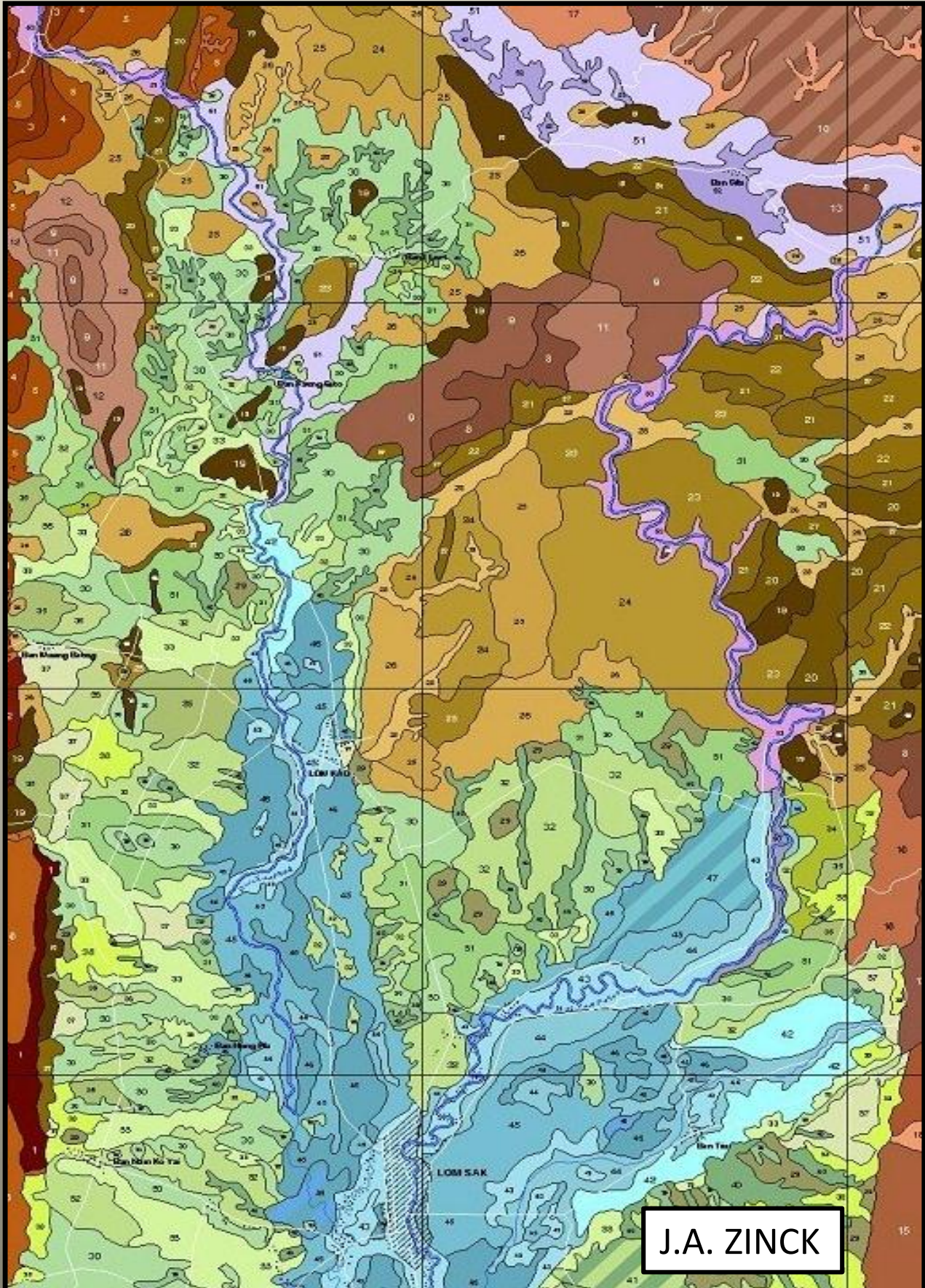


GEOPEDOLOGIA



GEOPEDOLOGIA

Elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales

J. Alfred Zinck

Portada

Mapa geopedológico del área de Pasak-Lomsak en el norte de Tailandia, mostrando la confluencia de dos valles aluviales con sus depósitos longitudinales (azul) y depósitos laterales (verde) y sus respectivas cuencas altas (tonalidades de marrón) (Hansakdi, 1998).

ITC Special Lecture Notes Series

ISBN: 90 6164 339 2

©

ITC

Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation

Enschede, The Netherlands

November, 2012

This document may be copied under the conditions that copyright and source indications are also copied, no modifications are made, and the document is copied entirely.
Academic standards apply for citing and referencing sources.

PREFACIO

El presente texto se elaboró en base a apuntes utilizados en un curso sobre geopedología dictado por el autor en varias oportunidades entre 1970 y 2004 en diversos países de Latinoamérica, principalmente en Venezuela y Colombia. En Venezuela, la materia de geopedología era el componente esencial de un taller organizado periódicamente para entrenar el personal del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y, posteriormente, del Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables (MARNR) encargados de realizar los levantamientos de suelos. La materia de geopedología se dictó también como parte de un curso de postgrado sobre Ecología de Paisajes organizado en repetidas veces por la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela (UCV). En Colombia, talleres similares se han realizado en varias oportunidades en el marco de un convenio de cooperación entre el ITC y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). En el ITC, la materia de geopedología, bajo la denominación de *Physiography and Soils*, se dictó como parte de un curso de postgrado anual sobre levantamiento de suelos en el período de 1986-2004.

Después de un largo período de recesión y casi olvido, el tema del suelo como recurso de usos múltiples, base de soporte a diversas formas de vida, y prestador de servicios ambientales, ha vuelto, aunque tímidamente, a figurar en las agendas políticas nacionales e internacionales. Esta es una de las razones que motivaron formalizar el presente texto. En un tiempo en que se pone énfasis en el levantamiento digital de los suelos, la geopedología propone un enfoque paisajístico integrando geoforma y suelo, el cual puede resultar ventajosamente complementario con el enfoque digital y contribuir a mejorar la base conceptual de este último.

El presente texto es la primera parte de un conjunto que posteriormente propondrá una serie de estudios de caso, en los cuales se aplicó el enfoque geopedológico para levantamiento de suelos y análisis de riesgos naturales. Se agradecen comentarios y observaciones críticas para mejorar esta primera versión (zincka@itc.nl).

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
RELACIONES ENTRE GEOMORFOLOGIA Y PEDOLOGIA: UNA BREVE RESENA	3
2.1 Introducción	3
2.2 Definiciones y enfoques	3
2.2.1 Corriente académica	4
2.2.2 Corriente aplicada	5
2.3 Naturaleza de las relaciones y áreas de convergencia	8
2.3.1 Evolución de las relaciones	8
2.3.2 Contribuciones mutuas	9
2.3.3 Tendencia hacia mayor integración	11
2.4 Conclusión	13
EL ENFOQUE GEOPEDOLOGICO	14
3.1 Introducción: definición, origen, desarrollo	14
3.2 Relaciones conceptuales	17
3.2.1 Factores de formación comunes	17
3.2.2 El paisaje geopedológico	18
3.3 Relaciones metodológicas	21
3.3.1 Integración geopedológica: un modelo estructural	22
3.3.2 Integración geopedológica: geografía, génesis y estratigrafía de suelos	24
3.3.2.1 Geografía de suelos	24
3.3.2.2 Génesis y estratigrafía de suelos	27
3.3.3 Integración geopedológica: un ensayo de validación numérica	28
3.3.3.1 Materiales y método	28
3.3.3.2 Resultados	28
3.3.3.3 Conclusión	29
3.4 Relaciones operacionales	30
3.4.1 Introducción	30
3.4.2 La estructura del levantamiento de suelos	31
3.4.3 El funcionamiento del levantamiento de suelos	32
3.4.4 La contribución de la geomorfología al levantamiento de suelos	32
3.5 Conclusión	33
EL PAISAJE PEDOLOGICO: ORGANIZACION DEL MATERIAL SUELO	38
4.1 Introducción	38
4.2 Nano-nivel	39
4.2.1 Reacciones químicas	39
4.2.2 Reacciones mecánicas	40
4.2.2.1 Tipos de empilamiento	40
4.2.2.2 Tipos de fábrica	40
4.2.3 Reacciones físico-químicas	42
4.2.4 Relación con geopedología	42
4.3 Micro-nivel	42
4.3.1 La observación micromorfológica	43
4.3.2 Los componentes micromorfológicos	43

4.3.2.1 Granos de esqueleto	43
4.3.2.2 Plasma	43
4.3.2.3 Poros	43
4.3.2.4 Rasgos pedológicos	44
4.3.3 Relación con geopedología	45
4.4 Meso-nivel	45
4.4.1 Definición y designación de horizontes	46
4.4.1.1 Divisiones primarias: los horizontes maestros	46
4.4.1.2 Divisiones secundarias: aspectos genéticos específicos	46
4.4.1.3 Divisiones terciarias	47
4.4.2 Relación con geopedología	47
4.5 Macro-nivel	48
4.5.1 Definición	48
4.5.2 Conceptos relacionados	48
4.5.3 Relación con geopedología	48
4.6 Mega-nivel	50
4.6.1 Definición	50
4.6.2 Relación con geopedología	50
4.7 Conclusión	50
EL PAISAJE GEOMORFOLOGICO: CRITERIOS PARA CLASIFICAR LAS GEOFORMAS	51
5.1 Introducción	51
5.2 Ejemplos de clasificación geomorfológica	52
5.2.1 Clasificación por orden de magnitud	52
5.2.2 Clasificación genética y genético-corológica	53
5.2.3 Clasificación morfométrica	54
5.2.4 Clasificación etnogeomorfológica	55
5.3 Bases para un sistema de clasificación taxonómica de las geoformas	57
5.3.1 Premisas	57
5.3.2 Antecedentes	58
5.3.3 En búsqueda de estructura: un ejemplo inductivo	59
5.4 Estructura y elementos para construir un sistema taxonómico de las geoformas	60
5.4.1 Estructura	60
5.4.2 Elementos	61
5.4.2.1 Categoría	61
5.4.2.2 Clase	61
5.4.2.3 Taxón	62
5.4.2.4 Atributo	62
5.5 Niveles de percepción y ensayo de estructuración de un espacio geomorfológico	63
5.6 Estructura de un sistema taxonómico de las geoformas	66
EL PAISAJE GEOMORFOLOGICO: CLASIFICACION DE LAS GEOFORMAS	68
6.1 Introducción	68
6.2 La taxonomía: categorías y principales clases de geotaxa	68
6.2.1 Geoestructura	69
6.2.2 Ambiente morfogenético	69
6.2.3 Paisaje geomorfológico	69
6.2.3.1 Definición	69
6.2.3.2 Taxa	70
6.2.4 Relieve/modelado	72

6.2.4.1 Definición	72
6.2.4.2 Taxa	73
6.2.5 Litología/facies	73
6.2.5.1 Definición	73
6.2.5.2 Taxa	74
6.2.6 Forma de terreno	76
6.2.6.1 Definición	76
6.2.6.2 Taxa	76
6.3 Clasificación de las geoformas a los niveles inferiores	76
6.3.1 Introducción	76
6.3.2 Geoformas mayormente controladas por la estructura geológica	78
6.3.2.1 Geoformas estructurales propiamente dichas	78
6.3.2.2 Geoformas volcánicas	78
6.3.2.3 Geoformas cársticas	78
6.3.3 Geoformas mayormente controladas por los agentes morfogenéticos	81
6.3.3.1 Geoformas nivales, glaciares y periglaciares	81
6.3.3.2 Geoformas eólicas	83
6.3.3.3 Geoformas aluviales y coluviales	83
6.3.3.4 Geoformas lacustres	84
6.3.3.5 Geoformas de gravedad y movimiento en masa	84
6.3.3.6 Geoformas costeras	84
6.3.4 Geoformas “banales”	86
6.3.4.1 Características generales	86
6.3.4.2 Clases de geoformas banales	86
EL PAISAJE GEOMORFOLOGICO: ATRIBUTOS DE LAS GEOFORMAS	89
7.1 Introducción	89
7.2 Atributos morfográficos: la geometría de las geoformas	89
7.2.1 Topografía	90
7.2.2 Planimetría	91
7.2.2.1 Configuración de las geoformas	91
7.2.2.2 Diseño de los contornos de las geoformas	92
7.2.2.3 Patrón de drenaje	94
7.2.2.4 Unidades vecinas y condiciones circundantes	94
7.2.3 Morfografía y ecología de paisajes	94
7.3 Atributos morfométricos: la dimensión de las geoformas	97
7.3.1 Altura relativa	97
7.3.2 Densidad de drenaje	97
7.3.3 Pendiente del relieve	98
7.3.4 Contribución de la morfometría digital	99
7.4 Atributos morfogenéticos: la dinámica de las geoformas	99
7.4.1 Granulometría	99
7.4.1.1 Importancia	99
7.4.1.2 La información	100
7.4.1.3 Ejemplos de inferencia e interpretación	100
7.4.2 Estructura	103
7.4.2.1 Estructura geogenética	103
7.4.2.2 Estructura pedogenética	104
7.4.3 Consistencia	104
7.4.4 Mineralogía	105

7.4.5 Morfoscopía	107
7.5 Atributos morfocronológicos: la historia de las geoformas	107
7.5.1 Esquema de referencia para la geocronología del Cuaternario	107
7.5.2 Técnicas de fechado (absoluto)	108
7.5.3 Geocronología relativa: la contribución de la pedostratigrafía	110
7.5.3.1 Definición	110
7.5.3.2 Criterios	110
7.6 Importancia relativa de los atributos geomorfológicos	112
7.6.1 Clases de atributos	112
7.6.1.1 Atributos diferenciadores	112
7.6.1.2 Atributos accesorios	113
7.6.1.3 Atributos accidentales	113
7.6.2 Pesos de los atributos	113
7.6.2.1 Atributos morfográficos	113
7.6.2.2 Atributos morfométricos	114
7.6.2.3 Atributos morfogenéticos	114
7.6.2.4 Atributos morfocronológicos	114
7.6.3 Jerarquización de los atributos	114
7.6.3.1 Niveles superiores	114
7.6.3.2 Niveles inferiores	115
CONCLUSION	117
REFERENCIAS	118
SELECCION DE FOTOS (<i>en apéndice</i>)	

Capítulo 1

INTRODUCCION

La *geopedología*, tal como se considera aquí, se refiere a las relaciones entre geomorfología y pedología, con énfasis en la contribución de la primera a la segunda. Más específicamente, geopedología es en primera instancia un enfoque metodológico para y al servicio del inventario de suelos, a la vez que provee un marco para el análisis de los patrones de distribución geográfica de los suelos. El prefijo *geo* en geopedología se refiere a la superficie de la tierra - la *geoderma* - y como tal abarca, además de la geomorfología, nociones de geología y geografía. La geología interviene a través de la influencia de la tectónica en las geoformas de origen estructural y a través de la influencia de la litología en la producción de material parental para los suelos a consecuencia de la meteorización de las rocas. La geografía se refiere al análisis de la distribución espacial de los suelos de acuerdo a los factores de formación. Sin embargo, en el concepto de geopedología, el énfasis es en la geomorfología como factor estructurante mayor del paisaje pedológico y, en este sentido, el vocablo de geopedología es una contracción conveniente de geomorfopedología. La geomorfología cubre una amplia parte del marco físico de formación de los suelos a través del relieve, la morfodinámica de superficie, el contexto morfoclimático, los materiales no-consolidados o alterados que sirven de material parental a los suelos, y el factor tiempo.

Las relaciones entre geomorfología y pedología pueden inscribirse en el contexto de la ecología de paisajes. Con su enfoque de integración, la ecología de paisajes intenta trascender los clivajes entre disciplinas conexas, tanto físicas como humanas, que suministran percepciones y visiones complementarias de la estructura y dinámica de los paisajes naturales y/o antropizados. La ecología de paisajes como disciplina de integración tiene vocación holística, pero de facto se presenta frecuentemente como partes de un todo. Así es que hay, por ejemplo, una vertiente que pone énfasis en el concepto de ecosistema como base del paisaje biótico/ecológico (Forman & Godron, 1986), otra que lo pone en el concepto de tierra/tierras como base del paisaje cultural (Zonneveld, 1979; Naveh & Lieberman, 1984), y otra que lo pone en el concepto de geosistema como base del paisaje geográfico (Bertrand, 1968; Haase & Richter, 1983; Rougerie & Beroutchachvili, 1991). La geomorfología y la pedología participan en este concierto, y sus respectivos objetos de estudio, geoforma y suelo, constituyen un binomio fundamental, inseparable, de los paisajes.

Las geoformas o formas de terreno *sensu lato* son el objeto de estudio de la geomorfología. Los suelos son el objeto de estudio de la pedología, una rama de la ciencia del suelo. Las relaciones entre ambos objetos y entre ambas disciplinas son estrechas y mutuas. Geoformas y suelos son los componentes esenciales de la epidermis de la tierra (Tricart, 1972), donde comparten la interfase entre litosfera, hidrosfera, biosfera y atmósfera, en el marco de la noosfera por ser los suelos recursos sobre los cuales los seres humanos hacen decisiones de uso. No se trata de una mera yuxtaposición estática; entre los dos objetos hay relaciones dinámicas, uno influenciando el comportamiento del otro, con retroacciones. Es más, en la naturaleza, resulta a veces difícil separar categóricamente el dominio de un objeto del dominio del otro, porque los límites entre ambos son difusos; geoformas y suelos se interpenetran simbióticamente. Esta integración de

objetos que coexisten y coevolucionan en la misma película superficial de la tierra ha fomentado el estudio de las relaciones entre ambos. Como es frecuente, la interfase entre disciplinas es un área-frontera donde brotan nuevas ideas, conceptos, y enfoques.

El análisis de las relaciones e interacciones entre geoformas y suelos y la aplicación práctica de estas relaciones en cartografía de suelos y en estudios de riesgos naturales han recibido varias denominaciones tales como pedogeomorfología, morfopedología y geopedología, entre otras, denotando la transdisciplinaridad de los enfoques. Por la posición de los términos en el vocablo de contracción, algunos autores quieren señalar que ponen más énfasis en un objeto que en el otro. Por ejemplo, Pouquet (1966) quien ha sido posiblemente uno de los primeros en utilizar el vocablo de geopedología, pone énfasis en el componente pedológico e implementa la geopedología como un enfoque para el levantamiento de suelos y para los estudios de erosión y conservación de suelos. En contraste, Tricart (1962, 1965a, 1994) quien ha sido posiblemente uno de los primeros en utilizar el vocablo de pedogeomorfología, pone el acento en el componente geomorfológico.

Para ilustrar la variedad de modalidades implementadas para abordar las relaciones entre geomorfología y pedología, se presenta una breve reseña en el Capítulo 2. El contexto aplicado en que se desarrolló la geopedología es diferente de otras maneras de visualizar las relaciones entre ambas disciplinas; esta especificidad de la geopedología se describe en el Capítulo 3. El enfoque geopedológico se centra en el inventario del recurso suelo. Esto significa lógicamente desarrollar temas como la caracterización, formación, clasificación, cartografía, y evaluación de suelos. En el Capítulo 4, se sintetizan aspectos relevantes de estos temas con énfasis en la estructura jerárquica del material suelo, lo que permite realzar que la geomorfología interviene a diversos niveles. La aplicación de la geomorfología en los programas de levantamiento de suelos a diversas escalas, desde detallada hasta gran visión, requiere establecer una taxonomía jerárquica de las geoformas, para que éstas puedan servir de marcos cartográficos en el mapeo de suelos y, adicionalmente, de marcos genéticos para interpretar la formación de suelos. Estos aspectos se tratan en el Capítulo 5 (criterios para clasificar las geoformas), en el Capítulo 6 (clasificación de las geoformas), y en el Capítulo 7 (atributos de las geoformas). Los Capítulos 4 a 7 actualizan un texto anterior escrito en inglés (Zinck, 1988).

Capítulo 2

RELACIONES ENTRE GEOMORFOLOGIA Y PEDOLOGIA: UNA BREVE RESEÑA

2.1 Introducción

Las relaciones entre geomorfología y pedología, incluyendo los aspectos conceptuales que sustentan estas relaciones y su implementación práctica en estudios e investigaciones, han sido designadas bajo diversas denominaciones. Algunas de las expresiones más comunes son *geomorfología pedológica* (soil geomorphology) (Daniels et al., 1971; Conacher & Dalrymple, 1977; McFadden & Knuepfer, 1990; Daniels & Hammer, 1992; Gerrard, 1992, 1993; Schaetzl & Anderson, 2005; entre otros), *suelos y geomorfología* (Birkeland, 1974; Richards et al., 1985; Jungerius, 1985a, 1985b; Birkeland, 1990, 1999), *pedología y geomorfología* (Tricart, 1962, 1965a, 1965b, 1972; Hall, 1983), *morfopedología* (Kilian, 1974; Tricart & Kilian, 1979; Tricart, 1994; Legros, 1996), *geopedología* (Pouquet, 1966), y *pedogeomorfología* (Conacher & Dalrymple, 1977; Elizalde & Jaimes, 1989), sin contar con las numerosas publicaciones que tratan del asunto pero no utilizan explícitamente uno de estos términos en su título. Debido a esta diversidad de expresiones, es conveniente definir primero lo que las relaciones entre geomorfología y pedología abarcan, y después analizar la naturaleza de las relaciones.

2.2 Definiciones y enfoques

Geomorfología pedológica o pedogeomorfología es la traducción literal de la expresión *soil geomorphology*, el término más frecuentemente encontrado en la literatura (a veces también llamado pedological geomorphology o pedogeomorphology), donde el vocablo *geomorphology* es un sustantivo y el vocablo *soil* es un adjetivo que califica al anterior. Según esta definición, el centro de interés es la geomorfología, con contribución de la pedología. Sin embargo, bajo el mismo título de *soil geomorphology*, hay trabajos de investigación en los cuales los papeles están invertidos. Por lo tanto, en la práctica, la relación entre geomorfología y pedología va en ambos sentidos. El énfasis que se le da a una u otra disciplina depende de una serie de factores incluyendo, entre otros, el contexto del estudio, el propósito de la investigación, y la disciplina primaria del investigador.

Las relaciones entre geomorfología y pedología como disciplinas científicas, y entre geoforma y suelo como objetos de estudio de estas disciplinas, pueden enfocarse desde dos puntos de vista de acuerdo al centro de interés y al peso que se le da a una u otra disciplina. En un caso, se pone énfasis en el estudio de las geoformas y se utiliza información de suelo para contribuir a resolver cuestiones de índole geomorfológica como, por ejemplo, caracterizar las geoformas o estimar la evolución del paisaje. Literalmente, este enfoque corresponde a la expresión de *soil geomorphology* o pedogeomorfología. En el otro caso, el interés se centra en el estudio de la formación, evolución, distribución, y cartografía de los suelos con la contribución de la geomorfología. Literalmente, este enfoque corresponde a la expresión de geomorfopedología o su contracción en geopedología. En la práctica, las diversas expresiones han sido utilizadas en forma intercambiable, lo que muestra que la separación entre los dos enfoques es difusa. En base a esta aparente dicotomía, dos corrientes, originalmente separadas, contribuyeron al desarrollo de

las relaciones entre geomorfología y pedología: (1) una corriente académica, orientada hacia la investigación de los procesos que tienen lugar en la interfase geomorfología-pedología, y (2) una corriente más práctica, aplicada a la cartografía de suelos. La primera floreció más en paisajes de vertiente, que ofrecen condiciones propicias para estudiar toposecuencias (catenas) y cronosecuencias, mientras que la segunda se desarrolló más en paisajes deposicionales, relativamente planos, que ofrecen condiciones más favorables para el uso de los suelos con fines agropecuarios o ingenieriles.

2.2.1 Corriente académica

La corriente académica consiste en investigaciones mayormente conducidas en universidades con propósitos científicos. Se basa en estudios detallados de sitios y transeptos para identificar rasgos de interdependencia entre geoformas y suelos sin paradigma pre-establecido. En general, lo que se busca es utilizar la geomorfología y la pedología para analizar, en forma concomitante, los procesos de formación y evolución de los suelos y de los paisajes. Esta corriente cubre en realidad una variedad de enfoques, como lo ilustran las definiciones dadas por diversos autores con respecto a su concepción de las relaciones entre geomorfología y pedología y el dominio de estudio que cubren estas relaciones. A continuación, se presentan algunas de estas definiciones de la geomorfología pedológica por orden cronológico.

- El análisis del balance entre geomorfogénesis y pedogénesis y de los términos de control de la primera sobre la segunda en la formación de los suelos (Tricart, 1965a, 1965b, 1994).
- El uso de las técnicas pedológicas en los estudios de geografía física y humana (Pouquet, 1966).
- El estudio del paisaje y de la influencia que los procesos actuando en el paisaje tienen en la formación de los suelos (Olson, 1989).
- El estudio de las relaciones genéticas entre suelos y paisajes (McFadden & Knuepfer, 1990).
- La evaluación de las relaciones genéticas entre suelos y formas de terreno (Gerrard, 1992).
- La aplicación de técnicas e nociones geológicas de campo en las investigaciones de suelos (Daniels & Hammer, 1992).
- El estudio de los suelos y de su uso con fines de evaluar la evolución, edad y estabilidad de las formas de terreno, los procesos de superficie del terreno, y climas pasados (Birkeland, 1999).
- El estudio científico del origen, de la distribución y evolución de los suelos, paisajes, y depósitos superficiales, y de los procesos que los crean y modifican (Wysocki et al., 2000).
- El estudio científico de los procesos de evolución del paisaje y de la influencia que estos procesos tienen en la formación y distribución de los suelos en el paisaje (Goudie, 2004).
- La ciencia que estudia las relaciones genéticas entre suelos y formas de terreno (Schaeztl & Anderson, 2005).
- Una subdisciplina de la ciencia del suelo que sintetiza el conocimiento y las técnicas de las dos disciplinas aliadas, la pedología y la geomorfología, y que pone en paralelo las relaciones genéticas entre materiales pedológicos y geoformas, y las relaciones entre procesos de formación de suelos y procesos de formación del terreno (Thwaites, 2007).
- El estudio que informa sobre la historia deposicional en una localidad, y también toma en cuenta los procesos de desarrollo postdeposicional en la interpretación de los procesos hidrológicos, químicos y ecológicos presentes y pasados en la misma localidad (Winter, 2007).

Esta corta reseña, que dista de ser exhaustiva, muestra la diversidad de conceptos y concepciones que encubre la expresión geomorfología pedológica o *soil geomorphology*. De las definiciones anteriores, pueden derivarse varios enfoques principales:

- Enfoque geológico con la geomorfología como subdisciplina de la geología; esto es el reflejo de tiempos en que la formación básica de los levantadores de suelos era en geología.
- Enfoque geomorfológico, considerando la pedología como disciplina que da soporte a la geomorfología; etimológicamente, la corriente podría llamarse pedogeomorfología.
- Enfoque pedológico, considerando la geomorfología como disciplina que da soporte a la pedología; etimológicamente, la corriente podría llamarse geomorfopedología.
- Enfoques más integrados, basados en las relaciones recíprocas entre ambas disciplinas.
- Elevación a nivel de una ciencia, por lo tanto un status superior a un simple enfoque o tipo de estudio.

2.2.2 Corriente aplicada

La corriente aplicada está relacionada con el levantamiento de suelos y consiste en el uso de la geomorfología para la cartografía de suelos. Históricamente, el análisis de las relaciones entre geomorfología y pedología en su dimensión espacial y la implementación del binomio suelo-geoforma nacieron de la práctica. El levantamiento de suelos ha sido el laboratorio de campo donde se ensayaron las modalidades de aplicar la geomorfología a la cartografía de suelos. La estructura del paisaje geomorfológico sirvió de tela de fondo al mapeo de suelos, y la dinámica del ambiente geomorfológico ayudó a explicar la formación de los suelos, con retroacción de la información pedológica en el conocimiento geomorfológico.

