	11,79	14,58	12,09	10,93	10,31	9,01	8,63	7,09	6,38	115,31	9,61
MHS (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,48	2,52	0,00	0,00	-0,74	-5,2	-4,06	0,00	0,00
HA (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,48	10,00	10,00	10,00	9,26	4,06	0,00	50,80	4,23
s (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,19	7,57	9,01	0,00	0,00	0	19,77	1,65
d (cm)	5,10	7,07	10,28	10,82	8,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,12	3,51
EPR (cm)	1,34	0,15	0,55	0,97	5,73	12,09	10,93	10,31	9,01	8,63	7,09	0,43	67,23	5,60
E (cm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	4,59	6,80	3,40	0,00	0,95	17,34	1,45
RP	-0,79	-0,98	-0,95	-0,92	-0,61	0,62	0,52	0,73	1,00	-0,09	-0,73	-0,93	-3,13	-0,26

Estación Temixco
Latitud 18°51',
Longitud 99°14',
Altitud 1280 msnm
Periodo de observación 24 años

ANEXO 4: IDENTIFICACION DE ROCAS

La identificación de las principales rocas a través de sus características macroscópicas se presenta en la siguiente clave (según Pape, 1971, simplificado):

	Características macroscópicas	Continuar en el No	Tipo de roca
1	a. Granular grueso, tamaño dominante > 1mm, matriz fina faltante o solo presente en el espacio poroso.	2	
	b. Granular fino, sólo tamaños < 1mm, compactación media, rompe en superficies accidentales, con el cuchillo puede destruirse la unión de los granos	15	
	c. Uniformemente compacto o vítreo, rompe en astillas o concoidalmente, a veces poroso, los poros pueden estar vacíos o rellenos de sustancia mineral de colores claros.	8	
	d. Porfírico (gran porcentaje de masa basal fina con incrustaciones gruesas que generalmente no tienen contacto unas con otras. Las incrustaciones generalmente son cristales individuales, a veces idiomorfos)	11	
2	a. Totalmente cristalina, compacta, cristales de tamaños muy similares, sin componentes de origen orgánico	3	
	b. Consiste de granos y componentes gruesos, presenta rasgos de tensión mecánica o actividad de organismos, generalmente estratificada.	14	
3	a. Consiste de una sola clase de minerales.	6	
	b. Se distinguen varios tipos de componentes principales.	4	
4	a. El ordenamiento de los componentes granulares no presenta dirección	5	
	b. El ordenamiento de los componentes es en bandas con tendencia claramente paralela	12	
5	a. Claro, obviamente cuarzo, componentes principales: cuarzo, feldespato potásico: componentes secundarios: biotita, muscovita.		Granito
	b. Oscuro, sin cuarzo, componentes principales: plagioclasa; componentes secundarios: olivino, augita, hornblenda		Gabro
6	a. Puede rallarse con la uña.		Yeso
	b. No puede rallarse con un cuchillo, o resulta difícil.		Cuarcita
	c. Puede rasguñarse con un cuchillo, pero no con la uña.	7	
7	a. Se reconocen claramente minerales individuales efervesce fuertemente con HCI 10%		Mármol
	b. No se reconocen minerales individuales, efervesce fuertemente con HCI 10%		Caliza

	Características macroscópicas	Continuar en el No.	Tipo de roca
	c. Minerales individuales reconocibles, el polvo solo efervesce débilmente con HCI		Dolomita
8	a. Muy porosa, color claro y ligera.		Pómez
	b. Poco porosa o sin poros.	9	
9	a. Puede rallarse con el cuchillo	7	
	b. No o casi no es posible rallar con el cuchillo.	10	
10	a. Color gris a negro, similar a concreciones, su superficie es globosa.		Pedernal
	b. Color negro a rojo oscuro, brillo vítreo, rompe en lajas.		Obsidiana
	c. Muy oscura y compacta, vértices no translucentes, a veces presenta burbujas.		Basalto
11	a. Masa basal muy obscura, inclusiones de olivino o augita.		Basalto
	b. Masa basal clara, generalmente un poco rojiza; inclusiones predominantemente de cuarzo.		Granodiorita
12	a. Pizarroso, generalmente de grano fino, en parte exfoliable.	13	
	b. Pizarroso, compacto, granular, no exfoliable, componentes principales: cuarzo, feldespato, micas		Gneis
13	a. Alto contenido de micas macroscópicas.		Micacita
	b. Brillo acerado, textura grasosa.		Filita
	c. No tiene minerales visibles, brillo opaco.		Pizarra arcillosa
14	a. Muchos componentes gruesos, angulares y redondeados, minerales idiomorfos, magmáticos reconocibles.		Toba volcánica
	b. Muchos componentes gruesos (mm-cm) redondeados		Conglomerado
	c. Muchos componentes gruesos angulares (mm-cm).		Brecha
	d. Tamaños de partículas muy diversos, los componentes finos son margas (15e), los componentes gruesos son fragmentos de roca (líticos).		Margas glaciares
	e. Tamaños de partículas muy diversos, los componentes finos son limos, los componentes gruesos son fragmentos de roca (líticos).		Limonita glaciar
	f. Componentes casi exclusivamente < 2 mm.	15	
15	a. Granos de diámetro predominantemente de 1 mm		Arenisca gruesa

b. Granos de diámetro predominantemente de 0.1 mm.	Arenisca fina
c. Granos predominantemente de diámetro < 0.1 mm. granos individuales perceptibles	Limonita
d. Generalmente contiene carbonatos.	Loess
e. Granos individuales no perceptibles, diámetro < 0.1 mm.	Lutita
f. Granos de tamaño < 0.1 mm, granos individuales no perceptibles, contiene carbonatos.	Marga

ANEXO 5

CLAVE PARA LA DESCRIPCION DEL PERFIL

1. **Horizonte o capa**. Se determina con base a la definición de Horizontes, según el Sistema ABC (Subcapítulo 2.2, "Perfil Morfológico del Suelo").

2. **Profundidad**. Se refiere al espesor de cada horizonte o capa presente, el cual se expresa en cm. La profundidad efectiva se refiere a la suma de los espesores de todos los horizontes A, B y C.

3. **Separación**. Este término se utiliza para dar las características que se presentan en el límite entre los horizontes y/o capas: El límite puede ser:

A.**Forma**	B.**Contraste**
1. Plano	1. Abrupto
2. Ondulado	2. Claro
3. Irregular	3. Gradual
4. Quebrado	4. Difuso

4. **Color**. Se determina mediante las Tablas Munsell (Anexo---)

5. **Textura**. Se determina al Tacto y se utiliza la siguiente Tabla para su Identificación:

No.	Características	Seguir en No.	Tipo de textura	Clave
1	Intentar formar con la muestra un "rollito" del grosor de un lápiz:			
	a.moldeable:	4		
	b .no moldeable	2		
2	Palpar la consistencia con los dedos índice y pulgar:			
	a .adhesiva, si se adhiere a los dedos;		Franco arenosa	Ca
	b.no adhesiva, no moldeable	3		
3	Frotar la muestra con las palmas de las manos:			
	a.consistencia muy harinosa y se perciben granos de arena;		Limosa	L
	b.consistencia muy harinosa y se perciben granos de arena (<50% arena);		Franco limosa gruesa	Clg
	c. muy arenosa (50-85% arena), queda material fino en las líneas de la palma;		arenosa	Cla
	d. muy arenosa (>85% arena), no queda material fino en las líneas de la palma		arenosa	A
4	Intentar moldear un rollo del grosor de una aguja gruesa para tejer:	5		
	a. moldeable, superficie opaca, consistencia harinosa:			
	b. moldeable, consistencia plástica, pegajosa;	6		
	c. no moldeable, se adhiere al dedo, se perciben granos de arena (>46% de arena).		Franco arcillo arenosa	Cra
5	Evaluar la consistencia:			
	a. adhesiva, harinosa, se agrieta fácilmente al presionar;		Franco limosa Fina	Clf
	b.ligeramente harinosa, casi no se agrieta, muy moldeable;		Franco arcillo limosa	Clr
	c. granos de arena visibles y perceptibles, se agrieta al presionar		Franca	C
6	Evaluar la superficie de la muestra después de friccionarla con la uña:			
	a. superficie opaca o con brillo tenue, casi no se perciben granos de arena;		Franco arcillosa	CR
	b. superficie opaca a ligeramente brillosa, granos de arena perceptibles		A rcilla	R
	c. superficie brillosa	7		
7.	Evaluar la consistencia entre los dientes:			
	a. rechina;		Arcillo limosa	Rl
	b. consistencia de mantequilla		Arcillosa	R

(Schlichting y Blume, 1956, modificado)

6. **Estructura**. Es un término que se refiere a la agregación de las partículas primarias de un suelo (arena-limo y arcilla) en partículas compuestas. La estructura es muy importante porque influye determinantemente en el balance hídrico y térmico, al igual que en la aireación del suelo e, indirectamente, en la actividad biológica, el potencial de rendimiento y la erosionabilidad.