Originalmente, se utilizaban diversas modalidades de combinar geomorfología y pedología con fines cartográficos, incluyendo cartografías separadas, soporte geomorfológico temático al mapeo de suelos, y diversas formas de integración. Algunos autores y escuelas de pensamiento abogaban por el procedimiento de antecedencia: primero el levantamiento geomorfológico (el marco), después el levantamiento pedológico (el contenido), realizados por dos equipos diferentes (Tricart, 1965a; Ruhe, 1975). En otros casos, hubo más integración, con equipos mixtos haciendo uso sistemático de la interpretación de fotografías aéreas (Goosen, 1968). Desde los años de 1930, el servicio de levantamiento de suelos de los USA (National Cooperative Soil Survey) tenía un área de estudio en geomorfología pedológica (modalidad paralela), que posteriormente se formalizó con la misión de establecer modelos de relaciones pedogeomorfológicas a nivel regional para apoyar el levantamiento de suelos (Effland & Effland, 1992). La contribución de Ruhe (1956) significó un avance en la utilización de la geomorfología en los levantamientos de suelos en los USA. Ruhe era a favor de separar completamente la descripción de los suelos del estudio de la geomorfología y geología en un área de trabajo. Sólo después de terminarse los estudios disciplinarios, podía emprenderse la interpretación de las relaciones entre características pedológicas y formas de terreno (Effland & Effland, 1992). En la segunda mitad del siglo XX, el desarrollo de la cartografía temática de suelos, especialmente en los países en vía de desarrollo, y de la cartografía de suelos orientada al soporte de proyectos de desarrollo agrícola en una variedad de países ha llevado a diversas formas de integración, con equipos mixtos de geomorfólogos y pedólogos. Los trabajos

realizados por organismos franceses como el ORSTOM (ahora IRD) y el IRAT, son ejemplos de esta modalidad de cartografía de suelos.

La necesidad de desarrollar la producción agrícola para soportar el crecimiento demográfico ha llevado muchos países en vía de desarrollo a mediados del siglo pasado, especialmente en la zona intertropical, a iniciar amplios programas de inventario de suelos. Estos se llevaron a cabo mayormente por organismos públicos (ministerios, institutos de suelos) encargados de realizar la cartografía de suelos y, en parte, por compañías de consultoría con contratos de inventario de suelos. En Venezuela, por ejemplo, el inventario de suelos comenzó en los años de 1950-1960 como proyectos locales y regionales para apoyar la planificación de sistemas de riego en los Llanos del Orinoco (MOP, MARNR) y, posteriormente, como inventario sistemático a nivel de todo país (COPLANARH).

En estos levantamientos se implementaba un enfoque integrado, basado en un paradigma pre-establecido, el del paisaje geopedológico, el cual está estrechamente relacionado con los conceptos de pedón, polipedón y pedopaisaje (soilscape) como entidades para describir, muestrear, clasificar y mapear suelos. La integración entre geomorfología y pedología tenía lugar a todo lo largo del proceso de levantamiento, desde la fotointerpretación inicial hasta la elaboración del mapa final. La integración quedaba reflejada en la estructura de la leyenda que consta de dos columnas, una columna para las unidades geomorfológicas que representan los marcos cartográficos, y una columna para las unidades pedológicas que señalan la tipología de los suelos. Este enfoque es más de aplicación técnica que de investigación científica, aunque siempre incluye investigación aplicada realizada sobre la marcha para analizar situaciones nuevas y solucionar problemas del paisaje geopedológico (nuevos rasgos o tipos de geoforma, nuevas relaciones). Es un enfoque relativamente formalizado y sistemático para poder ser aplicado con cierta homogeneidad por varios equipos de levantamiento de suelos trabajando a diversas escalas. Uno de los mayores requisitos para hacer más efectiva la implementación de la geomorfología en esta modalidad de levantamiento integrado es el de disponer de una taxonomía de las geoformas.

Una forma original de integración son los mapas morfopedológicos, basados en el concepto de balance morfogénesis/pedogénesis (Tricart, 1965b, 1994). La integración no es solamente de conceptos, sino también de procedimiento cartográfico. El mapa distingue elementos estables y elementos dinámicos. El marco geológico relativamente estable, incluyendo litología y disposiciones estructurales, figura como fondo de carta. Superpuestas a este fondo se encuentran las unidades geomorfológicas. Cada unidad de mapa se caracteriza en la leyenda por los procesos pedogenéticos y geomorfogenéticos dominantes. De lo anterior se deriva un balance entre pedogénesis y geomorfogénesis, el cual sirve de base para identificar limitaciones para el uso de los suelos.

La implementación de la geomorfología en los levantamientos de suelos contribuyó a estrechar el vínculo entre geomorfología y pedología. Probablemente, el entendimiento de las relaciones recíprocas se enriqueció más gracias a esta cooperación práctica que gracias a estudios puramente académicos en áreas pequeñas o a escala de sitios. Estos progresos estuvieron íntimamente relacionados con el período de oro de los inventarios de suelos durante la segunda mitad del siglo XX, particularmente en países emergentes que necesitaban obtener rápidamente

información de suelos para ambiciosos proyectos de desarrollo agrícola y de sistemas de riego. Esto coincidió con el uso creciente de la fotointerpretación, que hizo de la geomorfología el intermediario indispensable para el levantamiento de suelos. El auge de la economía liberal y la globalización de las relaciones económicas en la última década del siglo pasado condujeron a dejar las leyes del mercado decidir de la ocupación del territorio. Esto significó la paralización de muchos proyectos de planificación del uso de las tierras y, con ello, la de los inventarios de suelos y de la evaluación de tierras que les daban soporte (Zinck, 1990; Ibáñez et al., 1995). Una creciente concientización societal con respecto a la degradación y erosión de los suelos está llevando a reconsiderar la situación, creando nuevas iniciativas y oportunidades (Hartemink & McBratney, 2008; Sánchez & al., 2009).

Simultáneamente, la multiplicación de bases de datos para almacenar y manejar la gran variedad de información suministrada por los inventarios de recursos naturales reveló la necesidad de disponer de un elemento estructurante de entrada a las bases: este marco lo ofrece la geomorfología. De ahí la importancia de disponer de un sistema de clasificación de las geoformas, de preferencia jerárquico, para servir de entrada a diversos sistemas de información sobre recursos naturales, su evaluación, distribución, y riesgos de degradación (Zinck & Valenzuela, 1990b).

En años recientes, se ha puesto énfasis en la cartografía digital de suelos basada en datos de sensoramiento remoto, junto con el uso de sistemas de información geográfica y de una variedad de estadísticas espaciales (McBratney et al., 2003; Grunwald, 2006; Lagacherie et al., 2007; Boettinger et al., 2010; entre otros; Finke, 2012). La combinación de técnicas de sensores remotos y modelos digitales de elevación (MDE) permite mejorar los modelos de predicción (Dobos et al., 2000; Hengl, 2003). Este enfoque se limita frecuentemente a ver el suelo como una superficie en vez de un cuerpo tridimensional. Los sensores remotos proveen información sobre parámetros individuales de la superficie del terreno y de la capa superficial del suelo. Existen técnicas e instrumentos para detectar propiedades de suelo en profundidad por control próximo (p.e. sensores ASD, FDEM, GPR), pero su uso es todavía en parte experimental. Los modelos digitales de elevación permiten relacionar estos parámetros con variaciones del relieve, pero la contribución de la geomorfología se limita generalmente a los atributos geomorfométricos (Pike et al., 2009). El énfasis puede ser, entre otros, en mejorar la precisión de los límites entre unidades cartográficas por comparación con un mapa convencional de suelos (Hengl, 2003), o predecir variaciones espaciales de propiedades de suelo como por ejemplo el espesor del solum (Dobos & Hengl, 2009), o comparar la precisión cartográfica de un mapa convencional de suelo con un mapa obtenido por sistema experto (Skidmore et al., 1996). En todos estos casos, se movilizan parámetros morfométricos junto con información de suelo pre-existente (mapas y perfiles de suelo). La esencia del paradigma de la geomorfología pedológica, en particular las relaciones genéticas entre suelos y geoformas y su efecto en la evolución de los paisajes, no se encuentran reflejadas suficientemente en el enfoque digital actual. No hay planteamiento teórico sobre las relaciones suelo-geoforma, salvo la referencia que se hace usualmente a los modelos clásicos de facetas de vertiente de Ruhe (1975) y de formación de suelos de Jenny (1941, 1980). Se utilizan los avances tecnológicos en materia de teledetección y modelos digitales de elevación para explorar e inferir propiedades de suelo y su distribución en el espacio topográfico. Desde el punto de vista operacional, la cartografía digital de suelos está mayormente limitada al ambiente académico y consiste esencialmente en mapear propiedades de la capa superficial del suelo, no

cuerpos de suelo que son las unidades que manejan los usuarios (agricultores, ingenieros). En las entidades oficiales encargadas de realizar levantamientos de suelos, la cartografía digital consiste esencialmente en digitalizar información cartográfica existente (Rossiter, 2004). Hay pocos ejemplos de organismos nacionales o regionales que hayan adoptado métodos automatizados para la producción de mapas operacionales (Hengl & MacMillan, 2009).

2.3 Naturaleza de las relaciones y áreas de convergencia

Existe una colección de libros dedicados a la geomorfología pedológica, que tratan del tema desde diversos puntos de vista de acuerdo al área de experiencia de cada autor (Birkeland, 1974; Ruhe, 1975; Mahaney, 1978; Gerrard, 1981; Jungerius, 1985a; Catt, 1986; Retallack, 1990; Daniels & Hammer, 1992; Gerrard, 1992; Birkeland, 1999; Schaetzl & Anderson, 2005; entre otros). Estas obras son frecuentemente muy analíticas, relatando estudios de caso y describiendo situaciones ejemplares que ilustran algún tipo de relación entre geomorfología y pedología. Hace falta un análisis epistemológico de la literatura especializada existente, para destacar la variedad de puntos de vista y realzar tendencias más generales. Ensayos de síntesis se encuentran en algunos artículos de revistas científicas. Lo que sigue está basado en una selección de artículos de revista y capítulos de libros, que proveen una síntesis de la materia en una determinada época y constituyen jalones que permiten evaluar la evolución de las ideas y de los enfoques con el tiempo.

2.3.1 Evolución de las relaciones

La concepción puramente geológica de Davis (1899) sobre el origen de las formas de terreno como una función de estructura, proceso y tiempo, excluía el suelo y la biota en general como factores de formación (Jungerius, 1985b). El ciclo de denudación de Davis ha influenciado por medio siglo el enfoque de los geomorfólogos, más inclinados a desarrollar teorías que observar los materiales de cobertura en el paisaje, y a darle preferencia a los rasgos de erosión sobre el análisis de los sistemas deposicionales. En contraposición a esto, el paradigma de formación de suelos, nacido a partir de los trabajos pioneros de Dokuchaiev y Sibirzew, y posteriormente formalizado por Jenny (1941, 1980), estaba basado en una serie de factores ambientales incluyendo clima, biota, material parental, relieve y tiempo. Estas diferencias conceptuales originales han conducido a geomorfólogos y pedólogos a ignorarse mutuamente por largo tiempo (Tricart, 1965a), a pesar de que ya en 1949 Wooldridge (1949) había escrito un corto ensayo sobre las relaciones entre geomorfología y pedología. McFadden & Knuepfer (1990) notan que históricamente los suelos han sido negligenciados por muchos geomorfólogos, los cuales daban preferencia al análisis de relaciones estratigráficas y sedimentológicas o a estudios morfométricos. La situación cambió por mediados del siglo pasado al reconocerse que los dos modelos podían conjugarse en base a factores comunes (estructura geológica, material parental, relieve, tiempo y etapa de evolución) y factores complementarios interrelacionados (procesos, clima, biota). Esto ha permitido a los investigadores de utilizar los conceptos y métodos de ambas disciplinas en combinaciones variables y para propósitos diversos.

Tricart (1965a) ha sido uno de los primeros en llamar la atención sobre las relaciones mutuas que unen geomorfología y pedología. Según este autor, la geomorfología provee un marco para la formación de los suelos y elementos de balance para la pedogénesis, mientras que la pedología

provee información sobre las propiedades de suelo que intervienen en la morfogénesis. Jungerius (1985b) muestra que, si bien la geomorfología y la pedología tienen diferentes enfoques, los objetos de estudio de estas dos disciplinas, las formas de terreno y los suelos, comparten los mismos factores de formación; el mismo autor realza también el hecho de que las relaciones son de dos vías generando contribuciones recíprocas. Desde los primeros trabajos de síntesis, que focalizan en lo que una disciplina puede aportar a la otra, el campo de la geomorfología pedológica ha evolucionado hacia mayor integración, variable de acuerdo a los tópicos, con utilización simultánea de la geomorfología y de la pedología y menos consideración por los límites convencionales que separan ambos dominios disciplinarios. En ciertas universidades existen ahora departamentos que albergan las dos disciplinas bajo el mismo techo (p.e. Department of Geomorphology and Soil Science, Technical University of Munich, Freising, Germany).

2.3.2 Contribuciones mutuas

Debido a que las relaciones entre geomorfología y pedología son múltiples, el espectro de las áreas y de los tópicos de investigación interdisciplinaria es amplio y variado, y las preferencias dependen de la orientación de cada investigador. En ausencia de un cuerpo formal de temas, he aquí como algunos autores han sintetizado el contenido de la geomorfología pedológica.

Hace medio siglo atrás, Tricart en su libro sobre *Principes et Méthodes de la Géomorphologie* (Tricart, 1965a) mostró que las relaciones entre las dos disciplinas son recíprocas.

- La geomorfología contribuye a la pedología ofreciéndole balances de materiales en la superficie terrestre. El concepto de balance de materiales se encuentra bien ilustrado en el caso de las toposecuencias o catenas de suelos, donde la ablación de materiales en las cumbres de las vertientes causa truncamiento de suelos, mientras que la acumulación de los materiales desplazados en las faldas causa sepultación de suelos. Otro ejemplo de balance entre procesos antagónicos que controlan el desarrollo del suelo en condiciones de vertiente es la diferencia de intensidad entre la alteración del substrato y la ablación en superficie del terreno. En áreas aluviales activas, la morfología del suelo resulta del balance entre el ritmo de la deposición de sedimentos y su incorporación en el suelo por los procesos pedogenéticos.
- La geomorfología ofrece también un marco natural de formación y evolución de los suelos. El medio geomorfológico integrando los factores de material parental, relieve, tiempo y procesos superficiales, provee una parte esencial del marco espacial y temporal en que los suelos se originan, se desarrollan, y evolucionan. Tricart sostiene que la cartografía geomorfológica debe preceder el mapeo de suelos y no se muestra favorable a la integración de ambas actividades.
- En retorno, la pedología suministra información sobre características de los suelos como textura, estructura, estabilidad de agregados, contenido de hierro, entre otras, las cuales desempeñan un papel importante en la resistencia (o no) de los materiales de superficie a los procesos morfogenéticos. Privilegiando la geomorfología, Tricart sugiere que la pedología debería ser una rama de la geomorfología. En efecto, la pedología estudia un aspecto en particular de los fenómenos de contacto entre litosfera y atmósfera en el estrato donde los seres vivos intervienen para modificar una parte muy superficial de la litosfera, mientras que la geomorfología abarca la mayor parte de la epidermis de la tierra. Este punto de vista se encuentra compartido por otros autores como, por ejemplo, Gerrard (1992) o Daniels &

Hammer (1992). Sin embargo, Tricart reconoce que lo más importante es en realidad intensificar los vínculos de cooperación entre ambas disciplinas.

El volumen sobre *Pedogenesis and Soil Taxonomy* publicado en 1983 (Wilding et al., 1983) ha sido un libro de referencia en su tiempo, cuyo propósito principal era de proveer un balance entre morfología y génesis de suelos para entender y utilizar el sistema comprensivo de clasificación de suelos del Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). El capítulo escrito por Hall (1983) sobre pedología y geomorfología es una inclusión interesante en una obra orientada específicamente hacia taxonomía de suelos. El mismo muestra que el suelo es más que un objeto de clasificación y trata de reconciliar suelo y paisaje, un aspecto ignorado por el Soil Taxonomy. El autor enfatiza que es necesario mapear suelos y superficies geomorfológicas independientemente, y establecer correlaciones después, lo que corresponde a posiciones defendidas anteriormente por Tricart (1965a) y Ruhe (en Effland & Effland, 1992). El mismo afirma que no está permitido, en un área de estudio nueva, deducir los suelos de su ubicación en el paisaje o deducir la historia geomorfológica del área únicamente en base a las propiedades de los suelos. A pesar de esta posición algo arcaica, Hall reconoce que no hay límites claros entre procesos geomorfológicos y procesos pedológicos y que se requieren estudios interdisciplinarios para explicar los rasgos que abordan ambas ciencias.

En un suplemento de la revista CATENA dedicado a *Soils and Geomorphology* (Jungerius, 1985a), Jungerius (1985b) presenta los resultados de una amplia revisión bibliográfica desde los primeros trabajos de mediados del siglo pasado hasta la fecha de publicación del suplemento, con énfasis en artículos aparecidos en la revista CATENA. El autor adopta un enfoque dicotómico similar al de Tricart para mostrar las contribuciones mutuas entre ambas disciplinas, pero con énfasis en el aporte de la pedología a la geomorfología.

- Para ilustrar el significado de los estudios de formas de terreno para la pedología, se parte de la observación general de que los procesos pedológicos como adiciones, pérdidas, traslocaciones y transformaciones (Simonson, 1959) están bajo control geomorfológico. Después, se hace referencia a temas recurrentes en la literatura que ponen énfasis en el relieve como factor de formación y de geografía de los suelos. Se realzan tópicos como el efecto de la fisiografía del terreno en la distribución espacial y la cartografía de los suelos, el efecto de la topografía en la génesis de los perfiles de suelo y su distribución catenaria, y el efecto de la evolución del paisaje en la diferenciación de suelos.
- El análisis del significado de los estudios pedológicos para la geomorfología es más detallado. Después de mostrar como estos estudios contribuyen al establecimiento de mapas geomorfológicos y mapas de erosión de suelos, se pone énfasis en dos tipos de estudio que se benefician substancialmente del aporte de la pedología: los estudios de procesos geomorfo-genéticos y los estudios paleogeomorfológicos. Investigar la naturaleza de los procesos que operan en una vertiente requiere conocer el sistema de suelos presente, con sus variaciones temporales y espaciales. Muchos de los autores citados por Jungerius (1985b) insisten en la importancia del control que los tipos de horizonte ejercen sobre los procesos geomorfológicos. Se establece una diferenciación mayor entre horizontes A y costras superficiales y el impacto de éstos en las modalidades de escurrimiento e infiltración, por una parte, y horizontes B y panes subsuperficiales y el impacto de éstos en la formación de tubos y túneles, cárcavas y movimientos en masa, por la otra. En cuanto a los estudios paleogeomorfológicos, se hace énfasis en la importancia de los paleosuelos como indicadores

de una fase de estabilidad del paisaje, con la posibilidad de reconstruir factores y condiciones prevalecientes en el mismo período. La interpretación de los paleosuelos ayuda al geomorfólogo a reconstruir condiciones climáticas y vegetacionales pasadas, inferir el tiempo de evolución de un paisaje, establecer cambios en la configuración de un paisaje, y detectar procesos geomorfológicos pasados.

2.3.3 *Tendencia hacia mayor integración*

Un trabajo pionero en enfocar los suelos como unidades de paisaje es el de Fridland (1974, 1976). Fridland muestra que los suelos se distribuyen en el paisaje de acuerdo a patrones que conforman la estructura del manto de suelos. A pesar de que el vocablo de geomorfología no aparece en sus textos, las relaciones que establece son relaciones entre entidades genéticas y geométricas de suelos y formas de relieve. Posteriormente, Hole & Campbell (1985) han retomado este enfoque en su análisis del paisaje pedológico. Contemporáneamente con los trabajos de Fridland, Daniels et al. (1971) utilizan la superposición de mantos pedológicos para determinar edades relativas y secuencias de eventos en el paisaje, poniendo las bases de la pedostratigrafía.

En artículos de síntesis más recientes, se pone énfasis en mostrar como los conceptos y métodos de las dos disciplinas han sido integrados para investigar aspectos de interfase, en vez de individualizar el aporte específico de cada disciplina. Los estudios modernos de geomorfología pedológica transgreden los límites de las dos ciencias de origen e integran partes del cuerpo doctrinal de ambas. Este nuevo dominio de investigación conforma una disciplina de interfase, o “border country” como la llama Jungerius (1985b), que gana en autonomía y madurez, con su propio enfoque metodológico y sus propios temas de interés. Esto ha llevado Schaeztl & Anderson (2005) a calificarla de ciencia. A continuación, se hace referencia a unos artículos que intentan de formalizar el dominio de la geomorfología pedológica.

Olson (1989) considera que un estudio de geomorfología pedológica debería tener tres componentes principales, incluyendo (1) el reconocimiento de la estratigrafía de superficie y el de los materiales parentales presentes en un área; (2) la determinación de las superficies geomorfológicas en espacio y tiempo; y (3) la correlación entre propiedades de suelo y rasgos de paisaje. Este enfoque es conforme a la definición que Olson (1989) da de la geomorfología pedológica como el estudio del paisaje y de la influencia que los procesos de paisaje tienen en la formación de los suelos. Hay integración de las dos disciplinas, pero la geomorfología desempeña el papel determinante. En una publicación ulterior (Olson, 1997), el mismo autor nota que los patrones o modelos de suelo-geomorfología pueden ser aplicados de manera consistente y predecible en el levantamiento de suelos y que el pedólogo debe adquirir la habilidad de usar los patrones pedogeomorfológicos para interpolar dentro de un área de estudio o extrapolar a áreas geográficas similares.

En la Revista *Geomorphology* 3 (1990) se publican las actas de un simposio dedicado a la geomorfología pedológica (Proceedings of the 21st Annual Binghamton Symposium in Geomorphology, edited by Knuepfer & McFadden, 1990). Además de numerosos artículos analizando estudios de caso en una variedad de sitios y condiciones, la revista provee dos artículos introductorios que presentan un panorama de las tendencias en la materia a fines de los

años de 1980. McFadden & Knuepfer (1990) analizan el vínculo entre pedología y procesos superficiales. En un corto recuento histórico, muestran como los trabajos pioneros de algunos geólogos, geomorfólogos y pedólogos, concentrando en el estudio de las relaciones genéticas entre suelos y paisajes, desembocaron en la corriente de la geomorfología pedológica. Los autores refieren a tres tópicos que consideran centrales para el desarrollo de la geomorfología pedológica. Primero, señalan el significado de la ecuación fundamental de Jenny (1941) para mostrar la relevancia de la geomorfología en la investigación pedológica a través de los factores de cambio climático, tiempo, y relieve. En particular, el estudio de cronosecuencias ha contribuido enormemente a entender procesos geomorfológicos y evolución del paisaje, especialmente en valles fluviales con sistemas de terrazas anidadas. El tema de las terrazas es un área de convergencia por excelencia, porque entender la génesis de las terrazas es importante para poder interpretar los datos pedológicos obtenidos de los suelos de terraza. En segundo lugar, los autores abordan la cuestión de los modelos y de la simulación. Contrastan los modelos conceptuales, como los de Jenny (1941) y Johnson et al. (1990), con los modelos numéricos diseñados para simular la operación de sistemas complejos; y consideran que la modelización se encuentra todavía limitada por cierta indefinición de conceptos básicos como suelos poligenéticos, intervalos de formación de suelos, y tasa de desarrollo de los suelos, entre otros. Por último, los autores mencionan algunos de los problemas que enfrenta la investigación de geomorfología pedológica en paisajes complejos. Las vertientes son un ejemplo típico de paisaje complejo, donde los procesos morfogenéticos actuales tienen a veces no o poca relación con la formación de la vertiente en sí, y frecuentemente no hay relación clara entre inclinación de la vertiente y grado de desarrollo de los suelos. En síntesis, McFadden & Knuepfer (1990) consideran que la relación suelo-forma de terreno es de interacción y retroalimentación mutua. Cuando mejor entendamos los suelos, incluyendo la velocidad a la cual operan los procesos de formación y las variaciones relacionadas con su posición en el paisaje, tanto mayor será nuestra comprensión de los procesos que originan las formas de terreno. De igual manera, cuando mejor comprendamos la evolución del paisaje a todas las escalas espaciales y temporales, tanto mejor podemos dilucidar problemas pedológicos complejos.

En el mismo número especial de *Geomorphology* 3, Birkeland (1990) señala que es difícil trabajar en una de las áreas de la geomorfología pedológica sin usar información proveniente de las otras. El mismo autor ilustra esta necesidad de integrar información al analizar diversos tipos de cronosecuencia y cronofunción en regiones áridas, templadas, y húmedas. Generalizando, Birkeland considera que, en la mayoría de los casos, los estudios de geomorfología pedológica tienen uno de los cuatro siguientes propósitos: (1) establecer una cronosecuencia de suelos que puede ser utilizada para estimar la edad de las formaciones superficiales; (2) utilizar los suelos, mediante propiedades relevantes de horizontes diagnósticos, como indicadores de la estabilidad del paisaje a corto o largo plazo; (3) determinar relaciones entre propiedades de suelo que indican cambios climáticos; y (4) analizar las interacciones entre desarrollo de suelo, infiltración y escurrimiento, y la erosión en vertientes.

Concadenando con lo anterior, Gerrard (1993) considera que el desafío de la geomorfología pedológica es el de integrar elementos de las cuatro áreas reconocidas por Birkeland (1990) para elaborar un marco conceptual de evolución del paisaje. El autor describe varios marcos (modelos) conceptuales convergentes, tales como el de la relación entre umbrales y cambios del

paisaje pedológico, la formación de suelos en superficies de agradación, las cronosecuencias de suelos, y la relación entre desarrollo de suelos y evolución de cuencas hidrográficas.

El libro de Schaetzl & Anderson (2005) sobre *Soils, Genesis and Geomorphology*, contiene una amplia sección dedicada a *soil geomorphology* (pp. 463-655). Los autores elevan la geomorfología pedológica a nivel de una disciplina que trata específicamente de las relaciones a doble sentido entre geomorfología y pedología. Estas relaciones emergen del hecho que los suelos se encuentran fuertemente relacionados con las formas de terreno sobre las cuales se desarrollan. Los autores enfatizan que la geomorfología pedológica es una ciencia basada ante todo en estudios de campo. Retoman, con nuevos ejemplos de estudios más o menos integrados, los tres temas que la geomorfología pedológica ha venido privilegiando: los estudios de catena, las cronosecuencias, y la reconstrucción de la evolución del paisaje con la ayuda de los paleosuelos. Pero, como hecho muy importante para aproximarse más a una definición de los principios básicos de la disciplina, Schaetzl & Anderson reconocen seis tópicos principales que conforman el dominio de la geomorfología pedológica: (1) los suelos como indicadores de cambios ambientales/climáticos; (2) los suelos como indicadores de estabilidad geomorfológica y estabilidad del paisaje; (3) estudios de génesis y desarrollo de los suelos (cronosecuencias); (4) relaciones suelo-lluvia-escurrimiento, especialmente con respecto a los procesos de vertiente; (5) los suelos como indicadores de procesos sedimentológicos y deposicionales actuales y pasados; y (6) los suelos como indicadores de la estratigrafía y de los materiales parentales del Cuaternario. Esta lista se asemeja, con más detalles, a los objetivos de la geomorfología pedológica propuestos anteriormente por Birkeland (1990). Esto demuestra que se ha logrado cierta constancia de enfoque.

2.4 Conclusión

Varios autores han producido obras y artículos de síntesis con extensas listas de referencias, las cuales se sugiere consultar para mayor información. Esto ha contribuido a hacer de la geomorfología pedológica una disciplina propiamente dicha. Hay cierto consenso sobre la relación siguiente: las formas de terreno controlan la formación y distribución de los suelos y, en retorno, el desarrollo de los suelos tiene influencia en la evolución del paisaje geomorfológico. Los temas de geomorfología pedológica que más atención han recibido (en la literatura) son los estudios de cronosecuencia y toposecuencia (catenas). Estas dos clases de estudio proveen la mayoría de los ejemplos que se utilizan para ilustrar las relaciones entre geomorfología y pedología. Algunos autores privilegian las cronosecuencias como tema de estudios integrados incluyendo pedoestratigrafía y paleopedología. Muchos otros enfatizan el estudio de la distribución y evolución de los suelos en el marco del concepto de catena popularizado en base a los modelos de vertiente de Wood (1942), Ruhe (1960, 1975), y Conacher & Dalrymple (1977). Algunos artículos destacan principios generales, pero todavía no hay un cuerpo de doctrina unificado. Hay pocas referencias en revistas internacionales que proveen alguna síntesis formal sobre como proceder para realizar una cartografía pedogeomorfológica integrada.

Capítulo 3

EL ENFOQUE GEOPEDOLOGICO

3.1 Introducción: definición, origen, desarrollo

El enfoque geopedológico pone énfasis en la lectura del paisaje en el campo y desde documentos de sensoramiento remoto con fines de identificar y clasificar las geoformas, como preludeo a su mapeo junto con los suelos que albergan y a la interpretación de las relaciones genéticas entre geoformas y suelos. Como tal, geopedología está emparentada con el concepto de patrón y estructura de la cobertura pedológica desarrollado por Fridland (1974, 1976) y retomado por Hole & Campbell (1985), pero con énfasis explícito en el contexto geomorfológico como factor esencial de formación y distribución de los suelos.

Es de aceptación común que hay relaciones entre suelos y paisajes, frecuentemente sin especificar la naturaleza del paisaje en consideración (topográfico, ecológico, biogeográfico, geomorfológico, etc.). El uso de modelos de paisaje ha mostrado que los elementos del paisaje son predecibles y que especialmente el componente geomorfológico controla una amplia parte de la variabilidad espacial no-aleatoria en la cobertura pedológica (Arnold & Schargel, 1978; Wilding & Drees, 1983; Hall & Olson, 1991). Wilding & Drees (1983), en particular, subrayan la importancia de los rasgos geomorfológicos (formas y elementos) para reconocer y explicar las variaciones sistemáticas en los patrones de suelo. Geométricamente, el paisaje geomorfológico y sus componentes, los cuales tienen frecuentemente límites discretos característicos, son discernibles en el campo y en documentos de sensoramiento remoto. Genéticamente, las geoformas cubren tres de los factores de formación de suelos reconocidos en la ecuación de Jenny (1941), a saber la topografía (relieve), la naturaleza del material parental, y la edad relativa (morfoestratigrafía). Por lo tanto, el contexto geomorfológico es una herramienta particularmente idónea para la cartografía de suelos y para entender su formación.

Geopedología es un enfoque dirigido al levantamiento de suelos, combinando criterios geomorfológicos y pedológicos, para establecer unidades de mapeo y analizar la distribución de los suelos en el paisaje. La geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo (el contenido), mientras que la pedología suministra los componentes taxonómicos de las unidades de mapeo (el contenido). Por lo tanto, las unidades de un mapa geopedológico son más que las unidades cartográficas de un mapa convencional de suelo, ya que contienen también información sobre el contexto geomorfológico en que se encuentran y se han desarrollado los suelos. En este sentido, la unidad geopedológica es un equivalente aproximado del concepto de paisaje de suelo, o *soilscape* (Buol et al., 1997), con la particularidad que el paisaje es básicamente de naturaleza geomorfológica. Esto se refleja en la leyenda del mapa geopedológico, la cual combina geoformas como entradas a la leyenda y unidades taxonómicas de suelo como componentes.

El enfoque geopedológico, tal como se describe a continuación, se desarrolló en Venezuela con la aplicación sistemática de la geomorfología en los programas de inventario de suelos, que este país llevó a cabo en el transcurso de la segunda mitad del siglo XX a diversas escalas desde detallada hasta gran visión. La implementación práctica de la geomorfología comenzaba con el

establecimiento de un mapa preliminar de fotointerpretación previo a las labores de campo. Este documento orientaba la distribución de los puntos de observación, la selección de sitios para la descripción de pedones representativos, y la cartografía final. Un hecho sobresaliente es que las geoformas constituían las entradas a la leyenda de los mapas de suelo. Los equipos de trabajo incluían geomorfólogos y pedólogos, los cuales recibían entrenamiento en la metodología del levantamiento de suelos, incluyendo nociones básicas de geomorfología. Este programa de formación empezó en el Ministerio de Obras Públicas (MOP), encargado de realizar los estudios de suelo básicos para la implantación y el manejo de sistemas de riego y de drenaje en las áreas aluviales del país, y se desarrolló posteriormente en la Comisión para la Planificación de los Recursos Hidráulicos (COPLANARH) y en el Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales Renovables (MARNR). De esta experiencia nació una primera síntesis dirigida a la aplicación de la geomorfología en zonas aluviales, básicamente las planicies de los Llanos del Orinoco donde se localizaban las áreas de levantamiento de suelos para la planificación de sistemas de riego (Zinck, 1970). En seguida, con la extensión del inventario de suelos a otros tipos de ambiente, se generalizó el enfoque para incluir paisajes de valles intramontanos, montañas, piedemontes, y altiplanicies (Zinck, 1974).

Posteriormente, el enfoque geopedológico fue formalizado como texto de referencia bajo el entitulado de *Physiography and Soils* en el marco de un programa de postgrado para formar especialistas en levantamiento de suelos en el International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), ahora Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, en Enschede, Países Bajos (Zinck, 1988). Durante un período de más de 20 años se formaron así geopedólogos originarios de una variedad de países de América Latina, Africa, Medio-Oriente, y Sureste Asiático, que contribuyeron a divulgar y aplicar el método geopedológico en sus respectivos países. En estos tiempos, el ITC participaba también en proyectos de inventario de suelos en el marco de programas internacionales de cooperación para el desarrollo. Esto a su vez ha contribuido a difundir el modelo geopedológico en una amplia parte del mundo intertropical. En ciertos países, este modelo ha recibido el apoyo de organismos oficiales para su implementación en programas de inventario de los recursos naturales y de ordenamiento ecológico del territorio (Bocco et al., 1996).

El enfoque geopedológico se desarrolló en condiciones específicas, donde la implementación de la geomorfología fue solicitada institucionalmente para apoyar programas de levantamiento de suelos a niveles nacional, regional y local. Originalmente, la primera demanda emanó de la División de Edafología, Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas de Venezuela. Este marco institucional contribuyó a determinar las modalidades de aplicación de la geomorfología a inventarios de suelo semi-detallados y detallados en áreas nuevas para la planificación del uso de las tierras en sistemas de riego y agricultura de secano a nivel regional y local. Lo mismo ocurrió posteriormente con el inventario de tierras a nivel de gran visión por COPLANARH como input para la planificación de los recursos hidráulicos a nivel nacional. Con el fin de simplificar la logística y disminuir los costos de operación, se integró la geomorfología directamente al inventario de suelos. De ahí, *geopedología* resultó ser el término que mejor expresaba la relación entre las dos disciplinas, con la geomorfología al servicio de la pedología, específicamente para apoyar el mapeo de suelos. La geomorfología se consideró como una herramienta para mejorar y acelerar el levantamiento de suelos, especialmente a través de la fotointerpretación geomorfológica.

La geopedología es uno de los varios enfoques, descritos en el Capítulo 2, que estudian las relaciones entre geomorfología y pedología o utilizan estas relaciones para analizar y explicar rasgos del paisaje geomorfológico y pedológico. Comparada con los demás enfoques, la geopedología tiene un objetivo más práctico y podría definirse como la disciplina del inventario de suelos, incluyendo la caracterización, clasificación, distribución y cartografía de suelos, con énfasis en la contribución de la geomorfología a la pedología. La geomorfología interviene especialmente para entender la formación y distribución de los suelos mediante modelos relacionales (por ejemplo, cronosecuencias y toposecuencias) y para apoyar el mapeo. El concepto central de la geopedología es el suelo en el paisaje geomorfológico. El paisaje geopedológico es el paradigma.

La aplicación de la geomorfología al inventario de suelos requiere una taxonomía de las geoformas de tipo jerárquico para ser utilizada a diversos niveles categóricos de acuerdo al grado de detalle del inventario y de la cartografía de suelos (Tabla 3.1). Se utiliza la palabra *geoforma* como término genérico a todos los niveles taxonómicos, mientras que *forma de terreno* se utiliza para designar el nivel inferior del sistema de clasificación. El concepto de geoforma incluye a la vez el modelado/relieve y las formaciones superficiales. La palabra *forma de tierra* como traducción literal de *landform* presta a confusión, porque se utiliza con significados diferentes en geomorfología, ecología de paisajes, y evaluación de tierras, entre otros.

Tabla 3.1 Sistema taxonómico de las geoformas (Zinck, 1988).

Nivel	Categoría	Concepto genérico	Definición
6	Orden	Geoestructura	Extensa porción continental caracterizada por su macro-estructura geológica (p.e. cordillera, geosinclinal, escudo)
5	Suborden	Ambiente morfo-genético	Amplio tipo de medio biofísico originado y controlado por un estilo de geodinámica interna y/o externa (p.e. estructural, deposicional, erosional, etc.)
4	Grupo	Paisaje geomorfológico	Gran porción de terreno caracterizada por sus rasgos fisiográficos; corresponde a una repetición de tipos de relieve similares o a una asociación de tipos de relieve disímiles (p.e. valle, altiplanicie, montaña, etc.)
3	Subgrupo	Relieve/modelado	Tipo de relieve originado por una determinada combinación de topografía y estructura geológica (p.e. cuesta, horst, etc.). Tipo de modelado determinado por específicas condiciones morfoclimáticas o procesos morfogenéticos (p.e. glacis, terraza, delta, etc.).
2	Familia	Litología/facies	Naturaleza petrográfica de las rocas duras (p.e. gneis, caliza, etc.) u origen/naturaleza de las formaciones no-consolidadas de cobertura (p.e. periglaciario, lacustre, aluvial, etc.)
1	Subfamilia	Forma de terreno	Tipo básico de geoforma caracterizado por una combinación única de geometría, historia y dinámica.

Las relaciones entre geomorfología y pedología pueden analizarse desde varios puntos de vista: conceptual, metodológico, y operacional. La geopedología (1) se basa en relaciones conceptuales entre geoforma y suelo que se centran en la interfase epidérmica de la Tierra, (2) se implementa

mediante una variedad de modalidades metodológicas que se basan en el concepto tridimensional de paisaje geopedológico, y (3) se hace operacional básicamente en el marco del inventario de suelos, el cual puede ser representado por un esquema jerárquico de actividades.

3.2 Relaciones conceptuales

Geoforma y suelo son objetos naturales que ocurren a lo largo de la interfase entre la costra superficial del globo terráqueo y el aire. Son los únicos a ocupar integralmente esta posición privilegiada. Las rocas (litosfera) se encuentran mayormente por debajo. Los seres vivos (biosfera) pueden estar presentes por debajo o adentro, pero ocurren esencialmente por encima. El aire (atmósfera) puede penetrar en la interfase, pero está mayormente por encima. La Fig. 3.1 (Tricart, 1972) realza la posición central del dúo geoforma-suelo en el marco de la estructura del medio ambiente físico-geográfico. La geoforma integra el concepto de formaciones superficiales y el de relieve-modelado.

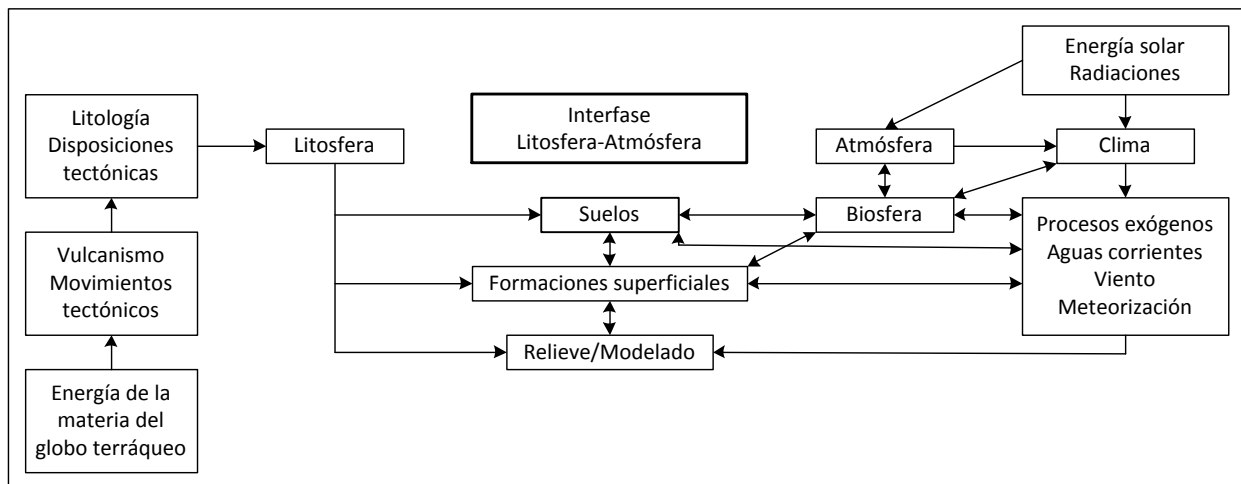


Fig. 3.1 La posición del binomio geoforma-suelo en la interfase entre atmósfera y litosfera (adaptado de Tricart, 1972).

3.2.1 Factores de formación comunes

Por desarrollarse a lo largo de una interfase común en la epidermis de la Tierra, geoforma y suelo comparten factores de formación que emanan de dos fuentes de materia y energía, una interna y otra externa.

- La fuente endógena corresponde a la energía y a la materia del globo terráqueo. El material son las rocas que se caracterizan por tres atributos: (1) la facies o litología que incluye textura, estructura, y mineralogía; (2) la disposición tectónica; y (3) la edad o estratigrafía. La energía la suministra la geodinámica interna, que se manifiesta bajo la forma de vulcanismo y deformaciones tectónicas (pliegues, fallas, fracturas).
- La fuente exógena corresponde a la energía solar que actúa por intermedio de la atmósfera e influye en el clima, la biosfera, y la geodinámica externa (erosión, transporte, y sedimentación de materiales).

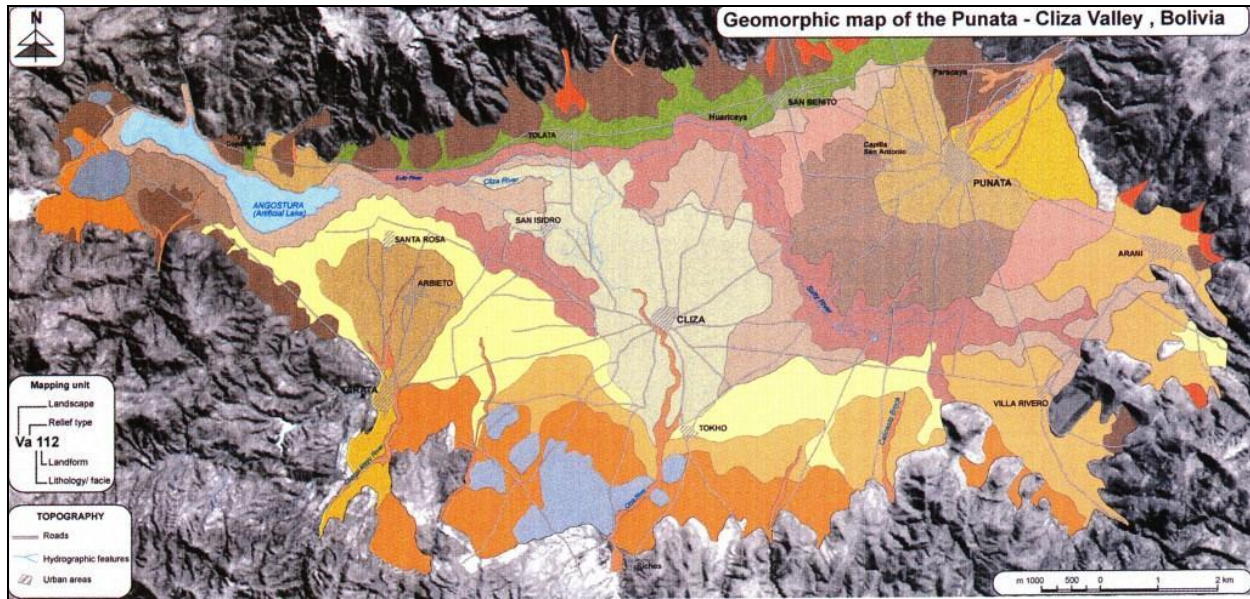
Geoforma y suelo se encuentran condicionados por factores de formación derivados de estas dos fuentes de materia y energía que actúan a través de la litosfera, atmósfera, hidrosfera, y biosfera. Los límites entre geoforma y suelo son difusos. La geoforma tiene dos componentes: una superficie que corresponde a su configuración externa (componente epigeo) y un volumen que corresponde a su material de constitución (componente hipogeo). El suelo se encuentra insertado entre estos dos componentes. El mismo se desarrolla a partir de la capa superficial del material geomorfológico (productos de alteración – regolita, alterita, saprolita – o materiales de deposición) y está condicionado por la dinámica que tiene lugar a lo largo de la superficie de la geoforma (agradación, degradación, remoción). Una gran parte de los suelos no se forma directamente a partir de rocas duras, sino a partir de materiales más o menos sueltos originados por transporte-deposición de materiales detríticos o por alteración del substrato. Estos materiales corresponden al concepto de formaciones superficiales, las cuales se encuentran dispuestas en la interfase litosfera-atmósfera, con o sin relación genética con el substrato, pero estrechamente asociadas con la evolución del relieve del cual son la expresión litológica (Campy & Macaire, 1989). Las formaciones superficiales constituyen el material parental de muchos suelos. La naturaleza y la extensión de estos depósitos superficiales a menudo determinan las condiciones y los límites de la interacción entre procesos de formación de suelos (Arnold & Schargel, 1978).

Geoforma y suelo comparten los mismos factores de formación, lo que genera relaciones complejas de causa a efecto y retroacciones. Uno de los factores, el relieve que corresponde al componente epigeo de las geoformas, es intrínsecamente del dominio de la geomorfología. Otro, el material parental, es parcialmente geomorfológico y parcialmente geológico. El factor tiempo es a doble vía: la edad del material parental (p.e. edad absoluta o relativa de un sedimento) o la edad de la geoforma como un todo (p.e. edad relativa de una terraza) informa sobre la edad posible del suelo. Inversamente, la datación de un horizonte humífero o de un estrato orgánico informa sobre la posición estratigráfica de la geoforma. Por lo tanto, las relaciones entre estos tres factores de formación son a la vez intrincadas y recíprocas, la geoforma siendo un factor de formación de suelos, y el suelo siendo un factor de la morfogénesis (p.e. erosión-acumulación a lo largo de una vertiente). El clima y la biota influyen a ambos, la geoforma y el suelo, pero de manera diferente. En el caso de la biota, la relación es más compleja, ya que una parte de la biota (hipogea) está dentro del suelo y se considera parte de este.

La geoforma integra por sí sola tres de los cinco factores de formación de suelos de acuerdo al modelo clásico de Jenny (1941) y refleja la influencia de los otros dos. Esto le confiere a la geomorfología el papel de factor guía en el binomio geoforma-suelo. Su importancia como elemento estructurante del paisaje se refleja en las entradas geomorfológicas de las leyendas de mapas geopedológicos. La leyenda geopedológica muestra cada unidad de suelo en su correspondiente unidad de paisaje geomorfológico (Fig. 3.2).

3.2.2 El paisaje geopedológico

Geoforma y suelo se funden para formar el paisaje geopedológico, un concepto similar al de *soilscape* (pedopaisaje) (Buol et al., 1997), para designar el suelo en el paisaje. Geoforma y suelo tienen influencias recíprocas, siendo uno u otro alternativamente dominante según las circunstancias, las condiciones, y el tipo de paisaje.



SOILS LEGEND						
LANDSCAPE	RELIEF TYPE	FACIES	LANDFORM	CODE	SOILS	
PIEDMONT	Dissected-depositional glaciis	Alluvial	Proximal	Pi 111	Association : Typic Calciorthids Typic Camborthis	
			Central	Pi 112	Consociation : Typic Camborthis (ca)* Ustochreptic Camborthis	
			Distal	Pi 113	Association : Ustalfic Haplargids Ustochreptic Camborthis	
	Depositional glaciis	Colluvio-alluvial	Distal	Pi 213	Consociation : Ustochreptic Camborthis Typic Camborthis	
	Active Fans	Alluvial	Active Channels	Inactive Channels	Pi 411	Miscellaneous Land type : Mixed Alluvial
					Pi 412	Consociation : Typic Torrifluents Typic Torriorthents
	Recent Fans	Colluvio-alluvial			Pi 51	Association : Ustic Torriorthents Typic Torrifluents
	Old Dissected Fans	Glacio-alluvial	Proximal	Central	Pi 611	Association : Typic Camborthis Typic Haplargids
					Pi 612	Consociation : Ustochreptic Camborthis (ca)*
					Pi 613	Consociation : Ustochreptic Camborthis
	Hills	Quartzitic sandstones Marls, sandstones, limestones			Pi 71	Consociation : Lithic Torriorthents
					Pi 72	Consociation : Typic Calciorthids Lithic Calciorthids
VALLEY	Lagunary depressions	Alluvio-lagunary	Higher lagunary flats	Va 111	Association : Fluventic Camborthis Ustochreptic Camborthis	
			Middle Lagunary flats	Va 112	Association : Ustalfic Haplargids Ustochreptic Camborthis	
			Lower Lagunary flats	Va 113	Association : Ustalfic Haplargids (saso)* Ustochreptic Camborthis (sa)*	
			Lagunary Playas	Va 124	Association : Typic Salorthis Natric Camborthis	

* Phases : (ca) calcareous, (saso) saline-alkaline, (sa) saline

Fig. 3.2 Mapa geomorfológico y leyenda geopedológica del valle de Punata-Cliza, Bolivia (Metternicht & Zinck, 1997).

En áreas de vertiente y otros ambientes ablacionales, las propiedades físicas, químicas y biológicas de los horizontes superficiales de los suelos controlan, junto con otros factores, la erosión laminar que causa el truncamiento de suelos. Igualmente, la naturaleza del material pedológico y la secuencia de horizontes, en particular la diferencia de porosidad y resistencia mecánica entre horizontes superficiales, horizontes subsuperficiales y substrato, condicionan los procesos morfogenéticos de surcos, cárcavas y movimientos en masa que se desarrollan en la superficie de las vertientes, así como los procesos hipodérmicos de formación de tubos y túneles. La clásica toposecuencia de suelos es un ejemplo de paisaje geopedológico.

En áreas planas, construidas, son los procesos de sedimentación y la estructura de los sistemas deposicionales resultantes los que controlan la distribución de los suelos, sus propiedades, el tipo de pedogénesis, el grado de desarrollo pedogenético y, inclusive, su potencial de uso. El paisaje de valle aluvial ofrece un buen ejemplo para ilustrar estas relaciones. La Fig. 3.3 representa un modelo de transecto a través de una terraza baja construida por un río durante el Pleistoceno superior (Q1). En los sectores más anchos del valle, el río elaboró un sistema conformado por una secuencia de unidades deposicionales incluyendo albardón de orilla, napa de desbordamiento, cubeta de desbordamiento y cubeta de decantación, en este orden transversalmente al valle desde las posiciones proximales, cercanas al paleo-cauce del río, hasta las posiciones distales en las márgenes del valle.

Las características más relevantes de los cuatro miembros del sistema deposicional son las siguientes:

- Albardón de orilla: posición más alta del sistema, convexa, estrecha; textura con componente arenoso dominante (areno-francoso, franco-arenoso, a veces franco-arcillo-arenoso); bien drenado; Typic Haplustept (o Fluventic); clase I por capacidad de uso.
- Napa de desbordamiento: posición de altura media, plana y ancha; textura con componente limoso dominante (franco-limoso, franco-arcillo-limoso); moderadamente bien drenado; Aquic Haplustept (o Fluvaquentic); clase II.
- Cubeta de desbordamiento: posición baja, plana a ligeramente cóncava, ancha, ovalada; textura arcillo-limosa; imperfectamente drenado; Aeric Humaquept; clase IV.
- Cubeta de decantación: posición más baja del sistema, cóncava, ovalada, cerrada; textura arcillosa muy fina; pobremente drenado; Typic Humaquept; clase V.

Las clases de suelo mencionadas en este ejemplo corresponden a los suelos dominantes en cada unidad geomorfológica. Los suelos principales están generalmente acompañados por suelos subordinados semejantes (suelos con límite taxonómico común en el sistema de clasificación) y por algunas inclusiones usualmente no-contrastantes. La geoforma, con sus características morfográficas, morfométricas, morfogenéticas y morfocronológicas, controla una serie de propiedades de la unidad de suelo correspondiente (p.e. topografía, textura, drenaje) y tiene relación con su clasificación taxonómica y su capacidad de uso. La geoforma también guía la composición de las unidades cartográficas, con la posibilidad de mapear consociaciones de suelos en base a subgrupos semejantes (p.e. Aquic Haplustept y Aeric Humaquept) o asociaciones de suelos en base a subgrupos desemejantes (p.e. Typic Haplustept y Aeric Humaquept), de acuerdo a como se distribuyen los suelos en el paisaje. El marco geomorfológico, el cual controla el establecimiento y la delimitación de las unidades cartográficas

de suelo, hace que estas unidades sean relativamente homogéneas, lo que a su vez permite una interpretación relativamente confiable con fines de uso de las tierras.

La secuencia de suelos puede variar de acuerdo a las condiciones bioclimáticas dominantes (p.e. secuencia de Mollisoles en clima más húmedo) y de acuerdo a la edad de la terraza (p.e. secuencia de Alfisoles en terraza de Q2 y secuencia de Ultisoles en terraza de Q3).