En la Figura adjunta se esquematizan y describen los tipos de estructura.

A. FORMA DE LA ESTRUCTURA

En este caso, a las estructuras les corresponden los siguientes números:

1. Migajón; 2. Granular; 3. Bloques subangulares; 4. Bloques angulares; 5. Prismática; 6 Columnar y 7. Laminar.

B. TAMAÑO DE LA ESTRUCTURA

Clave	Clase	Laminar	Prismática	Columnar	Angular en bloques	Subangular en bloques	Granular	Migajón
				[mm]				
1.	muy fina	<1	<10	<10	<5	<5	<1	<1
2.	fina	1-2	10-20	10-20	5-10	5-10	1-2	1-2
3.	media	2-5	20-50	20-50	10-20	10-20	2-5	2-5
4.	gruesa	5-10	50-100	50-100	20-50	20-50	5-10	5-10
5.	muy gruesa	>10	>100	>100	>50	>50	>10	>10

C. DESARROLLO DE LA ESTRUCTURA

Los términos usados para definir el grado del desarrollo de la estructura son los siguientes:

(0) **sin agregación**: no se observa agregación u ordenamiento alguno; se dice masiva, cuando es coherente, y de grano simple, cuando no es coherente.

(1) **débil**: peds vagamente formados, difíciles de distinguir; cuando se disturba este material, se obtiene una mezcla de peds enteros con mucho material no agregado. Este grado puede subdividirse en muy débil y moderadamente débil.

(2) **moderado**: peds bien formados y nítidos pero moderadamente durables; cuando se disturba este material, se obtienen numerosos peds enteros, algunos quebrados y poco material no agregado.

(3) **fuerte**: peds bien formados y durables; cuando se disturba este material se obtienen, principalmente, peds enteros, pocos quebrados y ningún material no agregado; este grado puede subdividirse en moderadamente fuerte y muy fuerte.

7. **Consistencia**. Se refiere a la dureza y estabilidad de un agregado de suelo, al someterlo a la presión que se genera entre el dedo índice y el pulgar. Esta prueba se determina en seco y en húmedo:

A. Seco

1. Suelta
2. Blanda
3. Dura
4. Muy dura

B. Húmedo

1. Suelta
2. Friable
3. Firme
4. Muy firme

8 y 9. **Adhesividad y Plasticidad**. El primer término se refiere al grado de adherencia del suelo al ser colocado, en húmedo, entre el dedo pulgar y el índice. El segundo término indentifica la capacidad que muestra un suelo para ser moldeado. Por ejemplo: un suelo arcilloso, generalmente es adhesivo y plástico, en tanto que, un suelo arenoso carece de ambas propiedades. Según el grado de adhesividad y plasticidad se usa la siguiente clave:
1. Nula; 2. Ligera; 3. Moderada y 4. Fuerte
10. **Poros**. Son de importancia para el drenaje interno y aireación del suelo. Debe describirse su abundancia, tamaño dominante y forma, para lo cual se utiliza una lupa.

A. Abundancia	**B. Tamaño**	**C. Forma**
1. Pocos: 1 a 50 por dm^2	1. Micro: <0.075 mm	1. Vesicular
2. Comunes: 51 a 200 por dm^2	2. Muy finos: 0.075 a 1 mm	2. Irregular
3. Abundantes: >200 por dm^2	3. Finos 1 a 2 mm	3. Tubular
	4. Medianos: 2 a 5 mm	
	5. Gruesos: > 5mm	

11. **Películas**. También llamados "revestimientos" o "cutanes". Se refiere a una cubierta delgada, producto de la alteración que, al ser eluviada, recubre a las gravas y agregados del suelo. Esta película puede estar constituída por arcillas, sílice y/o materia orgánica y/o carbonatos y/o hierro, entre otros. Para este caso, basta con indicar si están presentes (1) ó ausentes (2).