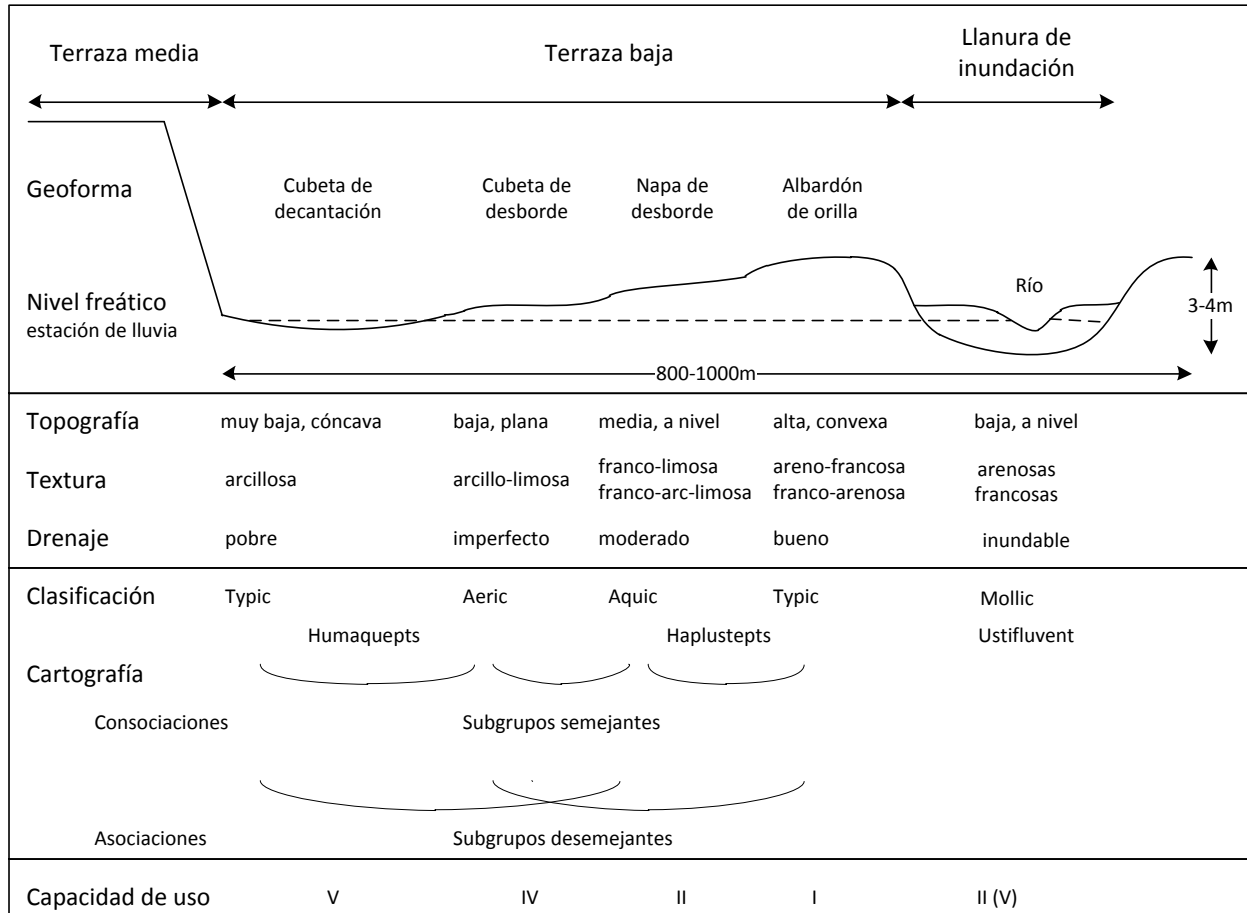


Fig. 3.3 Modelo de paisaje geopedológico en una terraza fluvial (ejemplo del valle del río Guarapiche, noreste de Venezuela).

3.3 Relaciones metodológicas

Las relaciones metodológicas se refieren a las modalidades utilizadas para analizar la distribución espacial y la formación del complejo geoforma-suelo. La geomorfología contribuye a mejorar el conocimiento de los suelos en términos de su geografía, de su génesis, y de su estratigrafía. En retorno, la información pedológica alimenta al dominio de la geomorfología, mejorando el conocimiento sobre los procesos morfogenéticos (p.e. dinámica de vertientes). Lo anterior necesita la integración de los datos geomorfológicos y pedológicos en un modelo estructural compartido para identificar y mapear las unidades geopedológicas.

3.3.1 Integración geopedológica: un modelo estructural

La Fig. 3.4 visualiza la estructura de datos del complejo geoforma-suelo en la óptica del enfoque geopedológico (Zinck & Valenzuela, 1990). Los datos del levantamiento de suelos se derivan típicamente de tres fuentes: (1) interpretación visual y procesamiento digital de documentos de sensoramiento remoto, incluyendo fotografías aéreas, imágenes radar y espectrales, y modelos de elevación; (2) observaciones y determinaciones instrumentales de campo, incluyendo rasgos biofísicos, sociales, y económicos; y (3) determinaciones analíticas de propiedades mecánicas, físicas, químicas y mineralógicas en laboratorio. La importancia relativa de estas tres fuentes de datos varía de acuerdo a la escala y al propósito del levantamiento. En términos generales, cuanto mayor es la escala del mapa final de suelos, tanto más observaciones de campo y determinaciones de laboratorio se requieren para asegurar un nivel apropiado de información.

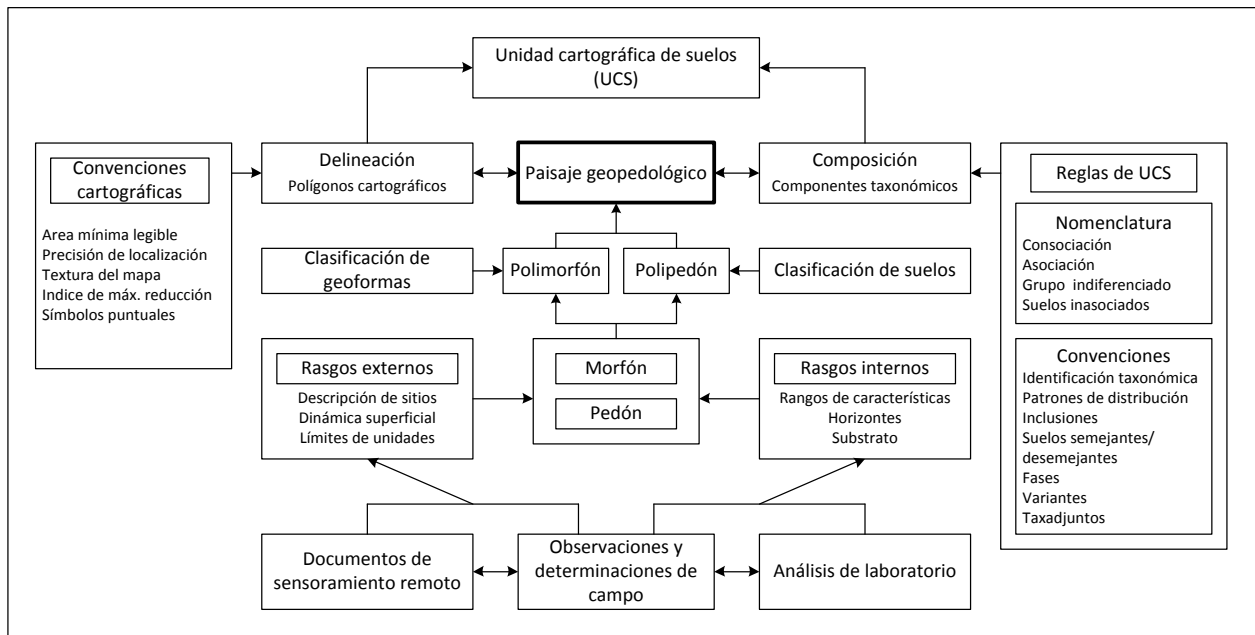


Fig. 3.4 Modelo conceptual-estructural del enfoque geopedológico (Zinck & Valenzuela, 1990).

Como suelos y geoformas son cuerpos tridimensionales, se describen y miden rasgos externos e internos (en relación a la superficie del terreno) para establecer y delimitar unidades cartográficas de suelo. La combinación de la información suministrada por las fuentes (1) y (2) sirve para describir las condiciones ambientales y las dinámicas areales (erosión, inundación, agradación de sedimentos, cambios de uso de las tierras, etc.) y para delinear las unidades de mapeo. A este nivel, la implementación de criterios geomorfológicos mediante interpretación de fotos e imágenes y mediante prospección de campo juega un papel fundamental para la identificación y caracterización de los patrones de distribución de suelos y la comprensión de su variabilidad espacial.

La combinación de la información suministrada por las fuentes (2) y (3) permite caracterizar y cuantificar las propiedades de los materiales pedológicos, de las formaciones geomorfológicas de cobertura, y de los substratos geológicos. El horizonte (o estrato) es la unidad básica de colecta

de datos. La información de horizontes y substratos se agrega en perfiles de observación, pedones modales y morfones modales. Pedón y polipedón se describen y se establecen de acuerdo a los criterios del Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). El morfón es el equivalente geomorfológico del pedón. Se describe en el mismo sitio y de acuerdo a las mismas normas de tamaño que el pedón. La descripción del morfón incluye rasgos internos y externos. Los rasgos internos corresponden a las características y propiedades del geomaterial del substrato, o sea del material parental del suelo. Los rasgos externos cubren el estado y la dinámica de la superficie de terreno en el sitio de descripción y sus alrededores. El material pedológico (el solum) ocupa el volumen entre el substrato y la superficie del terreno. Al igual que en el caso del pedón, el morfón es el sitio de descripción y muestreo. Por lo tanto, pedón y morfón son dos entidades fundamentalmente relacionadas. Esto no es nuevo, ya que la descripción del pedón incluía desde siempre la del material parental y la de los rasgos de superficie. Sin embargo, la contribución de los métodos de análisis geomorfológico mejora la caracterización de los geomateriales del substrato y la de la geodinámica de superficie. La integración metodológica puede realizarse a nivel de un experto versado a la vez en geomorfología y pedología o a nivel de un equipo interdisciplinario.

Los conceptos de polipedón y polimorfón son significativamente diferentes. El polimorfón corresponde a la geoforma y es por lo tanto una unidad más comprensiva que el polipedón. Un polimorfón puede incluir más de un polipedón, y esto es a menudo el caso, especialmente a los niveles superiores del sistema de clasificación de las geoformas. Lo anterior se refleja en la composición taxonómica de las unidades de mapeo: una geoforma relativamente homogénea puede corresponder a una consociación de suelos similares, mientras que una geoforma menos homogénea puede corresponder a una asociación de suelos disímiles. La identificación y descripción del polimorfón se hacen de acuerdo a los criterios expuestos en los Capítulos 5, 6 y 7, relativos a la taxonomía y a los atributos de las geoformas. Las variaciones entre los perfiles de identificación por comparación con un perfil modal (pedón o morfón) se expresan en términos de rangos de características para cada taxón presente en una unidad de mapeo.

A esta altura, los datos disponibles consisten en: (1) observaciones geopedológicas puntuales, con información adicional sobre las variaciones espaciales de las características, y (2) un marco de unidades espaciales basado esencialmente en criterios geomorfológicos externos (características de la superficie del terreno). La combinación de los dos resulta en un mapa de unidades geopedológicas.

Con fines de mapeo, ambos objetos, suelo y geoforma, deben tener nombres de identificación (nombres taxonómicos) suministrados por sus respectivos sistemas de clasificación. Ensamblajes de pedones similares contiguos, formando polipedones, se clasifican por comparación con entidades taxonómicas establecidas en sistemas de clasificación de suelos, como por ejemplo el Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), la clasificación WRB (IUSS, 2007), o alguna clasificación de carácter nacional. Se utiliza un procedimiento similar para la clasificación de las unidades geomorfológicas, pasando de la unidad de descripción y muestreo (morfón) a la entidad de clasificación (polimorfón). Una unidad geomorfológica básica (polimorfón) puede contener uno o más polipedones. Por ejemplo, Entisoles (p.e. Mollic Ustifluvents) y Mollisoles (p.e. Fluventic Haplustolls) pueden ocurrir entremezclados en una posición de albardón de orilla

reciente. La combinación en el paisaje de un polimorfón con los polipedones asociados constituye una unidad de paisaje geopedológico.

Debido a la anisotropía espacial inherente al material pedológico, la cual es generalmente más acentuada que la anisotropía del material geomorfológico, las delineaciones de suelos son usualmente heterogéneas, lo que requiere que los componentes taxonómicos sean nombrados y sus proporciones cuantificadas usando reglas convencionales de cartografía de suelos (Soil Survey Staff, 1993). La delimitación de polígonos obedece a una serie de convenciones cartográficas que aseguran una buena legibilidad del mapa de suelos. De esta manera, las unidades de paisaje geopedológico controladas cartográficamente y taxonómicamente, como combinaciones únicas de polígonos geomorfológicos y de su contenido pedológico, resultan en unidades del mapa de suelos.

Este modelo teórico-metodológico del complejo geoforma-suelo puede ser implementado para diseñar la estructura de una base integrada de datos geopedológicos, tal como se muestra en Zinck & Valenzuela (1990).

3.3.2 Integración geopedológica: geografía, génesis y estratigrafía de suelos

En el marco del modelo geopedológico antes descrito, temas como la geografía, la génesis y la estratigrafía de suelos se benefician substancialmente de la integración de métodos geomorfológicos y pedológicos.

3.3.2.1 Geografía de suelos

La fuente de información sobre la distribución espacial de los suelos es el levantamiento de suelos. La implementación de criterios geomorfológicos en el levantamiento permite mejorar la identificación y la delimitación de suelos, al mismo tiempo que la racionalidad del enfoque geopedológico contribuye a compensar o substituir parcialmente lo que Hudson (1992) llama la adquisición de conocimiento tácito para la aplicación del paradigma suelo-paisaje. El análisis geopedológico integrado facilita la lectura del paisaje, porque el contexto geomorfológico controla, en una amplia proporción, los tipos de suelo asociados en una clase de paisaje tal como, por ejemplo, la secuencia albardón-napa-cubeta en una llanura aluvial o la secuencia cumbre-hombro-ladera-falda en la vertiente de una colina. Estos modelos de asociaciones geopedológicas que están genéticamente relacionadas y producen definidos patrones espaciales, son los componentes (las combinaciones de suelos) de lo que Fridland (1974) llama la estructura del manto de suelos y de lo que Schlichting (1970) denomina la *Bodensozilogie*, la pedosociología.

- La identificación de suelos está basada en la descripción de los suelos en el campo, lo cual conduce a su caracterización y clasificación. La geomorfología contribuye a esta actividad mediante la selección de los sitios de descripción. El uso de criterios geomorfológicos facilita la escogencia de sitios representativos, independientemente del esquema de muestreo implementado. En el muestreo orientado, los sitios de observación se pre-seleccionan en base a criterios geomorfológicos dentro de unidades delimitadas por interpretación de fotos aéreas o imágenes satelitarias. El muestreo al azar sólo tiene sentido si se aplica en el marco de unidades previamente establecidas con criterios geomorfológicos. Un esquema de muestreo

aleatorio es más objetivo, pero genera frecuentemente una cantidad de perfiles poco representativos y, por esta razón, resulta más costoso.

El muestreo sistemático se basa en el esquema de la cuadrícula. Su aplicación como técnica operacional a todo un proyecto de levantamiento de suelos requiere demasiado tiempo y resulta excesivamente costoso. Es útil cuando se aplica localmente para estimar la variabilidad espacial de los suelos dentro y entre una selección de unidades de mapeo y para establecer su grado de pureza. Comparando dos mapas temáticos de suelo, uno derivado de un mapa de suelo convencional y otro obtenido por kriging de datos puntuales en cuadrícula, Bregt et al. (1987) muestran que la pureza promedio de las unidades de mapeo, determinada en base a tres criterios (espesor del horizonte A, profundidad a la grava, y profundidad a la arcilla con pedregones), es de 77% en ambos casos, con menor dispersión en el primer caso (72-82%) que en el segundo (69-85%). La interpretación de la variabilidad geoestadística de los suelos resulta más acertada cuando se utilizan criterios geomorfológicos.

- La delimitación de suelos se basa en la interpretación de fotos aéreas e imágenes satelitarias, el uso de modelos digitales de elevación, y la prospección de campo. Los rasgos que detecta el sensoramiento remoto son esencialmente rasgos de la superficie del terreno, los cuales son a menudo de naturaleza geomorfológica. Por lo tanto, lo que se observa o se interpreta en documentos de sensoramiento remoto son características de la parte epigea de las geoformas y de los suelos. La parte hipogea es mayormente invisible y algunas de sus características pueden ser detectadas a distancia sólo con técnicas especiales (p.e. con GPR). Esto es eficiente cuando se dispone de una representación tridimensional del paisaje geomorfológico, lo cual puede obtenerse por interpretación estereoscópica de fotos aéreas o de imágenes satelitarias (p.e. SPOT, Aster con 15 m resolución) o en base a una combinación de imágenes (p.e. Landsat con 90 m resolución) y de modelos de elevación o de terreno.

En este contexto, la geomorfología contribuye a las siguientes tareas relacionadas con la delineación de los suelos: (1) la selección de áreas-muestra, transeptos, y travesías; (2) el trazado de los límites de las unidades cartográficas de suelo en base a las relaciones conceptuales entre geoformas y suelos (factores de formación comunes; paisaje geopedológico); y (3) la identificación, el monitoreo temporal, y la explicación de la variabilidad espacial de los suelos.

La geoforma controla parte de la variabilidad de los suelos, esencialmente las variaciones sistemáticas. La geomorfología provee criterios para segmentar el continuum del pedopaisaje en unidades discretas relativamente homogéneas (Fig. 3.5). Estas unidades son marcos adecuados para estimar la variabilidad espacial de propiedades de suelo mediante análisis geoestadístico (Saldaña et al., 1998; Kerry & Oliver, 2011). Las mismas han sido utilizadas también como unidades de referencia para aplicar métricas de análisis espacial, incluyendo índices de heterogeneidad, diversidad, proximidad, tamaño y configuración, con fines de describir cuantitativamente los patrones de distribución de suelos a diversos niveles categóricos de geoforma (paisaje, relieve, forma de terreno) (Saldaña et al., 2011).

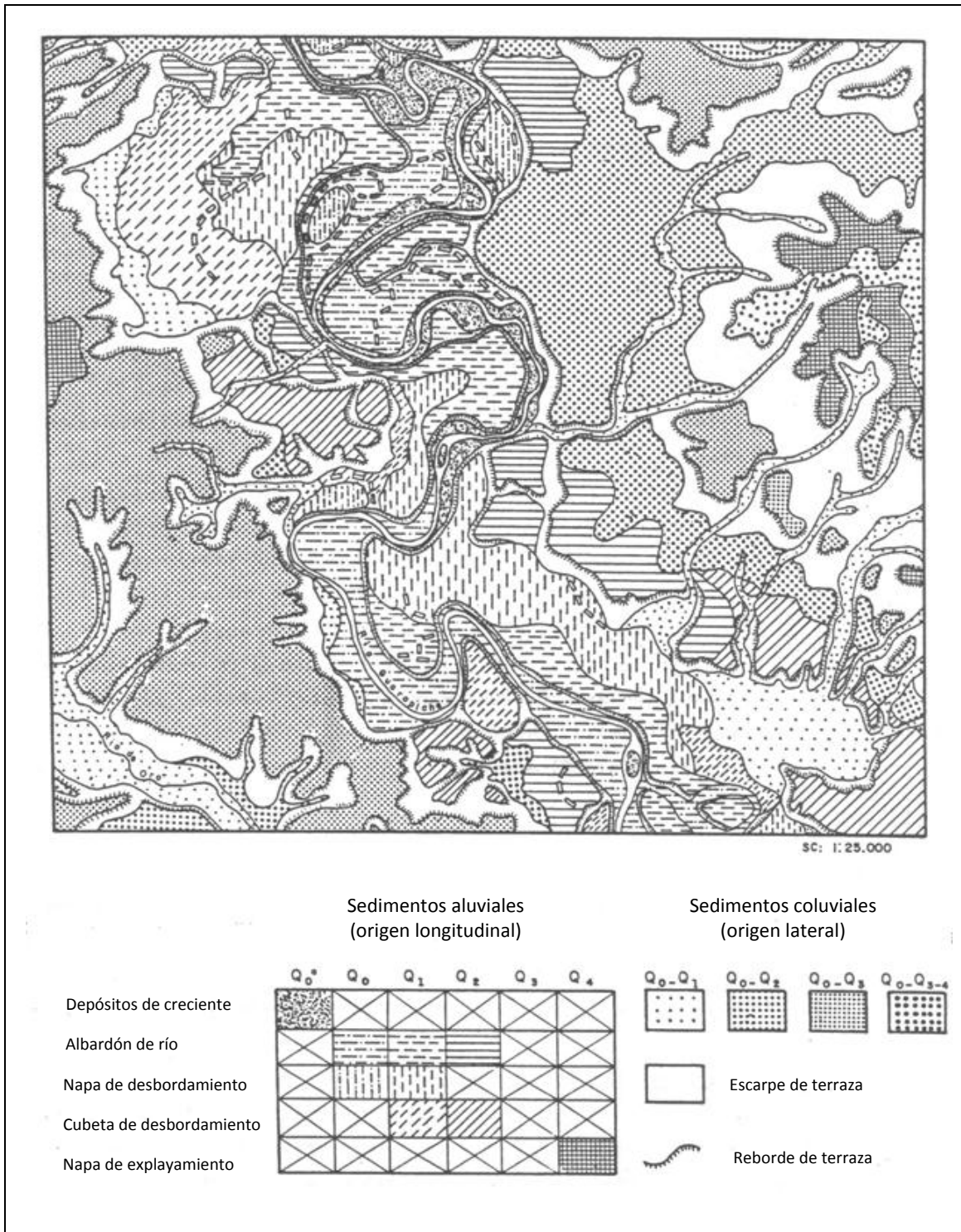


Fig. 3.5 Porción del valle del río Guarapiche, Venezuela, mostrando una cronosecuencia de terrazas anidadas que abarca todo el Cuaternario (de Q₀ a Q₄). Los límites de las unidades cartográficas son esencialmente de naturaleza geomorfológica, mientras que su contenido es de naturaleza pedológica (consociaciones y asociaciones de series de suelo, no mostradas aquí). Extracto del mapa de suelos levantado a escala de 1:25.000 (Zinck & Urriola, 1971).

Igualmente, la integración geoforma-suelo facilita la extrapolación de información obtenida en áreas-muestra a áreas no-visitadas o áreas de difícil acceso, utilizando entre otras técnicas la de redes neurales artificiales y la de árboles de decisión (Moonjun et al., 2010). Tomar la geoforma como unidad cartográfica disminuye, por lo general, la amplitud de variación de las propiedades pedológicas lo suficiente como para facilitar las interpretaciones prácticas con fines de uso de las tierras.

3.3.2.2 Génesis y estratigrafía de suelos

Los procesos y ambientes geomorfológicos se utilizan respectivamente como factores y marcos espaciales para explicar la formación y la evolución de los suelos. El contexto geomorfológico, a través del material parental (productos de alteración o de deposición), del relieve (pendiente, altura relativa, exposición), de las condiciones de drenaje, y de la morfogénesis, controla una buena parte de los factores y procesos de formación de suelos. En retorno, las propiedades de los suelos influyen los procesos geomorfológicos. Hay co-evolución entre el dominio geomorfológico y el pedológico. A su vez, la historia geomorfológica controla la estratigrafía de los suelos, mientras que la datación de los suelos (cronosecuencias) contribuye a reconstruir la evolución del paisaje geomorfológico. El uso de métodos y técnicas de investigación geomorfológica contribuye a dilucidar problemas de génesis y estratigrafía de suelos.

La Fig. 3.6 muestra un modelo de relaciones geopedológicas en una cronosecuencia de terrazas aluviales anidadas en el valle del río Guarapiche, Venezuela (Zinck, 1970). La geoforma, aquí al nivel de forma de terreno (ver Tabla 3.1), controla la formación de suelos en dos direcciones. Por una parte, la edad relativa del material geomorfológico, o sea del material parental de los suelos, escalonada desde el Holoceno (Q0) hasta el Pleistoceno inferior (Q4), influye directamente el grado de desarrollo pedogenético desde el nivel de Entisol hasta el nivel de Ultisol. Por otra parte, la naturaleza de la posición geomorfológica influye estrechamente el tipo de desarrollo pedogenético, distinguiendo entre suelos bien drenados con régimen ústico en posición de albardón de orilla (banco) y suelos mal drenados con régimen áquico en posición de cubeta (bajío).

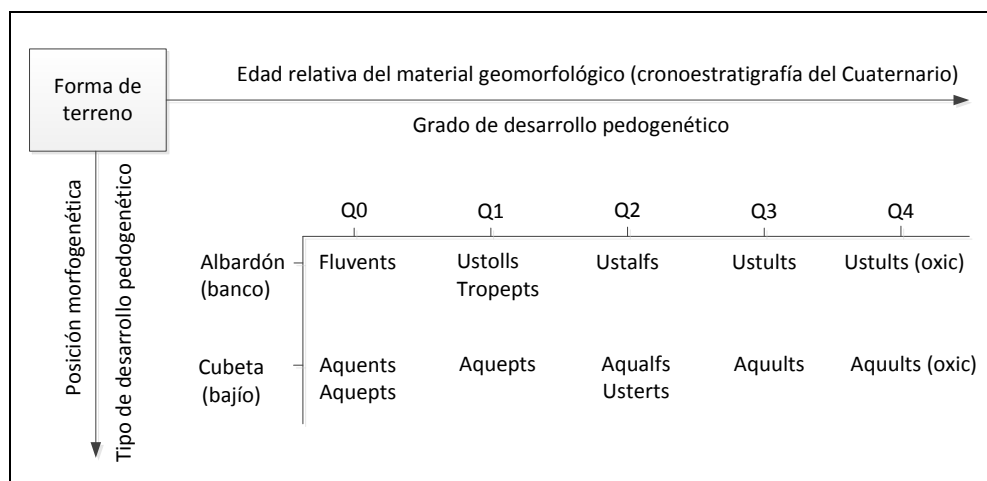


Fig. 3.6 Modelo de relaciones geopedológicas en suelos aluviales del valle del río Guarapiche, Venezuela (Zinck, 1970).

3.3.3 Integración geopedológica: un ensayo de validación numérica

3.3.3.1 Materiales y método

La contribución que aporta la geomorfología al conocimiento de los suelos y, en particular, a su distribución espacial en el marco del levantamiento de suelos puede considerarse como eficiente si, entre otras cosas, la misma facilita y mejora la agrupación de los suelos en unidades cartográficas relativamente homogéneas. Para substanciar la integración geopedológica y validar cuantitativamente las relaciones entre geoforma y suelo, se implementó la técnica de la clasificación numérica, que permite comparar el rendimiento de dos sistemas de clasificación de objetos en relación a un sistema de referencia (Sokal & Sneath, 1963).

Utilizando información suministrada por un levantamiento de suelos semi-detallado (1:25.000) en el valle del río Guarapiche, noreste de Venezuela (Zinck & Urriola, 1971), se elaboró un ensayo de clasificación numérica de las unidades geopedológicas para estimar la eficiencia respectiva de la clasificación de suelos y de la clasificación de geoformas en constituir grupos consistentes por comparación con los grupos fenéticos (Zinck, 1972). Las unidades geopedológicas se distribuyen en una cronosecuencia de terrazas anidadas, que abarca todo el Cuaternario desde el Pleistoceno inferior (Q4) hasta el Holoceno (Q0). Los suelos se formaron mayormente a partir de depósitos fluviales de origen longitudinal, provenientes de la cuenca alta del río, y secundariamente a partir de depósitos coluviales de origen local (Fig. 3.5).

Se escogieron 26 pares de pedones-morfones modales, representativos de las series de suelo mapeadas, y se seleccionaron 24 propiedades mecánicas, físicas y químicas para caracterizar el material pedológico (solum) y el material geomorfológico (material parental). Se compararon las unidades pedológicas clasificadas a nivel de subgrupo (Soil Survey Staff, 1960, 1967) y las unidades geomorfológicas clasificadas por facies deposicional y edad relativa. El tratamiento de los datos implementó técnicas y métodos disponibles en la década de 1960-70 cuando se realizó el ensayo: (1) el método de Hole & Hironaka (1960) para estimar el índice de semejanza entre pares de unidades y elaborar la matriz de semejanza, y (2) el método del grupo-par no-ponderado y el método de los promedios aritméticos descritos en Sokal & Sneath (1963) para formar los agrupamientos de unidades, construir el dendrograma de la Fig. 3.7, y calcular las semejanzas medias.

3.3.3.2 Resultados

La clasificación numérica generó cuatro agrupaciones fenéticas con un número variable de unidades geopedológicas (combinaciones suelo-geoforma). Los suelos se reportan como clases a nivel de subgrupo. Las geoformas se identifican por su posición deposicional a nivel de forma de terreno, su edad relativa, y la textura del material sedimentario (o sea el material parental de los suelos).

- Grupo 1: seis unidades geopedológicas que tienen en común las siguientes características: posición baja de cubeta de desbordamiento (tres) o de decantación (tres), mal drenaje (cinco unidades con régimen áquico), y texturas finas (arcillo-limosa o arcillosa), independientemente de la cronoestratigrafía de los materiales parentales (edad relativa variable de Q1 a Q3) y del grado de desarrollo de los suelos (un Vertisol, dos Inceptisoles, un Alfisol, dos Ultisoles).

- Grupo 2: seis unidades geopedológicas que tienen en común las siguientes características: posición media a alta de albardón de orilla (dos), de napa de desbordamiento (dos), y de cubeta de desbordamiento (dos), buen drenaje, texturas mayormente francosas y limosas, suelos de desarrollo incipiente a moderado (un Entisol, dos Inceptisoles, tres Mollisoles), todos formados a partir de materiales recientes a relativamente recientes (Q0 y Q1).
- Grupo 3: siete unidades geopedológicas que tienen en común las siguientes características: posición media a alta de explayamiento (eje, napa, y de ruptura), drenaje bueno a moderadamente bueno, texturas franco-arenosas y franco-arcillo-arenosas, suelos de avanzado grado de desarrollo (un Alfisol, seis Ultisoles), todos formados a partir de materiales viejos (Q3 y Q4).
- Grupo 4: siete unidades geopedológicas cuyas texturas predominantemente arenosas (areno-francosa y franco-arenosa) controlan el grado de desarrollo incipiente de los suelos (cinco Entisoles incluyendo tres Psamments, dos Inceptisoles); los suelos ocurren en una variedad de posiciones deposicionales (brazo deltáico, napa de explayamiento, glacis coluvial) y de unidades cronoestratigráficas (desde Q0 hasta Q4; los depósitos coluviales siendo de formación continua, diacrónica).

En todos los casos, el factor que más estrechamente controla las agrupaciones de unidades geopedológicas es de naturaleza geomorfológica:

- Grupo 1: la facies deposicional de cubeta y la posición baja en el paisaje.
- Grupo 2: la edad relativamente reciente de los materiales parentales (Pleistoceno superior a Holoceno).
- Grupo 3: la edad avanzada de los materiales parentales (Pleistoceno medio temprano y Pleistoceno inferior).
- Grupo 4: las texturas gruesas de los materiales parentales.

3.3.3.3 Conclusión

Las similitudes medias a nivel de gran grupo de suelos (73%) y de forma terreno (75%) son comparables a la similitud media de los grupos numéricos (75%), lo que indica que los tres modos de clasificación son relativamente eficientes en generar agrupaciones consistentes. Los grupos 2 y 3 son más homogéneos que los grupos 1 y 4. Los factores que más contribuyen a diferenciar los cuatro grupos y a generar diferencias dentro de los grupos heterogéneos son atributos de las geoformas, en particular su origen deposicional (con su granulometría), su posición en el paisaje, y su edad relativa. Esto básicamente corresponde a tres de los cinco factores de formación de suelos: material parental, topografía-drenaje, y tiempo, que resumen la contribución de la geomorfología a la pedología y constituyen el cimiento de la geopedología.

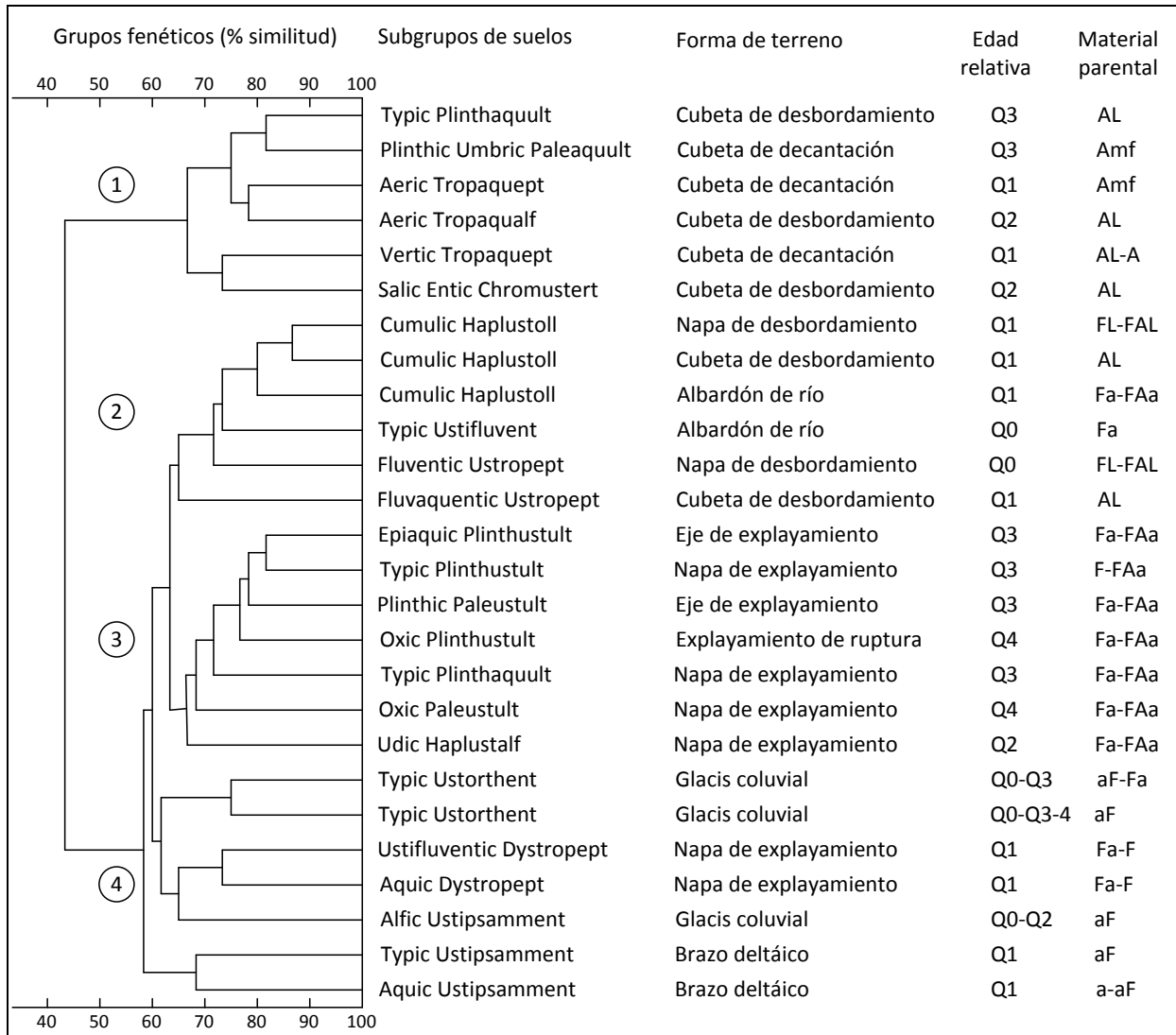


Fig. 3.7 Dendrograma mostrando cuatro grupos de unidades geopedológicas; valle del río Guarapiche, Venezuela (Zinck, 1972).

Edad relativa del material geomorfológico (i.e material parental de los suelos) por orden creciente desde Q0 (Holoceno) hasta Q4 (Pleistoceno inferior).

Textura del material parental: a = arenosa; F = francosa; L = limosa; A = arcillosa; mf = muy fina.

3.4 Relaciones operacionales

3.4.1 Introducción

Poner en práctica las relaciones conceptuales y metodológicas entre geofoma y suelo puede realizarse básicamente de dos maneras: (1) mediante estudios en sitios representativos, generalmente de poca extensión, para analizar detalladamente las relaciones genéticas entre geofomas y suelos (estudios científicos, mayormente en el marco académico), y (2) mediante el inventario de suelos como recurso con miras a establecer la cartografía de suelos de un territorio

(área de proyecto, región, todo un país) y evaluar su potencial y sus limitaciones de uso (estudios prácticos, en el marco técnico).

En lo que sigue se analizan las relaciones operacionales en el marco del inventario de suelos, desde la generación de la información geopedológica mediante levantamiento en el campo hasta su interpretación mediante evaluación de tierras con fines de usos múltiples. En este proceso, la geomorfología puede jugar un papel relevante. La importancia operacional de la geomorfología se refiere a la cantidad de información agregada a la información del levantamiento de suelos y la estimación de esta cantidad, cuando se incorpora la geomorfología en las etapas sucesivas de la operación de levantamiento.

El levantamiento de suelos es un sistema de información, el cual puede ser representado por un modelo que describe su estructura y su funcionamiento usando análisis de sistema, y que permite estimar la eficiencia de la contribución de la geomorfología al levantamiento de suelos. La oportunidad de realizar un ensayo de esta naturaleza se presentó en el marco del proyecto de levantamiento de suelos semi-detallado de la cuenca del Lago de Valencia, Venezuela (Zinck, 1977). Se trata de una región de aproximadamente 1000 km² de tierras planas, tradicionalmente utilizadas con agricultura intensiva de riego, pero cada vez más expuestas a conflictos de uso a consecuencia de un rápido e incontrolado desarrollo urbano-industrial. La magnitud del área de estudio, el nivel de detalle del levantamiento, la multiplicidad de los objetivos a satisfacer, y la cantidad de personal involucrado, fueron factores decisivos en el diseño del estudio. Hubo que elaborar un marco de referencia para planificar las actividades, establecer el calendario de ejecución, y seleccionar la variedad de interpretaciones de suelo requeridas para suministrar la información necesaria a la planificación del uso de las tierras y para contribuir a la solución de los conflictos de uso.

3.4.2 La estructura del levantamiento de suelos

Procediendo por iteración, se obtuvo una estructura de modelo con cinco niveles categóricos, representada en la Fig. 3.8. Los tres niveles inferiores conforman el dominio propiamente dicho del levantamiento de suelos, su área interna, donde se produce la información. Los dos niveles superiores representan la esfera de influencia del levantamiento de suelos, su área externa, donde se implementa la información generada. Cada nivel responde a un concepto genérico y a cada nivel se realiza una serie de tareas (Tablas 3.2 a 3.6).

- Nivel 1: tareas elementales, que consisten en la generación de los datos básicos, incluyendo la interpretación de fotos aéreas, imágenes satelitarias y MDE, la descripción y el muestreo de suelos, las determinaciones de laboratorio, y la colecta de datos agronómicos, sociales, y económicos.
- Nivel 2: tareas intermedias, que consisten en la síntesis de la información, incluyendo la caracterización de los componentes ambientales, la caracterización y cartografía de las geoformas y de los suelos, y la descripción de los tipos de uso y de las prácticas de manejo de las tierras.
- Nivel 3: tareas finales, que consisten en la interpretación de la información con fines múltiples, incluyendo la interpretación genética de los suelos y de sus ambientes de

formación, la evaluación de las tierras con fines agrícolas, ingenieriles, sanitarios, recreacionales y estéticos, y el mejoramiento profesional de los geopedólogos.

- Nivel 4: objetivos externos primarios, que corresponden a proyectos de planificación biofísica en el ámbito local y regional, incluyendo ordenamiento del territorio, planificación de los espacios agrícolas y no-agrícolas, planificación de la producción agrícola, y formulación de políticas y planes de levantamiento de suelos.
- Nivel 5: objetivos externos finales, que corresponden a las preocupaciones de la sociedad regional (o nacional) en términos de uso agrícola, uso urbano-industrial, uso de espacios comunitarios, y creación de conocimiento científico y mejoramiento de las capacidades profesionales.

3.4.3 El funcionamiento del levantamiento de suelos

El funcionamiento del sistema se refiere a los flujos de información que circulan a través del levantamiento de suelos. Para identificar la dirección de los flujos de información y evaluar su intensidad, se estableció una serie de matrices que relacionan los niveles consecutivos del modelo. Las matrices fueron sometidas al juicio de un equipo de diez expertos en levantamiento de suelos, los cuales identificaron las relaciones entre temas de niveles consecutivos y evaluaron la intensidad de estas relaciones mediante un procedimiento de rating usando dos rangos: 0-9 para el área interna y 0-2 para el área externa. Las estimaciones individuales fueron promediadas para obtener la dirección y la intensidad de los flujos de información. Esto resultó en un complejo grafo de flujos que se representa en forma simplificada en la Fig. 3.8, indicando la orientación y la cantidad de los flujos (rutas críticas) que conectan cada tema con otros. La combinación de los dos criterios de orientación y cantidad de flujos permitió establecer un ranqueo de las tareas del levantamiento de suelos de acuerdo a su importancia en generar y/o transmitir información.

3.4.4 La contribución de la geomorfología al levantamiento de suelos

La contribución directa de la geomorfología ocurre en los niveles 1 y 2.

- Nivel 1: la geomorfología contribuye a las tareas de fotointerpretación, selección de áreas-muestra, identificación de sitios representativos, y delineación de las unidades geopedológicas.
- Nivel 2: la síntesis geomorfológica es uno de los temas más fecundos del sistema por el número de flujos emitidos y el número de temas alcanzados en el nivel 3 (30 temas). En base a este rendimiento, la síntesis geomorfológica clasificó como el tema más eficiente del nivel 2, junto con el tema de la topografía.

En suma, la incorporación de la geomorfología permite agilizar y mejorar el levantamiento de suelos. Lamentablemente, este último no tiene hoy día prioridad en las agendas políticas, a pesar de los severos riesgos de degradación del recurso suelo.

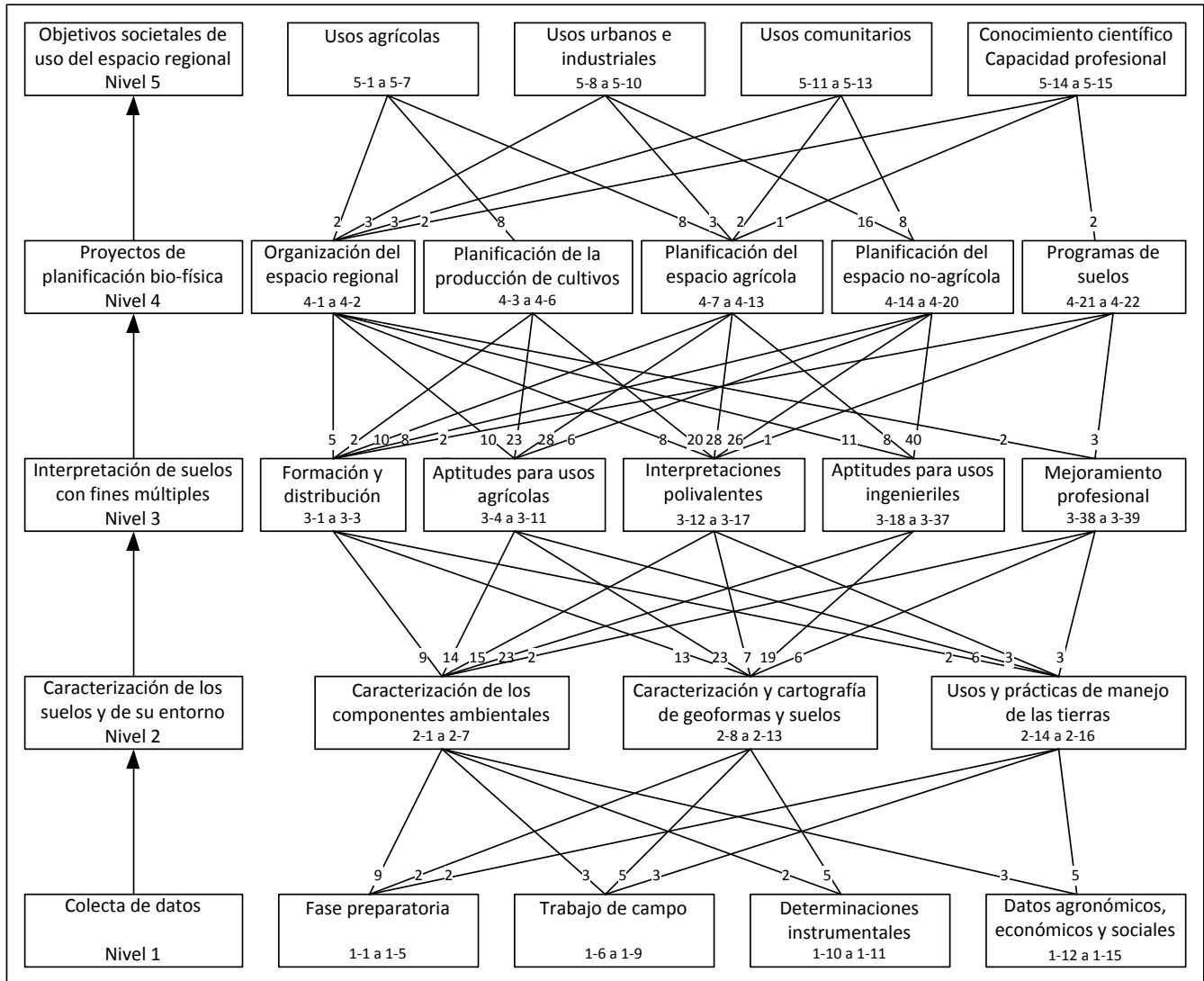


Fig. 3.8 Grafo del inventario de suelos como sistema de producción, interpretación y difusión de información. Los números en las casillas se refieren a los temas desglosados en las Tablas 3.2 a 3.6. Los números insertados en los arcos señalan las cantidades de rutas críticas por las cuales circula información de un nivel al siguiente (adaptado de Zinck, 1977).

3.5 Conclusión

En conclusión, además de promover la integración entre geomorfología y pedología, la geopedología focaliza en la contribución de la primera a la segunda para la cartografía de los suelos y la comprensión de su formación. Esta contribución reposa en lo siguiente:

- Las geoformas y otros rasgos geomorfológicos, incluyendo procesos de formación, agradación y degradación, se reconocen con cierta facilidad por observación directa en el campo e indirecta en documentos de sensoramiento remoto (fotografías aéreas e imágenes satelitarias) y en productos derivados de ellos (MDE). Documentos que permiten visión estereoscópica tienen la ventaja de proveer la tercera dimensión de las geoformas en términos

de volumen y variaciones topográficas. A este respecto, las fotografías aéreas son todavía los documentos más fieles y explícitos para la interpretación del relieve a gran y mediana escalas.

- Muchas geoformas tienen límites relativamente discretos, facilitando su delimitación. Esto es particularmente el caso de las geoformas construidas en los sistemas deposicionales (p.e. formas de origen aluvial, glaciar, eólico) y, en menor grado, en los sistemas morfogenéticos controlados por procesos endógenos (p.e. formas de origen volcánico, estructural). Las formas de vertiente muestran frecuentemente variaciones continuas, las cuales pueden ser aproximadas mediante los modelos de facetas de vertiente.
- Las geoformas se distribuyen generalmente en el paisaje en sistemas controlados por un agente principal de formación (p.e. agua, hielo, viento). De lo anterior resultan familias de geoformas asociadas en patrones que se repiten en el paisaje. Esto facilita extrapolar información en áreas de mapeo y predecir la ocurrencia de unidades geopedológicas en sitios no-visitados.
- Las geoformas son relativamente homogéneas a un determinado nivel categórico y con respecto a las propiedades que son diagnósticas a este nivel. El componente hipogeo, correspondiente a los rasgos morfogenéticos y morfoestratigráficos del material, es usualmente más homogéneo que el componente epigeo, correspondiente a los rasgos morfográficos y morfométricos de la superficie del terreno. Las variaciones sistemáticas de la cobertura geopedológica son frecuentemente de orden geomorfológico.
- El contexto geomorfológico es un marco importante de génesis y evolución de suelos, cubriendo tres de los cinco factores clásicos de formación de suelos, a saber las características del conjunto relieve-drenaje, la naturaleza del material parental, y la edad de la geoforma. Muchos suelos no se forman directamente a partir del substrato de roca dura, sino a partir del material geomorfológico (p.e. sedimentos no-consolidados, materiales de vertiente en traslación, regolitas, alteritas).
- En síntesis de lo anterior, el análisis geomorfológico permite segmentar el continuo del paisaje fisiográfico en unidades espaciales que son marcos (1) para interpretar la formación de suelos junto con los factores de biota, clima y actividad humana, (2) para componer las unidades cartográficas de suelo, y (3) para analizar las variaciones espaciales de las propiedades pedológicas.

El enfoque geopedológico es esencialmente descriptivo y cualitativo. Suelos y geoformas se consideran como cuerpos naturales, que pueden ser descritos por observación directa en el campo y por interpretación de fotografías aéreas, imágenes satelitarias, mapas topográficos, y modelos digitales de elevación. El enfoque reposa en una combinación de conocimiento geomorfológico y pedológico básico, incrementado por la experiencia, en particular la experiencia adquirida por la práctica de la observación de campo. El conocimiento experto, cuya adquisición y desarrollo constituyen un proceso inherente a todas las sociedades humanas en evolución, representa una fuente de riqueza cognitiva que se intenta formalizar hoy día antes de que desaparezca. El conocimiento experto ha sido considerado como un factor de subjetividad (Hudson, 1992) y de sesgo personal (McBratney et al., 1992) en la práctica convencional del levantamiento de suelos, en contraste con el mapeo pedométrico (digital) de los suelos, el cual sería más objetivo (Hengl, 2003). Geopedología es un enfoque convencional con la particularidad y ventaja que sesgo y subjetividad pueden ser solventados, por lo menos parcialmente, por el uso sistemático e integrado de criterios geomorfológicos. Las geoformas proveen un marco cartográfico comprensivo para el mapeo de suelos, que va más allá que la

simple caracterización morfométrica del terreno. Sin embargo, ambas modalidades, la cualitativa y la cuantitativa, pueden ser útilmente combinadas. Las unidades geopedológicas pueden servir de marco para estudios geoestadísticos más detallados y para el control espacial de datos digitales midiendo atributos de suelos y geoformas.

Tabla 3.2 Temas del nivel 1: tareas elementales del estudio de suelos; recolección de la información (Zinck, 1977).

1-1	Recopilación y análisis de la información no-pedológica existente.
1-2	Reconocimiento foto-campo, análisis de la información pedológica existente, leyenda de identificación de los suelos.
1-3	Fotointerpretación generalizada al 1:50.000, identificación de macro-unidades físico-naturales.
1-4	Selección de las áreas-muestra.
1-5	Fotointerpretación detallada al 1:25.000, identificación de las geoformas, ubicación de las áreas-muestra.
1-6	Levantamiento de las áreas-muestra.
1-7	Observaciones de control, ajustes de la fotointerpretación.
1-8	Composición de las unidades cartográficas, leyenda descriptiva de los suelos.
1-9	Descripción de hoyos y calicatas de suelos representativos.
1-10	Determinaciones físicas de campo.
1-11	Determinaciones de laboratorio.
1-12	Encuestas sobre rendimientos de cultivos, costos de producción y de desarrollo.
1-13	Encuestas sobre prácticas de riego.
1-14	Encuestas sobre las demás prácticas culturales.
1-15	Evaluación de los costos de deforestación, nivelación, drenaje, despiedre.

Tabla 3.3 Temas del nivel 2: tareas intermedias del estudio de suelos; síntesis de la información sobre caracterización de los suelos y de su medio ambiente (Zinck, 1977).

2-1	Caracterización del clima.
2-2	Caracterización de la hidrografía e hidrología de superficie.
2-3	Caracterización de las obras hidráulicas existentes.
2-4	Caracterización de la calidad del agua.
2-5	Caracterización de la topografía.
2-6	Caracterización de la geología e hidrogeología.
2-7	Caracterización de la geomorfología e hidrogeomorfología.
2-8	Cartografía geopedológica y elaboración del mapa de suelos.
2-9	Caracterización morfológica de los suelos.
2-10	Caracterización química de los suelos.
2-11	Caracterización mineralógica de los suelos.
2-12	Caracterización física de los suelos.
2-13	Caracterización mecánica de los suelos.
2-14	Uso actual de las tierras.
2-15	Prácticas y niveles de manejo.
2-16	Mejoramientos requeridos y su factibilidad.

Tabla 3.4 Temas del nivel 3: tareas finales del estudio de suelos; interpretaciones con fines múltiples (Zinck, 1977).

-
- 3-1 Caracterización global del medio natural (estudio integrado).
 - 3-2 Distribución espacial de los suelos (corología de suelos).
 - 3-3 Génesis y clasificación taxonómica de los suelos.
 - 3-4 Aptitudes de las tierras para usos de secano.
 - 3-5 Aptitudes de las tierras para usos bajo riego.
 - 3-6 Aptitudes de las tierras para plantas ornamentales y hortalizas de huerto.
 - 3-7 Productividad agrícola (productividad de las tierras).
 - 3-8 Costos de desarrollo para usos agrícolas de las tierras.
 - 3-9 Fertilidad actual de las tierras.
 - 3-10 Salinidad de las tierras.
 - 3-11 Limitaciones de las tierras para el uso de implementos agrícolas mecanizados.
 - 3-12 Caracterización del drenaje natural.
 - 3-13 Drenabilidad de las tierras.
 - 3-14 Morfodinámica actual (erosión, sedimentación).
 - 3-15 Erodabilidad de las tierras.
 - 3-16 Requerimientos de riego de las tierras.
 - 3-17 Disponibilidad de agua.
 - 3-18 Fuentes de material para capa arable.
 - 3-19 Fuentes para arena y grava.
 - 3-20 Fuentes par material de relleno de carreteras.
 - 3-21 Limitaciones para el trazado de carreteras.
 - 3-22 Limitaciones para cortes de carretera.
 - 3-23 Limitaciones para colocación de tuberías y cables.
 - 3-24 Limitaciones para fundaciones de edificios bajos y casas.
 - 3-25 Limitaciones para fundaciones de terraplén.
 - 3-26 Limitaciones para áreas habitacionales.
 - 3-27 Limitaciones para calles y estacionamientos.
 - 3-28 Limitaciones para excavación de canales.
 - 3-29 Limitaciones para construcción de lagunas en granjas.
 - 3-30 Limitaciones para construcción de diques.
 - 3-31 Limitaciones para áreas de filtración de pozos sépticos.
 - 3-32 Limitaciones para lagunas de oxidación.
 - 3-33 Limitaciones para botaderos de basura.
 - 3-34 Limitaciones para sitios de esparcimiento (picnic, áreas de juego).
 - 3-35 Limitaciones para césped, terrenos de golf, paisajismo.
 - 3-36 Limitaciones para terrenos de camping.
 - 3-37 Limitaciones para campos deportivos.
 - 3-38 Entrenamiento del personal técnico.
 - 3-39 Publicaciones científicas, conferencias, enseñanza.
-

Tabla 3.5 Temas del nivel 4: proyectos de planificación y de desarrollo en el ámbito regional, a cargo de diversos organismos (Zinck, 1977).

-
- 4-1 Correlación de suelos.
 - 4-2 Zonificación del uso de las tierras en el espacio regional (arbitrajes entre usos competitivos).
 - 4-3 Zonificación ecológica de cultivos.
 - 4-4 Selección de sistemas de cultivos y de rotaciones.
 - 4-5 Substitución de cultivos en el tiempo y espacio.
 - 4-6 Aumento de la productividad de las tierras (rendimientos).
 - 4-7 Determinación de tamaños de parcelas.
 - 4-8 Planificación y manejo del riego.
 - 4-9 Saneamiento de suelos mal drenados.
 - 4-10 Habilitación de suelos salinos.
 - 4-11 Manejo de suelos pesados (arcillosos).
 - 4-12 Técnicas de conservación de suelos.
 - 4-13 Extensión agrícola.
 - 4-14 Planificación urbana y peri-urbana (plan director de zonificación).
 - 4-15 Aducción de agua y gas.
 - 4-16 Control de la contaminación de suelos y aguas.
 - 4-17 Eliminación o reciclaje de desechos industriales, urbanos y agrícolas.
 - 4-18 Canalización y excavación de efluentes.
 - 4-19 Planificación de vías de comunicaciones.
 - 4-20 Desarrollo turístico.
 - 4-21 Formación y mejoramiento profesional.
 - 4-22 Aumento de los conocimientos básicos en pedología y geomorfología.
-

Tabla 3.6 Temas del nivel 5: algunos de los grandes problemas técnicos planteados a la comunidad regional (Zinck, 1977).