12. **Facetas**. Son superficies pequeñas, lisas y brillantes que, eventualmente, se presentan en algunas caras de los agregados del suelo. Son importantes porque indican la presencia de arcillas expansivas, principalmente montmorillonita.

Estas facetas se forman por la presión o fricción que ejercen las arcillas al hidratarse. En este caso, basta con denotar su presencia (1) o indicar su ausencia (2).

13. **Gravas** - Piedras. En edafología se denomina "grava" a las partículas minerales que muestran un diámetro > de 2mm hasta 7.5 cm, los guijarros están determinados por un diámetro >7.5 pero no mayor a 25 cm, y las piedras muestran un diámetro mayor de 25 cm. Su clave se establece de la siguiente manera:

A. Tamaño	**B. Forma**	**C. Cantidad**
G = Grava	1. Redondeadas	1. Muy escasas: <5% por Vol.
R = Guijarro	2. Subredondeadas	2. Escasas: 5 a 15% por Vol.
P = Piedra	3. Angulares	3. Frecuentes: 15 a 40% por Vol.
	4. Subangulares	4. Abundantes: 40 a 80% por Vol.
		5. Dominantes: >80% por Vol.

14. **Grietas** o fisuras. Ambas, cuando se presentan en un suelo, son indicativas de la presencia de arcillas expansibles. En este caso, interesa determinar su construcción y profundidad.

A. Constitución

1. Finamente fisurado: ancho <3 mm.
2. Fisurado: ancho 3 a 10 mm
3. Agrietado: ancho > 10 mm.

B. Profundidad

Se anota la profundidad donde se localizan las grietas o fisuras

15. **Concreciones**. Son acumulaciones de materiales varios que pueden ser similares al suelo o compuestos químicos casi puros. Estos cuerpos pueden ser removidos del suelo y quedar intactos. En este caso resulta necesario determinar su tamaño y cantidad y, de ser posible, establecer en el inciso de "OBSERVACIONES" su naturaleza química

A.Tamaño

1. Muy fino: <0.2 cm
2. Fino: 0.2 a 0.5 cm
3. Medio: 0.5 a 1 cm
4. Grueso: 1 a 2 cm
5. Muy grueso: >2 cm

B. Cantidad

1. Muy escasas: <5% por Vol.
2. Escasas: 5-15% por Vol.
3. Frecuentes: 15 a 40% por Vol.
4. Abundantes: 40 a 80% por Vol.
5. Dominantes: >80% por Vol.

16. **Manchas.** Son motas de diferentes colores y tamaño que se observan en el perfil y que, generalmente, son el producto de un drenaje impedido. En este caso, es necesario además de indicar el color de la mancha, su cantidad y tamaño.

A. Cantidad

1. Escasa <2 %
2. Frecuente 2 a 20 %
3. Abundante >20 %

B. Tamaño

1. Pequeñas <5 mm
2. Medianas 5 a 15 mm
3. Grandes > 15 mm

17. **Inclusiones**. Se refiere a cualquier cuerpo sólido ajeno al suelo, por ejemplo vidrio, plástico, acero, carbón, etc.

18. **Raíces**. Basta estimar su grosor y densidad.

A. Grosor

1. Finas: 1 a 2 mm
2. Medias: 2 a 5 mm
3. Gruesas: > 5 mm

B. Cantidad

1. Escasas: 1 a 20 en 10 dm^2
2. Frecuentes: 20 a 100 en 10 dm^2
3. Abundantes: > 100 en 10 dm^2

19. **Superficie**. Se anota cualquier particularidad, significativa, que se presente en ella. Por ejemplo: hojarasca, gavilla, costras etc.

20. **Drenaje interno**. Con base en lo establecido en el capítulo 9 de esta Guía, identificar los siguientes tipos de drenaje del suelo para cada capa u horizonte: (0) muy escasamente

drenado; (1) Escasamente drenado; (2) Imperfectamente drenado (3) Moderadamente drenado; (4) Drenado; (5) Muy drenado y (6) Excesivamente drenado.

- **OBSERVACIONES**

En este inciso se anota cualquier característica importante del suelo, que no esté incluída en la descripción codificada de los 20 puntos antes señalados, como por ejemplo: capas cementadas ó compactadas, presencia de cristales minerales, nódulos, etc.