-
- 5-1 Agricultura marginal.
 - 5-2 Reforma agraria.
 - 5-3 Procesos de intensificación de la agricultura.
 - 5-4 Incorporación de nuevas áreas a las actividades agropecuarias.
 - 5-5 Suministro de productos agrícolas para consumo humano.
 - 5-6 Suministro de productos agrícolas especiales (flores, cultivos fuera de estación).
 - 5-7 Suministro de materias primas agrícolas a la industria.
 - 5-8 Implantación de industrias.
 - 5-9 Procesos de urbanización (ciudades, centros poblados, residencias secundarias).
 - 5-10 Transporte de personas, productos, energía e información.
 - 5-11 Zonas de esparcimiento y turísticas (cuerpos de agua, áreas recreacionales y deportivas).
 - 5-12 Zonas protegidas (parques, reservas, áreas verdes).
 - 5-13 Conservación, protección y mejoramiento ambiental.
 - 5-14 Aumento de la capacidad técnica de la comunidad regional.
 - 5-15 Aumento de los conocimientos científicos básicos.
-

Capítulo 4

EL PAISAJE PEDOLOGICO: ORGANIZACION DEL MATERIAL SUELO

4.1 Introducción

El material suelo es un material organizado desde el punto de vista estructural, geográfico, y genético. Estructuralmente, el material suelo es multi-escalar, presentando rasgos y propiedades específicas a cada nivel de la escala. Los niveles estructurales sucesivos se organizan en un sistema jerárquico de entidades pedológicas anidadas, o holones, que Haig (1987) ha llamado la holarquía del sistema suelo (Fig. 4.1). Geográficamente, el material suelo no se distribuye al azar en el paisaje, sino que se organiza por patrones de distribución espacial bajo la influencia de los factores de formación de suelos (Fridland, 1974, 1976; Hole & Campbell, 1985). Genéticamente, el material suelo se forma y se desarrolla como un sistema abierto de intercambios y transformaciones de materia y energía (Jenny, 1941; Simonson, 1959).

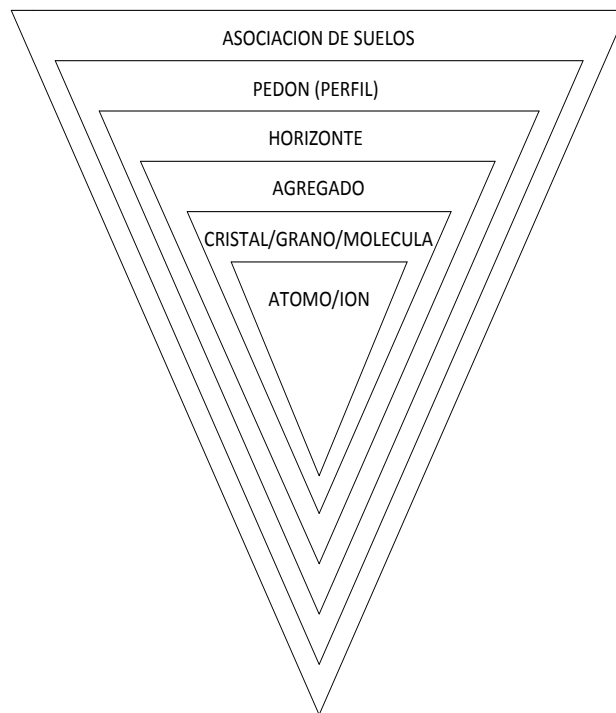


Fig. 4.1 La holarquía del sistema suelo (adaptado de Haigh, 1987).

A continuación, se utiliza un modelo similar a la holarquía de Haig para presentar nociones pedológicas básicas y su relación con el enfoque geopedológico a varios niveles de magnitud (Tabla 4.1). Este esquema de holones anidados es un condensado de pedología abarcando desde las reacciones moleculares hasta el paisaje (geo)pedológico. A cada nivel jerárquico de percepción y análisis del material suelo, se observan características distintas, propias al nivel considerado. El conjunto de las características conforma el cuerpo de suelo en su totalidad. A

cada nivel corresponde un elemento de la holarquía de suelo, una unidad (o rango de unidades) de medición del elemento suelo perceptible a este nivel, y un medio de observación o medición para identificar las características diagnósticas a este nivel. Los niveles se identifican en base a una connotación con la dimensión propia del elemento pedológico en consideración a cada nivel: nano, micro, meso, macro, y mega (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Niveles jerárquicos del sistema pedológico (Zinck, 1988).

Nivel	Unidad	Concepto	Rasgo pedológico
Nano	nm- μ m	Partícula	Reacciones básicas en el suelo
Micro	μ m-mm	Agregado	Estructura micromorfológica
Meso	mm-cm-dm	Horizonte	Diferenciación del material suelo
Macro	m	Pedón	Volumen de suelo para descripción y muestreo
Mega	m-km	Polipedón	Clasificación y mapeo de suelos – Paisaje (geo)pedológico

4.2 Nano-nivel

Al nano-nivel, el material suelo se considera en su forma elemental de moléculas y combinaciones de moléculas en partículas, las cuales se identifican mediante reacciones químicas, o se observan al microscopio electrónico, o se determinan por difracción de rayos X. A este nivel tienen lugar las reacciones básicas del material suelo: químicas, mecánicas y físico-químicas. Estas reacciones controlan procesos y rasgos tales como la meteorización de las rocas, los movimientos en masa y otros fenómenos de erosión, los cuales tienen la particularidad de manifestarse y tener expresión visual a niveles estructurales más altos.

4.2.1 Reacciones químicas

Las reacciones químicas, que tienen lugar en el material suelo y en el material parental (roca dura o sedimento no-consolidado) para transformar éste en material suelo, operan según dos modalidades: (1) por cambios de solubilidad de los compuestos químicos en las sales, carbonatos y silicatos, y (2) por cambios de estructura en los minerales de los óxidos.

- Solución (sales): $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$
- Carbonatación (carbonatos): $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$
 $\text{CaCO}_3 + (\text{HCO}_3^- + \text{H}^+) \Rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
- Hidrólisis (silicatos): $\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{HOH} \Rightarrow \text{HAlSi}_3\text{O}_8 + \text{KOH}$
- Hidratación (óxidos): $2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
- Oxido-reducción (óxidos): $4\text{FeO} + \text{O}_2 \Leftrightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$

La actuación de estos procesos depende, entre otros factores, de las condiciones bioclimáticas, de la naturaleza del sustrato, y del tipo de relieve y de las condiciones de drenaje asociadas. Son procesos básicos de meteorización de las rocas, alteración de los materiales no-consolidados, y formación de material pedogenético. Algunos de estos procesos operan solamente en ambientes

geopedológicos específicos. Por ejemplo, la disolución, concentración y, eventualmente, (re)cristalización de sales, y las geoformas resultantes son típicas de medios halomórficos en zonas costeras y áreas secas continentales. Igualmente, la disolución de los carbonatos bajo la forma de bicarbonatos y la movilización de éstos son procesos típicos de medios calcimórficos, los cuales son responsables, en particular, de la formación de relieve cárstico. La hidrólisis de un feldespato potásico, favorecida por la alta humedad y alta temperatura en ambiente tropical, resulta en la formación de arcilla ácida y de hidróxido de potasio que se pierde por lavado. La hidratación de los óxidos de hierro los hace más frágiles. La oxidación-reducción es un proceso reversible típico de la zona intermareal.

4.2.2 Reacciones mecánicas

Las reacciones mecánicas dependen del modo de arreglo de las partículas. Las partículas gruesas tienen tendencia de empilarse, mientras que el comportamiento de las partículas finas depende de la intensidad de aglomeración. En términos generales, estas reacciones mecánicas de nano-nivel determinan la susceptibilidad de los materiales a los movimientos en masa, los cuales se manifiestan a niveles de percepción más gruesos (de meso a mega).

4.2.2.1 Tipos de empilamiento

Las partículas gruesas, incluyendo los granos de arena y limo grueso (2-0.02 mm), forman pilas cuyo estructura varía de acuerdo al grado de redondeamiento de los granos. Granos redondos (por ejemplo, arenas de origen marino o eólico) presentan generalmente un arreglo cúbico con limitada superficie de contacto y alta porosidad. Esto facilita la penetración del agua en el espacio poroso, creando una importante presión de agua en los poros. Por esta razón, el empilamiento cúbico es en general un arreglo inestable, que facilita el proceso de arenas movedizas (quicksands). Granos de forma menos redondeada (por ejemplo, arenas de origen aluvial o coluvial) muestran generalmente un empilamiento de tipo tetraédrico, con mayor superficie de contacto y menor porosidad, que constituye un arreglo más estable. Granos irregulares y fragmentos de roca tienen tendencia a insertarse los unos en los otros, con alta superficie de fricción que asegura mayor estabilidad al material.

4.2.2.2 Tipos de fábrica

El arreglo de las partículas finas, incluyendo arcilla y limo fino (<0.02 mm), es llamado fábrica. Esta depende de las modalidades y de la intensidad de los contactos entre partículas en el seno de la solución del suelo. Se reconocen varios modos de asociación de partículas en suspensiones de arcilla, con cuatro tipos de fábrica micro-mecánica básicos, que van desde la ausencia total de aglomeración (estado desfloculado) hasta un estado eminentemente aglomerado (estado floculado), y una serie de combinaciones entre estos tipos básicos (Mitchell, 1976) (Fig. 4.2). Los tipos de fábrica están relacionados con el contenido de humedad en el suelo, el cual determina el estado mecánico del material, desde líquido hasta sólido, y los límites de consistencia (límites de Atterberg) entre estados mecánicos. Obviamente, la fábrica depende también de otros factores tales como el tipo de arcilla, el contenido de materia orgánica y la presencia de sales, entre otros.

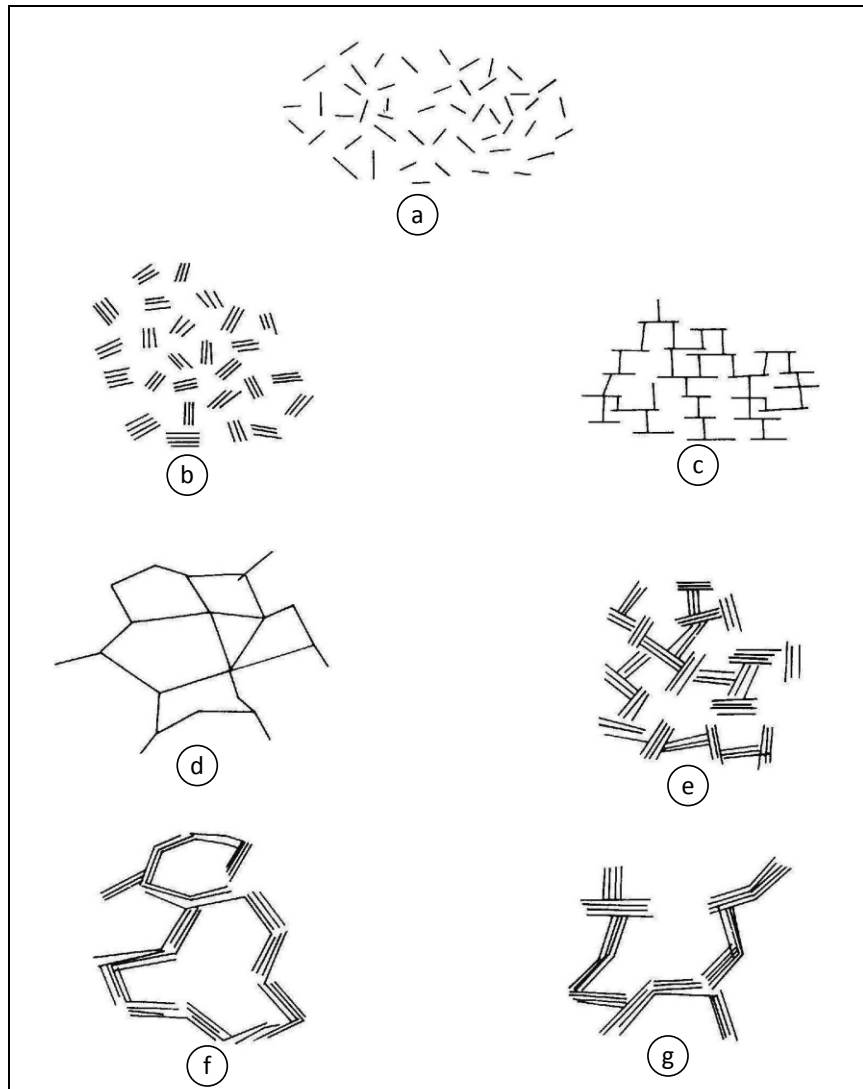


Fig. 4.2 Modos de asociación de partículas en suspensiones de arcilla (según van Olphen, 1963): (a) disperso y defloculado; (b) agregado pero defloculado; (c) flocculado extremidad-a-cara pero disperso; (d) flocculado extremidad-a-extremidad pero disperso; (e) flocculado extremidad-a-cara y agregado; (f) flocculado extremidad-a-extremidad y agregado; (g) flocculado extremidad-a-cara y extremidad-a-extremidad y agregado (tomado de Mitchell, 1976).

En términos geopedológicos, la fábrica del material suelo juega un papel importante en la generación de movimientos en masa (Tabla 4.2).

- Estado defloculado: todas las partículas se encuentran individualmente en suspensión en la solución del suelo, sin interacción entre partículas. Esta condición de fábrica favorece la ocurrencia de coladas de barro (o flujos de lodo).
- Estado disperso: existe una asociación elemental entre partículas individuales, esencialmente contactos entre extremidades y caras de partículas. Esta condición de fábrica crea un riesgo de soliflucción.
- Estado agregado: se presentan asociaciones entre grupos de partículas, una situación que favorece la ocurrencia potencial de deslizamientos.

- Estado floculado: todas clases de contacto entre caras y entre extremidades y caras tienen lugar, originando el arreglo más estable de las partículas en la solución del suelo. De esto resulta una alta resistencia y estabilidad del suelo.

Tabla 4.2 Influencia del tipo de fábrica y de la consistencia del material pedológico en la generación de movimientos en masa (probables).

Tipo de fábrica	Estado del material	Movimiento en masa
Desfloculado	Líquido	Flujo de lodo
Disperso	Plástico	Solifluxión
Agregado	Semi-sólido	Deslizamiento
Floculado	Sólido	Meta-estabilidad
Organización del material pedológico	Propiedad de suelo (consistencia, límites de Atterberg)	Proceso morfogenético (respuesta geomorfológica)

4.2.3 Reacciones físico-químicas

Las reacciones físico-químicas se basan en las propiedades coloidales de las arcillas y del humus. Ambos compuestos tienen cargas electronegativas en las extremidades de las capas y en el espacio entre las capas. Las cargas electronegativas atraen cationes con intensidad decreciente de acuerdo a la secuencia liotrópica de adsorción preferencial, que refleja el número de cargas y el tamaño hidratado de los cationes: $Al^{+++} > Ca^{++} > Mg^{++} > K^+ = NH_4^+ > Na^+$. Los cationes divalentes juegan un papel importante en establecer puentes entre partículas de arcilla, lo cual es un proceso básico para la formación de agregados. Las reacciones físico-químicas que tienen lugar al nano-nivel controlan la fertilidad de suelos, la agregación, la estabilidad estructural y su relación con la susceptibilidad a la erosión.

4.2.4 Relación con geopedología

Las reacciones de nano-nivel determinan los procesos fundamentales de formación, evolución, diferenciación, y también degradación de los suelos. La producción de alteritas (regolitas) por meteorización de las rocas y la transformación de éstas y de las formaciones no-consolidadas en material pedológico dependen en gran parte de las reacciones químicas y físico-químicas que operan en el sustrato, intrínsecamente el dominio de la geomorfología. Las diversas reacciones mecánicas que tienen lugar en el material pedológico y en la regolita de acuerdo a variaciones en el contenido de humedad controlan la morfogénesis por movimientos en masa, cuyo impacto es directamente visible en el paisaje.

4.3 Micro-nivel

A micro-nivel, el objeto de interés es el agregado de suelo, el cual se observa con el uso de un microscopio petrográfico. Este es el dominio de investigación de la micromorfología.

4.3.1 La observación micromorfológica

La observación de un agregado en sección delgada bajo microscopio petrográfico permite caracterizar la estructura micromorfológica de la matriz del suelo, en su componente sólido y en su componente poroso, e identificar rasgos derivados de la adición de material y transformación de la matriz. Algunas de estas características micromorfológicas se muestran esquemáticamente en la Fig. 4.3 y se resumen en la Tabla 4.3.

4.3.2 Los componentes micromorfológicos

Al micro-nivel, el material suelo se divide en dos componentes principales: la matriz de suelo, la cual corresponde al material suelo in situ, y los rasgos pedológicos. Cada uno de estos dos componentes se subdivide en elementos que desempeñan papeles importantes en el funcionamiento del suelo, incluyendo el plasma, el espacio poroso, los granos de esqueleto, y los rasgos pedológicos (Tabla 4.3).

4.3.2.1 Granos de esqueleto

Los granos de esqueleto consisten en:

- Granos minerales, esencialmente granos de arena y limo, los cuales constituyen el material inerte del suelo, sin propiedades coloidales, que domina en los suelos arenosos.
- Fragmentos orgánicos, que son pedazos de material orgánico no-descompuesto, esencialmente fragmentos de hojas y ramas (material fólico), que domina en la hojarasca.

4.3.2.2 Plasma

El plasma constituye la fase activa del material sólido, donde tienen lugar las reacciones químicas y físicoquímicas y que controla la movilidad mecánica de las partículas finas. El plasma está dotado de tres tipos de propiedades: coloidales, de solubilidad y de quelato, las cuales dominan en suelos francos y arcillosos.

- Propiedades coloidales que confieren cargas electronegativas a los minerales de arcilla y al humus.
- Propiedades de solubilidad que permiten a las sales y a los carbonatos de pasar al estado de iones.
- Propiedades de quelato, gracias a las cuales los componentes insolubles (p.e. sesquióxidos de Fe y Al) pueden migrar en asociación con moléculas orgánicas.

4.3.2.3 Poros

Los poros varían en configuración y localización dentro y entre agregados, y por estas razones cumplen con diferentes funciones.

- Los poros de envoltura se localizan alrededor de los agregados y controlan la permeabilidad, con su influencia en el drenaje, y la adhesividad entre agregados.
- Las vesículas son espacios vacíos cerrados, sin función activa.
- Las cámaras son poros abiertos en una de sus extremidades, que conservan humedad aún cuando el suelo parezca seco; son sitios donde se concentra la microfauna (bacterias)

responsable de la descomposición de la materia orgánica, y donde actúan los mecanismos de oxido-reducción responsables del hidromorfismo.

4.3.2.4 Rasgos pedológicos

Los rasgos pedológicos micromorfológicos derivan esencialmente de la adición de material al suelo in situ y/o de la transformación del material pedológico in situ.

- Las adiciones se manifiestan en la forma de películas (cutanes) de material que se moviliza en la solución del suelo desde horizontes eluviales y que se deposita en los poros o en la superficie de los agregados en los horizontes iluviales. De acuerdo a la naturaleza de los constituyentes, se reconocen diferentes tipos de cutanes, incluyendo cutanes de arcilla (argilanes), cutanes de hierro (ferranes), cutanes de manganeso (mangananes), etc.
- Las transformaciones pueden ser de naturaleza (1) física: caras de presión en la superficie de los agregados (stress cutans), causadas por efecto de contracción–expansión; (2) química: concentración local de componentes químicos (Fe_2O_3 , CaCO_3 , SiO_2) en la forma de nódulos y concreciones; y (3) biológica: nódulos fecales, pedotubules.

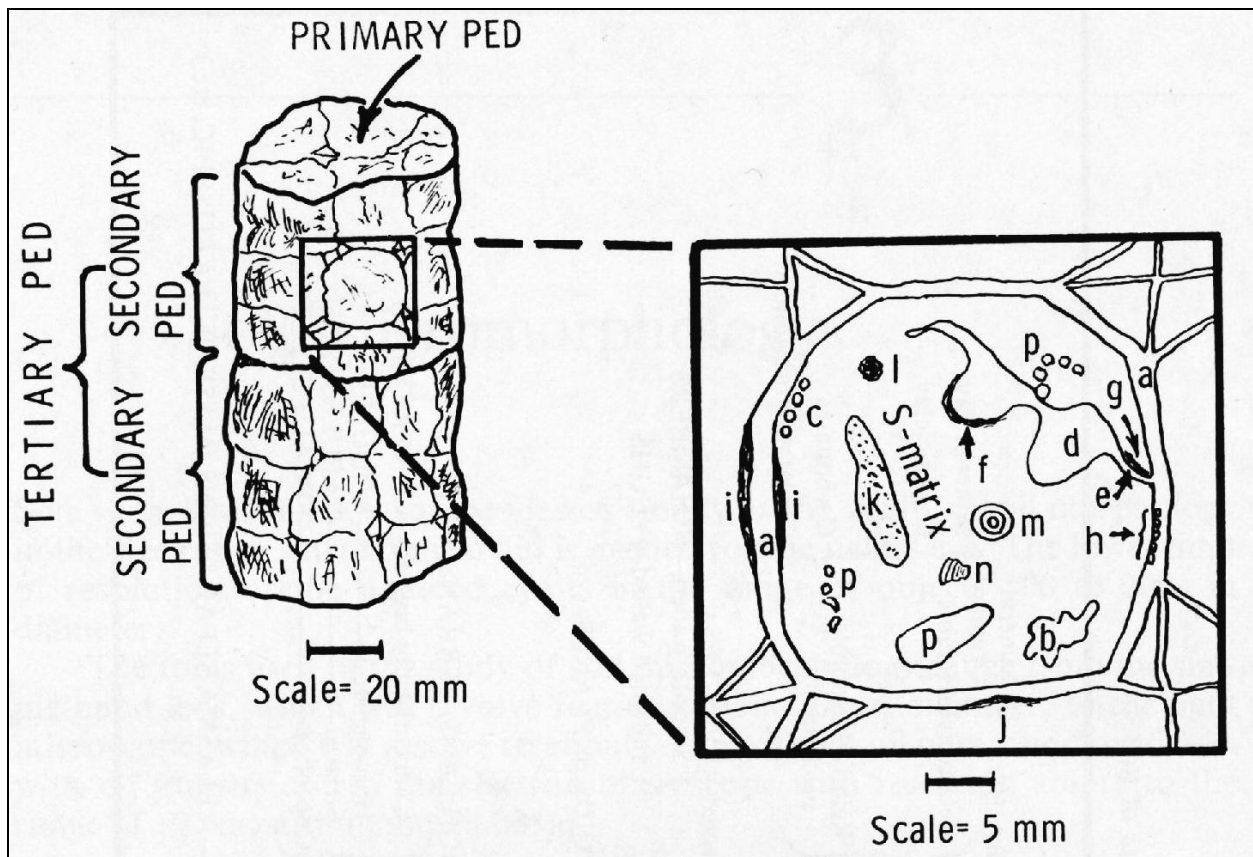


Fig. 4.3 Rasgos micropedológicos. Vacíos: (a) poro de envoltura, (b) vugh, (c) vesícula, (d) cámara, (e) canal. Cutanes: (f) cutan de cámara, (g) cutan de canal, (h) skeleton, (i) argilan o sesquan, (j) cutan de presión. Otros rasgos: (k) pedotubule, (l) nódulo, (m) concreción, (n) papule. Nótese que la matriz de suelo (S-matrix) incluye la masa del plasma, los granos de esqueleto (p), y los vacíos (tomado de Buol et al., 1997).

Tabla 4.3 Organización micromorfológica del material pedológico.

Material suelo	Matriz de suelo (S-matriz) (material suelo in situ)	Sólidos	Granos de esqueleto (material grueso)
			Plasma (material fino)
		Espacio poroso (vacíos, poros)	Vesículas Cámaras, vughs Canales Planes
	Rasgos pedológicos (adición o transformación del material suelo)	Cutanes Glóbulos Túbulos Separaciones en el plasma	

4.3.3 Relación con geopedología

Las características micromorfológicas del suelo representan una importante fuente de información para la interpretación genética de los suelos y para inferir propiedades y cualidades del suelo que controlan procesos geomorfológicos.

- Los rasgos pedológicos, los cuales se refieren a las adiciones y transformaciones que tienen lugar en el material pedológico, son indicadores de la formación y evolución de los suelos. Especialmente la traslocación de sustancias (p.e. iluviación de arcilla) es reveladora de una dinámica pedogenética. El análisis micromorfológico permite también identificar influencias paleo-ambientales en suelos poligenéticos (Jungerius, 1985b) y correlativamente en la evolución del paisaje geomorfológico.
- La matriz de suelo tiene influencia en la geomorfogénesis. La naturaleza del plasma condiciona la estabilidad de los agregados, la cual desempeña un importante papel en los procesos de erosión hídrica y eólica de los suelos. La porosidad controla los movimientos del agua y del aire en el suelo. La microporosidad determina la capacidad de retención de agua en el suelo, mientras que la macroporosidad determina el escurrimiento superficial, la infiltración, y la percolación del agua a través del suelo. Un desbalance entre estos diferentes términos de la dinámica del agua en la superficie y dentro del suelo causa susceptibilidad a la erosión laminar y a los movimientos en masa.

4.4 Meso-nivel

Al meso-nivel, el término de organización del material pedológico es el horizonte, el cual consiste generalmente de una masa de agregados, salvo cuando el material es de grano simple (suelo arenoso) o compacto (suelo arcilloso). Los horizontes resultan de la diferenciación del material originario por los procesos pedogenéticos. El modo de análisis es la observación y descripción directa en el campo.

4.4.1 Definición y designación de horizontes

Un horizonte es una capa de material pedológico con una combinación única de propiedades, diferentes de las propiedades del suelo en los horizontes por encima y por debajo de este horizonte (p.e. color, textura, estructura). El concepto de horizonte se refiere al material pedogenizado y es por lo tanto diferente del concepto de estrato que se refiere al material geogenético (en el horizonte C). Los horizontes se identifican a tres niveles sucesivos mediante una nomenclatura de letras y números.

4.4.1.1 Divisiones primarias: los horizontes maestros

Las divisiones primarias reflejan el efecto de los procesos básicos de formación de suelo, resultando en la diferenciación del material suelo en horizontes maestros. Estos se identifican mediante letras mayúsculas (O, A, E, B, C, R). A este nivel, los horizontes se distinguen de acuerdo a la naturaleza del material y de acuerdo a su posición en el perfil de suelo.

- (a) La distinción del material de acuerdo a su naturaleza permite separar el material orgánico del material mineral. Un material es considerado orgánico (horizonte O) cuando cumple con los siguientes contenidos de carbono orgánico (CO):
- En suelos bien drenados: $CO > 20\%$.
 - En suelos pobremente drenados: $CO \geq 18\%$, si arcilla $\geq 60\%$; $CO \geq 12\%$, si arcilla = 0%; porcentajes de CO proporcionales para contenidos de arcilla intermedios.
- (b) La distinción del material de acuerdo a la posición en el perfil conduce a separar cuatro clases de horizontes/estratos: horizonte superficial, horizonte subsuperficial, subsuelo, y substrato.
- Horizontes superficiales: horizontes A y E
 - *Horizonte A*: es donde ocurre la incorporación de materia orgánica y donde la actividad biológica tiene su máxima expresión; también puede haber algún lavado.
 - *Horizonte E*: es donde operan los procesos de lavado máximo de acuerdo al grado de solubilidad de los constituyentes. Una secuencia generalizada por orden de susceptibilidad decreciente a lixiviación incluye: sales, carbonatos, bases, arcilla, MO, sesquióxidos de Fe y Al. En la situación extrema de lavado sólo queda SiO_2 in situ, confiriéndole al horizonte E un color blanquecino (horizonte álbico).
 - Horizontes subsuperficiales: horizontes B
 - La naturaleza del horizonte B varía de acuerdo al proceso de formación, el cual puede operar:
 - por meteorización del material parental (consolidado o suelto).
 - por iluviación de compuestos químicos (sales, carbonatos, arcilla, MO, sesquióxidos, etc.).
 - por neoformación de minerales de arcilla.
 - Subsuelo: (estrato) C = material parental.
 - Substrato: (capa) R = roca dura.

4.4.1.2 Divisiones secundarias: aspectos genéticos específicos

Las divisiones secundarias informan sobre aspectos genéticos específicos de los horizontes, utilizando letras minúsculas:

- Grado de descomposición de la materia orgánica:
i = material orgánico ligeramente descompuesto (Fibríst).
e = material orgánico medianamente descompuesto (Hemíst).
a = material orgánico altamente descompuesto (Saprist).
- Grado de meteorización del material mineral: w (Bw), r (Cr).
- Acumulación: z, y, k, n, t, h, s, q, por orden de movilidad decreciente de los compuestos químicos, refiriéndose respectivamente a sales más solubles que sulfato de calcio, yeso, carbonatos, arcilla sódica, arcilla, humus, sesquióxidos, y sílice.
- Concentración: c, o, v, refiriéndose respectivamente a concreciones, nódulos no-concrecionarios, y plintita.
- Transformación: f, g, m, p, x, b, d, refiriéndose respectivamente a suelo helado, gleización, compactación, piso de arado, fragipan, horizonte enterrado, y horizonte densificado.

4.4.1.3 Divisiones terciarias

Las divisiones terciarias se refieren a una variedad de rasgos no relacionados, utilizando números arábigos:

- Subdivisiones de horizontes genéticos en base a diferencias de color y/o textura, entre otros criterios (Bt1 – Bt2) (sufijos numéricos).
- Discontinuidad litológica en base a contrastes texturales indicando varias fases deposicionales sucesivas, que resultan en la superposición de perfiles (Bt-2Bt-2C) (prefijos numéricos).
- Bisequum, para reflejar la sobreimposición de un suelo más reciente dentro de un suelo formado anteriormente en condiciones bioclimáticas o de uso diferentes. Por ejemplo, un Spodosol desarrollándose bajo plantación de pinos, que invade la parte superior de un Alfisol formado previamente bajo bosque caducifolio (O-A-E-Bs-E'-Bt'-C).

4.4.2 Relación con geopedología

Los símbolos de designación son vectores de información que resumen las características más relevantes de un horizonte, incluyendo propiedades, modo de formación, y posición en el perfil. La nomenclatura se utiliza para identificar horizontes genéticos por inferencia cualitativa del proceso responsable de su formación. Un horizonte Bw refleja un proceso de meteorización de minerales primarios, mientras que un horizonte Bt refleja un proceso de iluviación de arcilla. Para ser diagnósticos con fines de clasificación taxonómica de los suelos, los horizontes genéticos deben cumplir con requerimientos cuantitativos (p.e. color, profundidad, espesor, % de contenido, etc.) especificados por el sistema taxonómico que se implementa. Por esta razón, puede afirmarse que todos los horizontes argílicos son horizontes Bt, pero no todos los horizontes Bt son horizontes argílicos.

La información pedológica describiendo la naturaleza de los horizontes y, especialmente, su secuencia en los perfiles es muy útil en investigaciones geomorfológicas sobre la susceptibilidad de los suelos y de las formaciones superficiales a los procesos de erosión. Como lo hace notar Jungerius (1985b), los horizontes A y B ejercen un control diferente sobre los procesos geomorfológicos. La diferencia de resistencia mecánica entre horizontes superficiales (A) y subsuperficiales (Bt) determina frecuentemente la profundidad de truncamiento de los suelos por erosión laminar. Igualmente, diferencias en propiedades físico-mecánicas entre horizontes

consecutivos pueden originar planos de cizallamiento que controlan los movimientos en masa superficiales. Los procesos de sufusión y tubulización dependen también de la secuencia y de los contrastes entre horizontes.

4.5 Macro-nivel

4.5.1 Definición

A macro-nivel, el concepto básico es el pedón, el cual se define como el volumen de suelo mínimo para describir y muestrear un cuerpo de suelo. Convencionalmente, se representa el pedón con una configuración hexagonal (Fig. 4.4). El mismo abarca lo esencial de las variaciones laterales y verticales de un cuerpo de suelo. El tamaño normal del área es 1 m² en el caso de un suelo con horizontes aproximadamente paralelos y con variación espacial isotrópica. El tamaño máximo del área es 10 m² cuando los horizontes presentan variaciones cíclicas. La profundidad teórica es hasta el material parental del suelo, pero por razones prácticas se limita generalmente a los 2 m superiores.

4.5.2 Conceptos relacionados

Con el concepto de pedón están relacionados varios otros conceptos que caracterizan el cuerpo de suelo.

- Perfil de suelo: una cara del pedón incluyendo toda la secuencia de horizontes, comúnmente utilizada para describir y muestrear. Ensayos estadísticos han mostrado que coleccionar material lateralmente en todas las caras del pedón para obtener una muestra compuesta permite dividir aproximadamente por dos el margen de error probable de los valores para la mayoría de los parámetros físicos y químicos (Wilding & Drees, 1983).
- Solum: horizontes O+A+E+B, a exclusión de C y R.
- Sección de control: la profundidad específica del pedón dentro de la cual determinadas características de suelo deben ocurrir para ser consideradas como diagnósticas con fines de clasificación taxonómica. Por ejemplo, para la mayoría de los suelos, la familia de distribución por tamaño de partículas se determina a la profundidad de 25-100 cm. Para ser diagnóstica, la plintita debe estar presente a <125 cm de profundidad al nivel de gran grupo (p.e. Plinthustults) y a <150 cm de profundidad al nivel de subgrupo (p.e. Plinthic Paleustults).

4.5.3 Relación con geopedología

En la literatura geomorfológica no se encuentran criterios que especifican el tamaño del área mínima de descripción y muestreo. En la práctica, no hay limitación de espacio para la descripción del componente epigeo de una geoforma, ya que los procesos y rasgos a la superficie del terreno son directamente observables. Sin embargo, definir un área mínima de observación puede resultar útil para fines de comparación entre sitios y para efecto de generalización de la información de campo. En cambio, el componente hipogeo de la geoforma, o sea el material propiamente geomorfológico (alterita, regolita, material deposicional) que constituye el horizonte C (estrato) de los suelos, no es directamente accesible para observación, descripción y

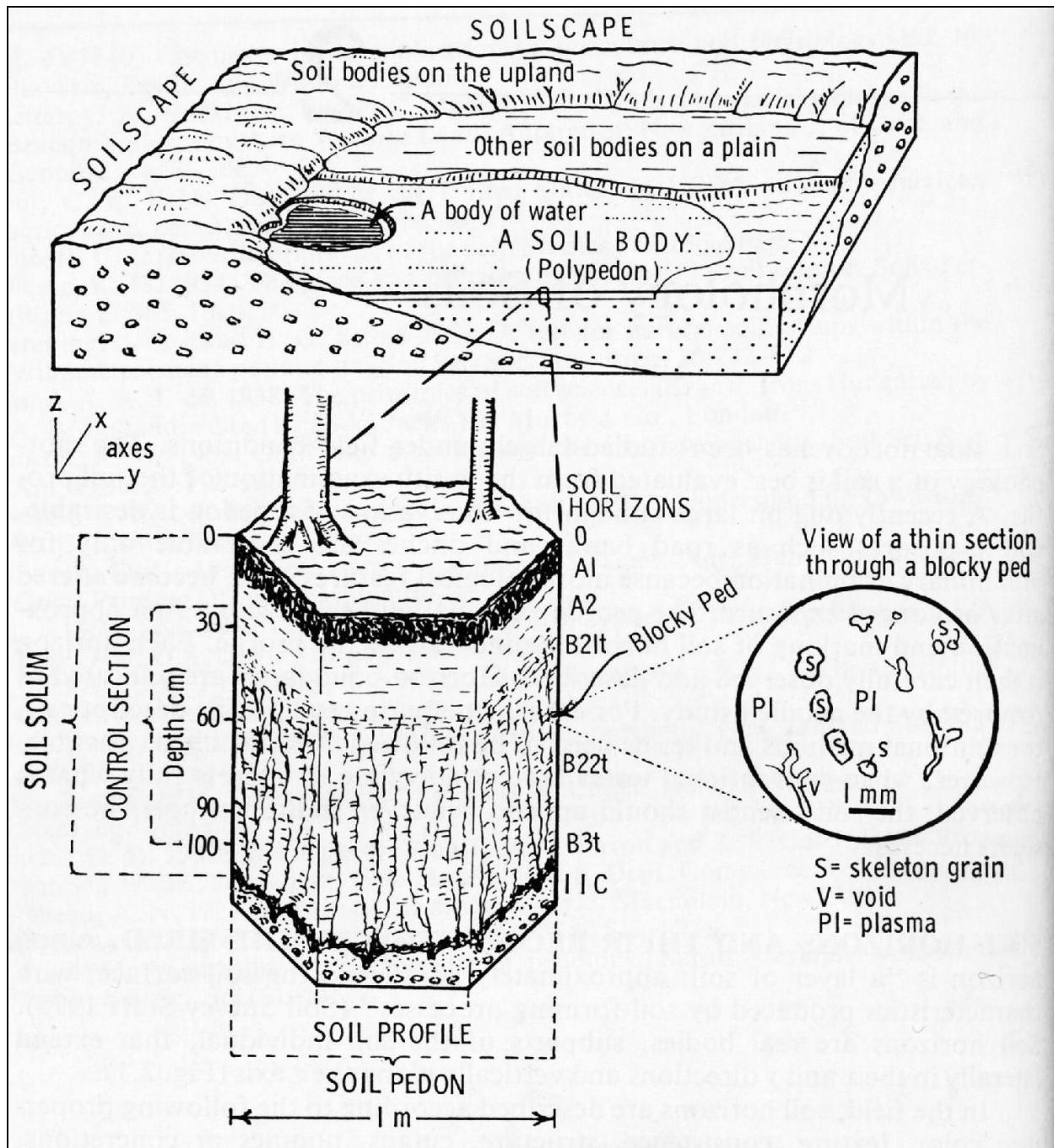


Fig. 4.4 Perfil de suelo, pedón, polipedón y pedopaisaje (tomado de Buol et al., 1997).

muestreo, salvo cuando hay exposiciones naturales o artificiales. Por lo tanto, en geomorfología se tiene el mismo problema de volumen mínimo de descripción y muestreo que, en pedología, se solucionó con el concepto de pedón. Como el levantamiento geopedológico integra la descripción de la geofoma y la del suelo en un mismo sitio, los criterios de tamaño del pedón pueden aplicarse también al morfón. El morfón cubre los rasgos de la superficie del terreno y del substrato, mientras que el pedón cubre el volumen de material intermedio que corresponde al solum. En la práctica geopedológica, los dos son inseparables y su distinción resulta superflua.

Estos comentarios aplican esencialmente al nivel inferior de la clasificación jerárquica de las geoformas, o sea la forma de terreno (ver Capítulo 6). Los mismos resultan menos pertinentes a nivel de las categorías más altas del sistema, ya que los rasgos externos de la geoforma permiten frecuentemente inferir la naturaleza del sustrato.

4.6 Mega-nivel

4.6.1 Definición

Al mega-nivel, el polipedón es el concepto básico. El polipedón es un conjunto de pedones similares adyacentes, que encajan todos dentro del rango de variación de una simple unidad taxonómica (p.e. serie de suelos). Es un cuerpo físico real de suelo, limitado por “no-suelos” (p.e. afloramientos de roca, cuerpos de agua, construcciones, etc.) o por pedones que muestran características desemejantes. El área mínima es 2 m² (= dos pedones), pero no hay especificación de área máxima. Los conceptos de cuerpo de suelo e individuo-suelo son sinónimos de polipedón. En términos similares, Boulaine (1975) ha propuesto el concepto de *genon* para designar el volumen de suelo de todos los pedones que tienen la misma estructura y las mismas características y que resultan de la misma pedogénesis.

4.6.2 Relación con geopedología

- El polipedón representa el nexo fundamental entre volumen de suelo real (= pedón) y unidad taxonómica. Es el concepto usado para clasificar taxonómicamente los cuerpos de suelo. Un polipedón comprende todos los pedones contiguos de igual clasificación.
- El polipedón representa el contenido pedológico de las unidades cartográficas. Un polipedón es un individuo de suelo concreto (= cuerpo de suelo) en el paisaje (pedopaisaje). Los polipedones pueden mapearse como (1) una unidad relativamente pura con un polipedón dominante (consociación) o (2) una unidad compuesta de más de un polipedón dominante (asociación).
- El polipedón está correlacionado con la unidad geomorfológica (polimorfón), especialmente al nivel taxonómico inferior (forma de terreno). En su expresión más simple, un polipedón en su marco geomorfológico forma una unidad de paisaje geopedológico. Sin embargo, el paisaje geopedológico es por lo general más complejo, porque una misma geoforma incluye usualmente más de un polipedón.

4.7 Conclusión

La holarquía del sistema suelo permite realzar relaciones relevantes entre propiedades pedológicas y respuesta geomorfológica a diversos niveles jerárquicos. Estas relaciones forman la esencia conceptual de la geopedología. Un hecho particularmente notable lo constituyen las relaciones de causa a efecto entre reacciones que ocurren en el material suelo a micro-escala, no directamente perceptibles, y su expresión geomorfológica en el paisaje a macro-escala. Esto es especialmente el caso de la modelación del paisaje por movimientos en masa, cuyo control está bajo la dependencia de reacciones micro-mecánicas en la fábrica del suelo. Con respecto a la cartografía de suelos, la relación más concreta tiene lugar al mega-nivel, donde polipedón y polimorfón se integran para formar una unidad de paisaje geopedológico.

Capítulo 5

EL PAISAJE GEOMORFOLOGICO: CRITERIOS PARA CLASIFICAR LAS GEOFORMAS

5.1 Introducción

A diferencia de otras disciplinas científicas, la geomorfología todavía no dispone de un sistema taxonómico formalmente estructurado para clasificar las formas del relieve, designadas a continuación por el vocablo de *geoformas*. Hay cierto consenso en cuanto a agrupar las geoformas por familias de procesos que operan sobre determinadas clases de rocas o en determinadas zonas bioclimáticas. Así se habla, por ejemplo, de formas cársticas generadas por disolución de las rocas calcáreas, de formas desérticas creadas en ambientes secos, de formas glaciares modeladas por la actividad del hielo, o de formas aluviales controladas por la actividad de los ríos. Pero estas geoformas no se integran en un esquema estructurado de tipo jerárquico. Hace falta crear un sistema que permita acomodar y organizar las geoformas de acuerdo a sus características y su origen y de acuerdo a las relaciones jerárquicas entre geoformas. Para esto se requiere un sistema multicategorico.

Geoforma es el concepto genérico que designa todos los tipos de formas del relieve independientemente de su origen, de su dimensión y de su nivel de abstracción, similarmente a cómo se utiliza el concepto suelo en pedología o el concepto planta en botánica (Zinck, 1988; Zinck & Valenzuela, 1990b). El término de geoforma, con significado genérico, ha sido introducido recientemente en la Guía para la Descripción de Suelos de la FAO (2009). Las geoformas tienen un componente interno (hipogeo) y un componente externo (epigeo) en relación a la superficie del terreno. El componente interno es el material de la geoforma (el contenido), cuyas características conllevan información genética y estratigráfica (cronológica). El componente externo de la geoforma es su figura, su "forma" (el conteniente), la cual expresa una combinación de características morfográficas y morfométricas. El componente externo es directamente accesible a la percepción visual proximal o distal, que ésta sea humana o instrumental. Idealmente, la clasificación de las geoformas debería reflejar características de ambos componentes, el material constituyente y su expresión fisiográfica. El aspecto externo de las geoformas es muy relevante para su reconocimiento directo y su cartografía. Por esta razón, un sistema de clasificación de las geoformas tiene necesariamente que combinar criterios de percepción de la realidad geomorfológica y criterios propiamente taxonómicos, basados en atributos diagnósticos.

Aparentemente, la taxonomía de las geoformas no suscitó el mismo interés que la taxonomía de plantas o la de suelos. Posiblemente, esto se debe a que, en términos generales, se le ha dado más importancia al análisis de los procesos morfogenéticos que a la cartografía geomorfológica, cuya ejecución requiere disponer de algún tipo de clasificación de las unidades geomorfológicas. Son pocos los países que han tenido, en algún tiempo, un programa sistemático de cartografía geomorfológica similar a los que se desarrollaron en los países de Europa Oriental después de la Segunda Guerra Mundial o en Francia en la segunda parte del siglo pasado (Tricart, 1965a; CNRS, 1972). En los USA, la leyenda de los mapas de suelos muestra exclusivamente los

pedotaxa, sin mencionar los paisajes en que se encuentran los suelos, a pesar de que el concepto de “soilscape” se considera el marco espacial para el mapeo de polipedones (Buol et al., 1997). Una leyenda mixta, mostrando el suelo en su paisaje geomorfológico, entre otros rasgos, facilita la lectura, la interpretación y el uso de los mapas de suelos por el no-especialista, académico o práctico. Con el uso de los SIG, el marco geomorfológico se está perfilando como el elemento estructurante de una variedad de leyendas, incluyendo leyendas de mapas taxonómicos, interpretativos, y de planificación del uso de las tierras, entre otros.

5.2 Ejemplos de clasificación geomorfológica

Los geomorfólogos han siempre mostrado interés por clasificar las geoformas, pero los criterios usados para ello han cambiado en el transcurso del tiempo y son todavía muy diversos. Después de mencionar algunos enfoques de clasificación geomorfológica, se presenta la estructura de un sistema taxonómico de las geoformas desarrollado a partir de levantamientos geopedológicos en Venezuela y posteriormente utilizado en el ITC (Enschede, Países Bajos) para entrenar personal de una variedad de países de Latin América, Africa, Medio-Oriente, y Sureste Asiático (Zinck, 1988; Farshad, 2010).

5.2.1 Clasificación por orden de magnitud

El criterio dimensional ha sido utilizado para clasificar las geoformas (Tricart, 1965a; Goosen, 1968; Verstappen & Van Zuidam, 1975; entre otros). Estas clasificaciones son jerárquicas, con énfasis en la geomorfología estructural en los niveles superiores del sistema. La clasificación de Cailleux-Tricart (Tricart, 1965a) en ocho órdenes de magnitud temporo-espaciales es un ejemplo representativo de este enfoque (Tabla 5.1). La dimensión espacial y la dimensión temporal de las

Tabla 5.1 Clasificación taxonómica de las unidades geomorfológicas de Cailleux-Tricart (resumido de Tricart, 1965a).

Orden	Tipos de unidades	Ejemplos de unidades	Extensión (km ²)	Tiempo (años)
I	Configuración del globo terráqueo	Continente, cubeta oceánica	10 ⁷	10 ⁹
II	Grandes conjuntos estructurales	Escudo, geosinclinal	10 ⁶	10 ⁸
III	Grandes unidades estructurales	Cadena de montaña, cuenca sedimentaria	10 ⁴	10 ⁷
IV	Unidades tectónicas elementales	Serranía, horst	10 ²	10 ⁷
V	Accidentes tectónicos	Anticlinal, sinclinal	10	10 ⁶ -10 ⁷
VI	Formas de relieve	Terraza, circo glaciar	10 ⁻²	10 ⁴
VII	Microformas	Lapiez, soliflucción	10 ⁻⁶	10 ²
VIII	Rasgos microscópicos	Corrosión, desagregación	10 ⁻⁸	-

unidades geomorfológicas varían concomitantemente desde global hasta local y desde primitivo hasta actual. Tricart (1965a) considera que la dimensión de los objetos de la geomorfología (hechos y fenómenos) interviene no solamente en su clasificación, sino también en la selección de los métodos de estudio y en la naturaleza de las relaciones de la geomorfología con disciplinas vecinas.

Con un enfoque algo similar, pero menos elaborado, Lueder (1959) distribuye las geoformas en tres órdenes de magnitud. El primer orden incluye continentes y cuencas oceánicas. Las serranías montañosas son un ejemplo de segundo orden. En el tercer orden se encuentra una variedad de formas como valle, depresión, cresta, y acantilado.

5.2.2 Clasificación genética y genético-corológica

Existen variantes de clasificación genética de las geoformas basadas en las subdivisiones convencionales de la geomorfología como disciplina científica en áreas especializadas concernidas con diferentes tipos de geoformas (Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Agrupación de geoformas por origen

Áreas de estudio de la geomorfología	Tipos de geoformas
Geomorfología estructural: tipos de relieve	Relieve de cuesta, plegado, de escudo, etc.
Geomorfología climática: tipos de modelado	Modelado glaciar, periglacial, eólico, etc.
Geomorfología azonal: tipos de forma	Formas aluviales, lacustrinas, costeras, etc.

La clasificación genético-corológica se basa en el concepto de zona morfogenética, cuya distribución latitudinal y altitudinal es paralela a la subdivisión de la superficie terrestre en amplias zonas bioclimáticas, generando una serie de dominios morfoclimáticos con su asociación de geoformas: glaciar, periglacial, templado (húmedo, seco), mediterráneo, subtropical, y tropical (húmedo, seco). Esta clasificación combina origen y distribución geográfica de las geoformas. Se utiliza frecuentemente para presentar las geoformas por capítulos en los manuales de geomorfología. Este tipo de clasificación se basa en alguna modalidad de estructura jerárquica y conduce a una tipología de las geoformas, pero no provee una clara definición de los criterios utilizados en la jerarquización y en la tipificación. Hay tendencia de enfatizar un tipo de atributo de las geoformas en detrimento de los demás: por ejemplo, la dimensión, o la génesis, o la distribución geográfica.

El proyecto del Mapa Geomorfológico de Francia (CNRS, 1972) establece una jerarquización de la información geomorfológica en cinco niveles, llamados *términos*, como marcos de referencia para levantar los datos, representarlos cartográficamente, y consignarlos en la leyenda del mapa. Estos cinco términos son por orden decreciente: la localización, el contexto estructural (tipo de región estructural, litología, tectónica), el contexto morfogenético (sistema morfogenético, edad), las formaciones superficiales (origen del material, granulometría, consolidación, espesor, morfometría) y, por último, las formas. El último término contiene toda la colección de formas

reconocidas, con agrupación en clases y subclases de acuerdo al origen de las formas. Cada forma lleva una definición y un símbolo para su representación cartográfica. Se distinguen dos grupos mayores de formas: (1) las formas endógenas (volcánicas, tectónicas, estructurales) y (2) las formas originadas por los agentes externos (formas de vertientes e interfluvios, formas eólicas, formas fluviales, formas litorales, marinas y lacustres, formas cársticas, formas glaciares, formas periglaciares y nivales).

Para fines de mapeo de suelos, Wielemaker et al. (2001) proponen un sistema de terreno jerárquico, calificado de morfogenético por los autores, el cual incluye cinco niveles anidados, a saber la región, la forma de terreno, el elemento de forma de terreno, la faceta, y el sitio. Este sistema fue derivado del análisis de un estudio de caso concreto localizado en el sur de España, utilizando un marco metodológico para formalizar el conocimiento experto referido a las relaciones suelo-paisaje y un procedimiento interactivo de desagregación secuencial de un paisaje en GIS (de Bruin et al., 1999).

Una variante de clasificación genético-corológica es la ordenación de paisajes y geoformas en el ámbito de un país (Zinck, 1974; Elizalde, 2009). Este tipo de clasificación combina unidades físico-geográficas en los niveles superiores del sistema con unidades taxonómicas en los niveles inferiores. Las primeras son propias a un contexto regional específico y, por lo tanto, no pueden ser generalizadas o extrapoladas a otros contextos regionales. La división de un país en provincias fisiográficas y regiones naturales es un ejemplo de este tipo de nomenclatura. En cambio, los taxones de las categorías inferiores presentan un nivel de abstracción suficiente como para poder ser reconocidos mediante características diferenciantes en una variedad de contextos regionales.

5.2.3 Clasificación morfométrica

Los primeros intentos de caracterización morfométrica del relieve remontan a mediados del siglo XIX en los países germánicos, pero es sólo después de la segunda guerra mundial que se hace uso sistemático de técnicas morfométricas para describir rasgos de la topografía, parámetros de la red hidrográfica, densidad de drenaje y otros rasgos medibles del relieve (Tricart, 1965a). En décadas recientes, la tecnología de los modelos digitales de elevación (MDE) ha dado un nuevo impulso a la morfometría y a la extracción automatizada de información morfométrica (Pike & Dikau, 1995; Hengl & Reuter, 2009; entre otros). La geomorfometría se dedica al análisis cuantitativo de la superficie del terreno con dos orientaciones: una morfometría específica que analiza los rasgos discretos de la superficie del terreno (p.e. las formas de terreno), y una morfometría general que trata de los rasgos continuos. En su estado presente, la geomorfometría consiste esencialmente en la caracterización y el análisis digital de superficies topográficas continuas (Pike et al., 2009).

Los MDE han permitido la medición y extracción de atributos que describen los rasgos topográficos del paisaje (Gallant & Wilson, 2000; Hutchinson & Gallant, 2000; Olaya, 2009). Los parámetros más frecuentemente medidos incluyen altitud, pendiente, exposición, curvatura y rugosidad del relieve, entre otros. La distribución espacial de estos parámetros permite inferir la variabilidad de procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos en el paisaje. La

combinación de datos derivados de MDE y de imágenes satelitarias contribuye a mejorar los modelos predictivos (Dobos et al., 2000).

Hay intentos de clasificación de las formas de terreno y modelización de paisajes utilizando parámetros morfométricos (Evans et al., 2009; Hengl & MacMillan, 2009; Nelson & Reuter, 2012). Se han utilizado primitivas geométricas idealizadas (Sharif & Zinck, 1996) y formas elementales ideales (Minár & Evans, 2008) para segmentar el paisaje y aproximar la representación de una variedad de formas de terreno. La implementación de algoritmos automatizados para clasificar formas de terreno ha conducido a determinar y cartografiar elementos de las formas de terreno y clases de relieve (Pennock et al., 1987; MacMillan & Pettapiece, 1997; Ventura & Irvin, 2000; Meybeck et al., 2001; Iwahashi & Pike, 2007; MacMillan & Shary, 2009). Ventura & Irvin (2000) analizan diferentes métodos de clasificación automatizada de formas de terreno para estudios del paisaje pedológico, pero los ensayos se limitan básicamente a relieves de vertiente conforme a los modelos clásicos de Ruhe (1975) y Conacher & Dalrymple (1977). El uso de parámetros cuantitativos permite describir variaciones continuas de los rasgos topográficos con la técnica de los conjuntos borrosos (Irwin et al., 1997; Burrough et al., 2000; MacMillan et al., 2000). Sin embargo, esto puede resultar siendo una desventaja, cuando se desconocen las características diferenciadoras de las geoformas como unidades discretas, las cuales son frecuentes tanto en áreas de erosión (p.e. cárcavas, rasgos de solifluxión) como en áreas deposicionales (p.e. sistemas aluviales, sistemas eólicos). El análisis del relieve basado en MDE conduce a una clasificación de los rasgos topográficos del relieve y contribuye a la caracterización morfométrica de las formas de terreno, pero no genera una clasificación de las geoformas en el sentido geomorfológico del concepto. La clasificación de facetas de relieve por forma y gradiente es esencialmente una clasificación descriptiva que no informa sobre el origen del relieve. Sin embargo, este tipo de clasificación representa una organización de los rasgos de relieve que permite formular hipótesis sobre su origen (Small, 1970). Comparativamente con la multiplicación de ensayos realizados en áreas de relieve accidentado, el mapeo digital en áreas planas, especialmente áreas de origen deposicional, ha sido todavía muy poco explorado.

En la Guía para la Descripción de Suelos de la FAO (2009) se establece una jerarquía de geoformas en dos niveles. En el primer nivel, se consideran tres clases denominadas, respectivamente, tierras a nivel, tierras con pendiente, y tierras escarpadas. Estas clases se subdividen de acuerdo a tres criterios morfométricos incluyendo gradiente, intensidad de relieve, y densidad de drenaje potencial. Aplicando este procedimiento a la clase de tierras a nivel, por ejemplo, se reconocen cuatro subclases, a saber planicie, meseta, depresión, y piso de valle.

5.2.4 Clasificación etnogeomorfológica

Los campesinos indígenas en las comunidades tradicionales utilizan criterios topográficos, antes de considerar los suelos, para identificar nichos ecológicos aptos para determinados cultivos y prácticas de manejo. Su enfoque para segmentar una vertiente en unidades de relieve se asemeja a los modelos de facetas de vertiente de Ruhe (1975) y Conacher & Dalrymple (1977). Igualmente en ambientes deposicionales, donde las variaciones topográficas son a menudo más sutiles, los moradores diferencian claramente una variedad de posiciones en el paisaje, como por ejemplo el trio banco-bajío-estero para el manejo de pastos en los Llanos de río Orinoco.

Ensayos de mapeo participativo, contando con la colaboración de usuarios de las tierras y técnicos, muestran que los mapas mentales de los campesinos visualizan el relieve en base a una detallada nomenclatura, que permite traducirlos en mapas reales muy similares a los mapas geomorfológicos elaborados por especialistas (Fig. 5.1) (Barrera-Bassols et al., 2006, 2009).

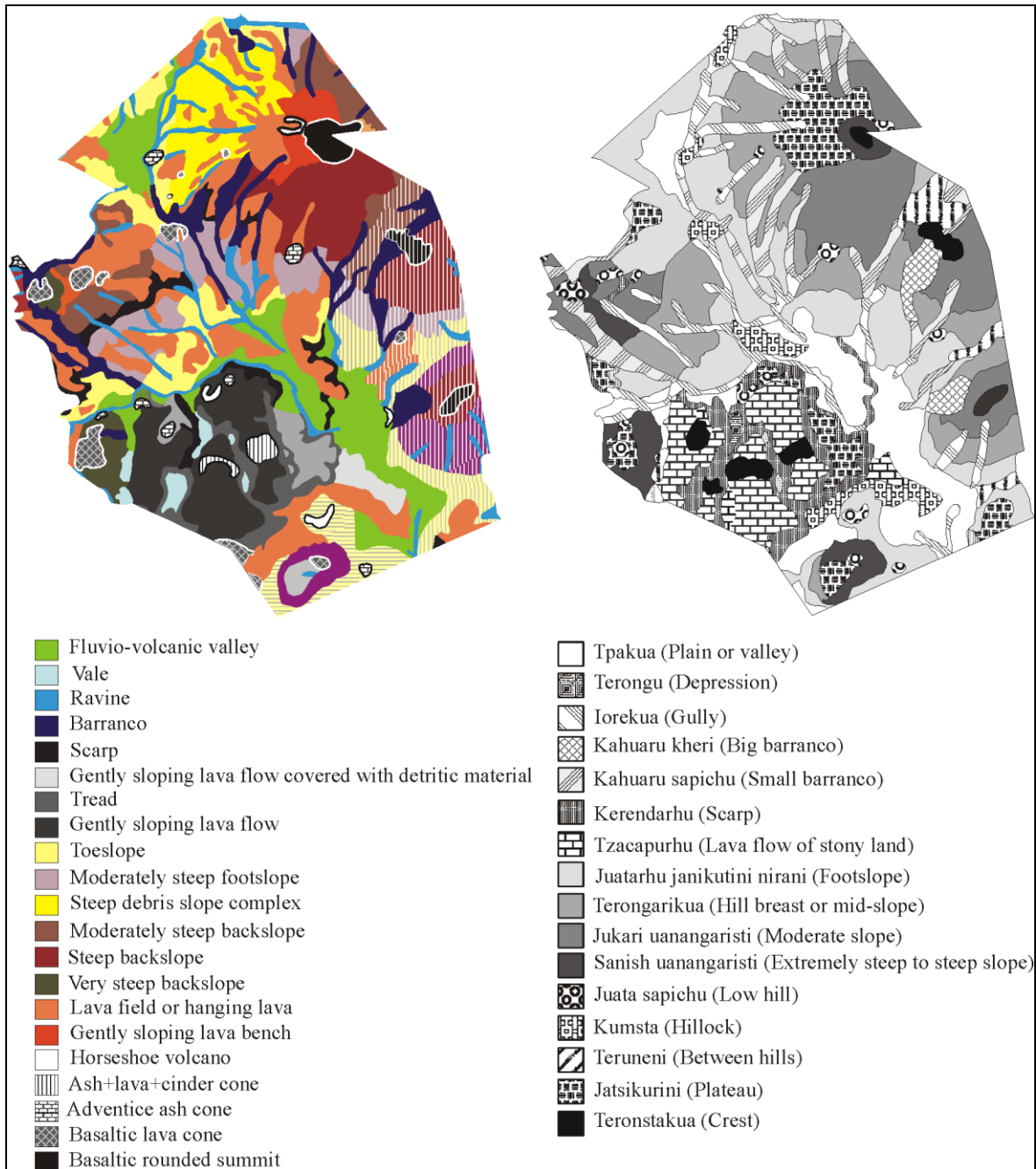


Fig. 5.1 Comparación de un mapa geomorfológico realizado de acuerdo criterios técnicos (izquierda) y de un mapa del relieve elaborado de acuerdo a la nomenclatura indígena Purhépecha (derecha) del territorio de San Francisco Pichátaro, Michoacán, en el eje volcánico de México central (Barrera-Bassols et al., 2006).

Las clasificaciones indígenas de suelos incluyen generalmente el relieve al nivel superior del sistema de clasificación, formando la base de la etnogeopedología. En su percepción del medio ambiente, los campesinos utilizan el relieve, junto con otros rasgos del paisaje, como factor principal para identificar, localizar y clasificar los suelos. Por la importancia que ambas disciplinas le dan al factor relieve, etnopedología y geopedología están emparentadas.

5.3 Bases para un sistema de clasificación taxonómica de las geoformas

5.3.1 Premisas

Con fines de subsanar algunas de las limitaciones de los enfoques tradicionales de clasificación geomorfológica, se enuncia a continuación una serie de premisas como base para estructurar un sistema taxonómico de las geoformas.

- El objeto que se quiere clasificar es una unidad del geopaisaje (o subdivisión de éste) como entidad que puede reconocerse por su configuración y su composición. El término más común en la literatura geomorfológica de habla inglesa es el de *landform*. Este término lo utilizan indistintamente geomorfólogos, geólogos, pedólogos, agrónomos, ecólogos (de paisajes), arquitectos (de paisaje), planificadores, usuarios activos y contemplativos del campo, entre otros, pero no existe una definición estándar aceptada por todos. Way (1973) provee una definición bastante satisfactoria en los términos siguientes: “*Landforms* son rasgos de terreno formados por procesos naturales, que tienen una composición definida y un rango de características físicas y visuales que ocurren dondequiera que la forma se encuentra y cualquiera que sea la región geográfica”. En idioma español, *landform* significa literalmente *forma de tierra(s)*, un término que tiene una consonancia agrícola o agronómica. *Land* en ecología de paisajes incluye no solamente los rasgos físicos del paisaje sino también la biota y las actividades humanas (Zonneveld, 1979, 1989). El término de *forma de terreno* es más apropiado para designar las formas elementales y el de *geoforma* como concepto genérico para abarcar las unidades geomorfológicas de todos los niveles categóricos.
- Los objetos que se clasifican son las geoformas, o unidades geomorfológicas, las cuales se identifican en base a sus características propias, más bien que por referencia a los factores de formación. Combinaciones locales o regionales de criterios como son clima, vegetación, suelo y litología, que se encuentran asociados con las geoformas y contribuyen a su formación, pueden mostrarse en la leyenda del mapa geomorfológico, pero no hacen intrínsecamente parte de la clasificación de las geoformas. El factor climático está implícitamente presente en las geoformas originadas por agentes morfogenéticos de superficie (nieve, hielo, agua, viento).
- Las clases de geoforma se ordenan jerárquicamente para reflejar su nivel de pertenencia (membership) al paisaje geomorfológico. Por ejemplo, un albardón de orilla es un miembro de una terraza, la cual es un miembro de un paisaje de valle. Por lo tanto, albardón, terraza y valle deben figurar a diferentes niveles categóricos en un sistema jerárquico, porque corresponden a diferentes niveles de abstracción. Similarmente, las facetas de vertiente (cumbre, hombro, ladera y falda) son miembros de una colina, la cual es miembro de un paisaje de lomerío.

- La génesis de las geoformas se toma en consideración de preferencia en los niveles inferiores del sistema taxonómico, ya que el origen de las formas puede ser materia de debate y los atributos genéticos pueden ser no claros o controversiales, o su determinación puede requerir una serie de datos adicionales. A los niveles superiores, se privilegia el uso de atributos más objetivos, descriptivos, en paralelo con el enfoque de reconocimiento de patrones que se implementa en la interpretación de fotos e imágenes.
- Los rasgos dimensionales (p.e. longitud, anchura, elevación, pendiente, etc.) son características subordinadas, no diagnósticas, de las geoformas. Una geoforma pertenece a una determinada clase independientemente de su tamaño, siempre y cuando cumpla con los atributos requeridos de esta clase. Por ejemplo, la extensión de una duna o de un deslizamiento puede variar de unos pocos m² a varios km².
- Los nombres de las geoformas se derivan frecuentemente del lenguaje común y pueden prestarse a controversia. Se intenta privilegiar aquellos términos que tienen mayor aceptación por su etimología y/o uso.
- Los conceptos de provincia fisiográfica y región natural, así como otros tipos de unidad corológica relacionados con contextos geográficos específicos, no se toman en cuenta en este sistema taxonómico, porque dependen de condiciones propias a un determinado país o porción de continente, lo que limita su nivel de abstracción y su repetibilidad geográfica.
- La distribución geográfica de las geoformas no es un criterio taxonómico. La corología de las geoformas se refleja en la cartografía y en la estructura de la leyenda del mapa geomorfológico.
- Las designaciones toponímicas pueden ser utilizadas como fases de las unidades taxonómicas (p.e. Cordillera de Mérida, Depresión de los Llanos).

5.3.2 Antecedentes

El desarrollo del sistema de clasificación de las geoformas utiliza conocimiento previo en términos de conceptos, métodos, información, y experiencia.

- Tipologías existentes de las geoformas, con definiciones y atributos descriptivos, han sido parcialmente tomadas de la literatura existente. El propósito del presente ensayo de clasificación es el de organizar el conocimiento disponible en un sistema taxonómico jerárquico. Algunos de los documentos fundamentales que se consultaron con esta finalidad son los siguientes:
 - Diversos manuales clásicos de geomorfología: Tricart & Cailleux (1962, 1965, 1967, 1969), Tricart (1965a, 1968, 1977), Derruau (1965, 1966), Thornbury (1966), Viers (1967), CNRS (1972), Garner (1974), Ruhe (1975), Huggett (2011), entre otros.
 - Diccionarios y enciclopedias: Visser (1980), Lugo-Hubp (1989), Fairbridge (1997), Goudie (2004), entre otros.
 - Manuales de fotointerpretación geomorfológica: Goosen (1968), Way (1973), Verstappen & Van Zuidam (1975), Verstappen (1983), Van Zuidam (1985), entre otros.
- Para la estructura del sistema, se tomó inspiración del marco conceptual en que se basa el Soil Taxonomy del USDA (Soil Survey Staff, 1975, 1999) con respecto a los conceptos de categoría, clase y atributo.
- Desarrollo y validación del sistema se han hecho esencialmente en Venezuela y parcialmente en Colombia, en el marco de numerosos proyectos de levantamiento de suelos a diversas

escalas (desde detallada hasta gran visión) con implementación de la geomorfología como herramienta para el mapeo de suelos (enfoque de geomorfología aplicada). El sistema se modificó y se mejoró sobre la marcha a medida que los levantamientos de campo suministraban nuevos conocimientos. Posteriormente, el sistema ya establecido fue objeto de enseñanza y entrenamiento en los cursos de postgrado en levantamiento de suelos del ITC (Zinck, 1988) para estudiantes de diversas partes del mundo, especialmente de América Latina, Africa, Medio-Oriente, y Sureste Asiático.

5.3.3 En búsqueda de estructura: un ejemplo inductivo

Consideremos la colección de objetos incluidos en la Fig. 5.2 (Arnold, 1968). Se reconocen cuadrados, triángulos y círculos. Los hay grandes y pequeños, los hay verdes (V) y rojos (R). Los objetos son diferentes por forma, tamaño y color. En base a estos tres criterios, los objetos pueden ser clasificados de diversas maneras. Una opción consiste en comenzar a ordenar los objetos por tamaño, después por color, y finalmente por forma (Fig. 5.3). También pueden ordenarse los objetos sucesivamente por forma, color y tamaño. Seis alternativas de jerarquización son posibles. Este simple experimento muestra que objetos artificiales o naturales pueden clasificarse de diversas maneras. Cualquier alternativa es válida, si cumple con el objetivo de ordenación perseguido.

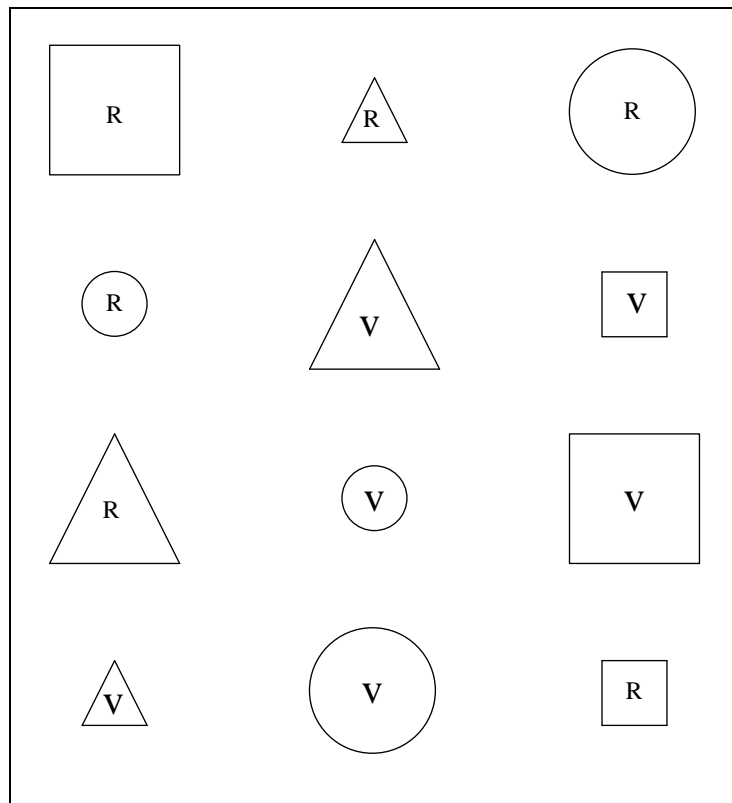


Fig. 5.2 Colección de objetos diferentes por forma, tamaño y color (Arnold, 1968).

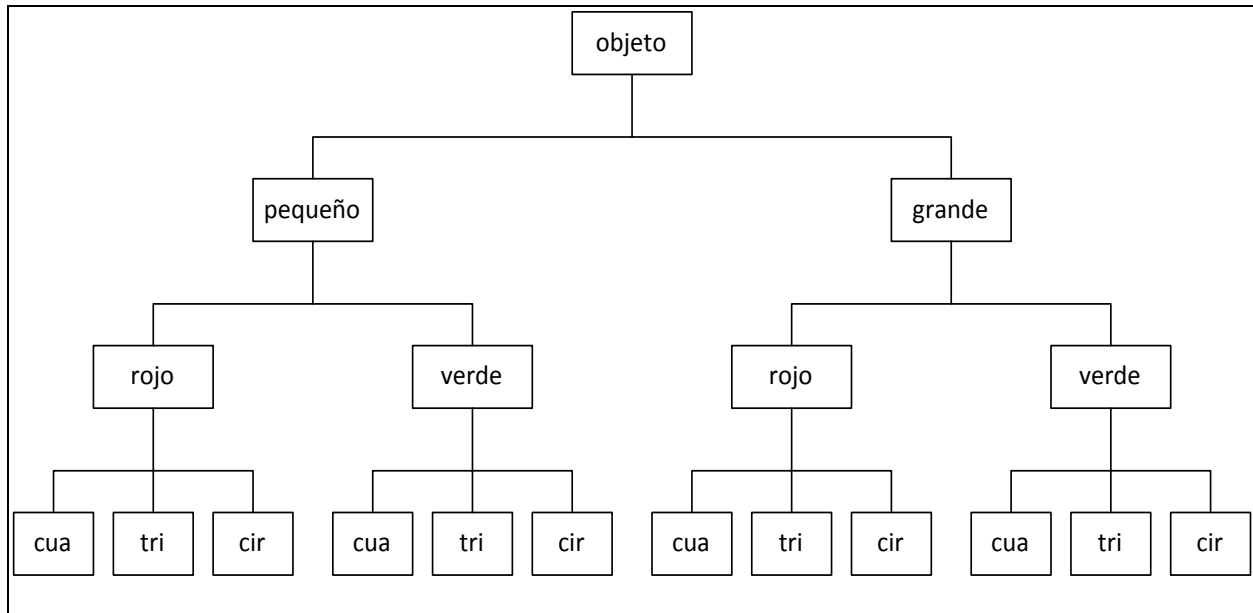


Fig. 5.3 Ordenación jerárquica de una colección de objetos por tamaño (2 clases), color (4 clases), y forma (12 clases) (cua = cuadrado, tri = triangular, cir = circular).

Del ejemplo de la Fig. 5.2, tres elementos básicos de un sistema de clasificación jerárquico pueden ser inducidos por efecto de generalización: categoría, clase, y atributo.

- Las categorías son los niveles jerárquicos que dan estructura al sistema de clasificación. Tres categorías están presentes, identificadas por criterios genéricos (tamaño, color, forma). Varios (6) arreglos jerárquicos son posibles.
- Las clases son grupos de objetos que tienen en común una o más características diferenciadoras. Hay siete características diferenciadoras: grande, pequeño, rojo, verde, cuadrado, triangular, y circular. La agregación de características genera un incremento de clases del tope a la base del sistema.
- Los atributos son características o propiedades de los objetos, tales como rojo, verde, grande, pequeño, cuadrado, triangular, y circular.

5.4 Estructura y elementos para construir un sistema taxonómico de las geoformas

Un sistema taxonómico se caracteriza por su estructura (o configuración) y por sus elementos (o componentes).

5.4.1 Estructura

Varios modelos de configuración son posibles: jerárquico, relacional, en red, y lineal, entre otros (Burrough, 1986). Por lo general, el modelo jerárquico multicategorico se considera apropiado para propósitos taxonómicos. Haigh (1987) afirma que la estructura jerárquica es una propiedad fundamental de todos los sistemas naturales, mientras que Urban et al. (1987) consideran que la acción de descomponer los paisajes en elementos dentro de un marco jerárquico permite solucionar parcialmente el problema de su aparente complejidad. A pesar de que una estructura jerárquica sea menos eficiente que, por ejemplo, un sistema relacional o en red en términos de

manejo automatizado de datos por computadora, la misma es adecuada para archivar, procesar y recuperar información por parte de la mente humana (Miller, 1956, 2003).

Un sistema puede ser comparado a una caja conteniendo todos los individuos pertenecientes al objeto que se quiere clasificar: por ejemplo, todos los suelos, todas las geoformas. Esta colección de individuos constituye el universo que se quiere dividir en clases y ordenar en categorías. La clasificación resulta (1) en una segmentación del universo bajo consideración (p.e. el continuum de suelos) en poblaciones, grupos e individuos por desagregación descendente, y (2) en una agrupación de individuos en grupos, poblaciones y universo por agregación ascendente.

5.4.2 *Elementos*

5.4.2.1 Categoría

Una categoría es un nivel de abstracción. Cuanto más alto es el nivel de la categoría, más alto es el nivel de abstracción. Cada categoría consta de un conjunto de clases mostrando un nivel similar de abstracción. Una categoría se identifica por un concepto genérico que caracteriza todas las clases presentes en este nivel (color, tamaño, forma, en el caso anterior). Por ejemplo, un paisaje de valle, una terraza fluvial, y un albardón de orilla son objetos de diferentes niveles de abstracción. El albardón es un miembro de la terraza, la cual a su vez es un miembro del valle. En un sistema jerárquico de geoformas, estos objetos deben posicionarse en tres categorías sucesivas.

5.4.2.2 Clase

Una clase es una subdivisión formal de una población a un nivel categórico dado. Una clase puede determinarse mediante dos tipos de conceptos: (1) el rango de variación de un atributo diagnóstico o (2) el concepto central de clase en relación a otras clases. Por ejemplo, en taxonomía de suelos, se utiliza el porcentaje de saturación en bases como parámetro umbral para separar la clase de los Alfisoles ($\geq 35\%$) de la clase de los Ultisoles ($< 35\%$).

Utilizando un procedimiento similar, el grado de buzamiento de los estratos de rocas sedimentarias permite separar clases de relieve monoclinal (Fig. 5.4). Este enfoque puede aplicarse también a la clasificación de las geoformas originadas por movimientos en masa mediante segmentación de la solución de continuidad entre sólido y líquido en base a los límites de consistencia (Fig. 5.5). Son pocas las referencias en la literatura geomorfológica donde la segmentación de una solución de continuidad se utiliza para diferenciar geoformas emparentadas.

El concepto central de tipificación se utiliza para posicionar una clase típica en relación a intergrados y extragrados, los cuales se apartan de la clase central por desviación de algunos atributos. Este es el caso, por ejemplo, del "Typic" tal como se usa a nivel de subgrupo en el Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975, 1999). No se han encontrado en la literatura geomorfológica ejemplos que implementan formalmente este concepto para distinguir situaciones modales de situaciones transicionales.

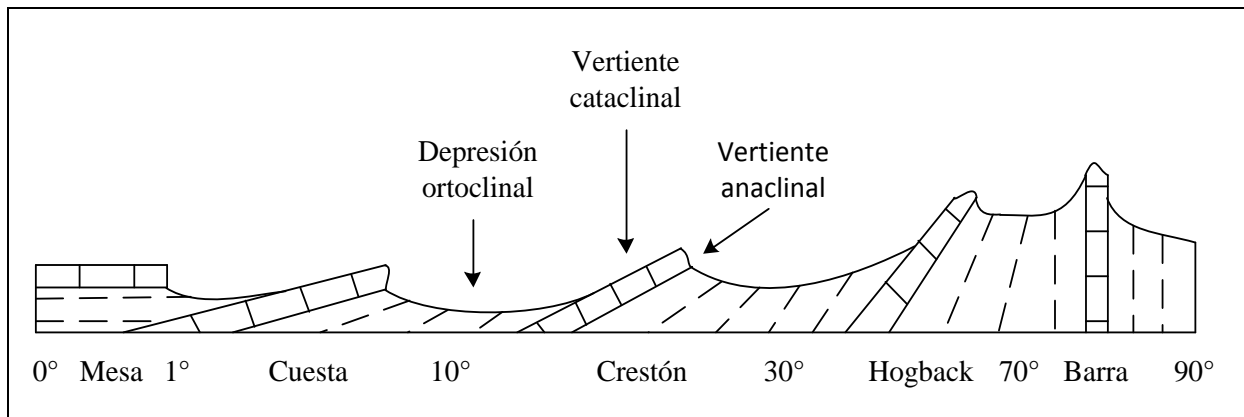


Fig. 5.4 Clases de relieve monoclinal determinadas en base a rangos de buzamiento de los estratos de rocas duras (p.e. caliza, arenisca) (adaptado de Viers, 1967).

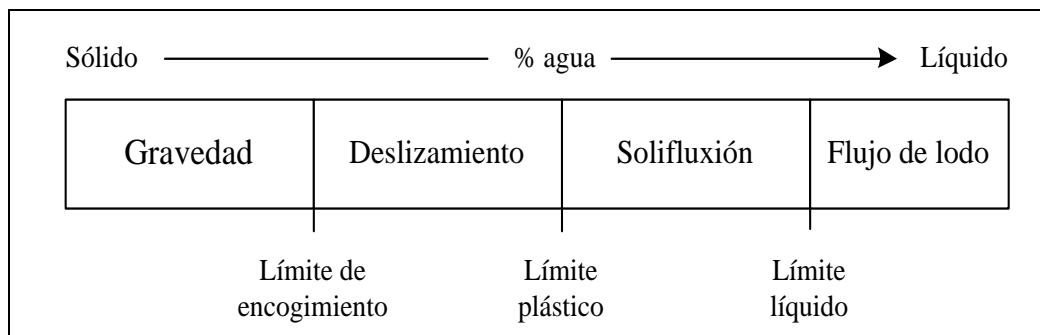


Fig. 5.5 Clases de geformas originadas por diferentes tipos de movimiento en masa

5.4.2.3 Taxón

Un taxón (o taxum) es una unidad taxonómica concreta como miembro de una clase establecida a un nivel categórico dado. Usualmente, un taxón cubre sólo parte del rango de variación permitido en los atributos seleccionados para definir la clase. Por ejemplo, la textura de un albardón de orilla, por encima del granzón basal, puede variar desde gravosa hasta franco-arcillo-arenosa. Un albardón de orilla específico puede ser arenoso a franco-arenoso sin cubrir todo el rango textural diagnóstico.

5.4.2.4 Atributo

Un atributo es una característica (o variable) usada para establecer los límites de las clases que conforman el sistema y para implementar estos límites en la descripción y clasificación de individuos. Se reconocen varios tipos de atributo:

- Dicotómicos: p.e. presencia o ausencia de manchas de reducción de hierro, de carbonatos u otros sales.
- Multi-estado sin rangos: p.e. tipos de estructura pedológica, tipos de estructura deposicional.

- Multi-estado con rangos: p.e. tamaño de los agregados estructurales, clases de plasticidad y adhesividad.
- Variación continua: p.e. saturación de bases, grado de buzamiento.

La utilización de estos criterios taxonómicos básicos en geomorfología requiere lo siguiente: (1) el inventario de las geoformas conocidas y su ordenación en un sistema jerárquico, y (2) la selección, categorización (diagnóstico o no), jerarquización, y medición de los atributos que permitan identificar y describir las geoformas.

5.5 Niveles de percepción y ensayo de estructuración de un espacio geomorfológico

La geomorfología es ante todo una ciencia de observación, persiguiendo la identificación y separación de paisajes a partir de mapas topográficos, modelos digitales de elevación o de terreno, documentos de sensoramiento remoto permitiendo visión estereoscópica, pero principalmente por lectura de los rasgos fisiográficos en el campo. Las geoformas pueden ser percibidas por visión humana o sensores artificiales, porque tienen una apariencia fisionómica en la superficie de la tierra (geopaisaje). La fisiografía describe este aspecto externo correspondiente al componente epigeo de las geoformas. Gracias a su expresión paisajística, las geoformas son los elementos más directamente estructurantes del terreno, más que cualquier otro objeto o rasgo natural. Inclusive un observador no-científico puede advertir que cualquier porción de la corteza terrestre tiene una estructura determinada por el relieve, que permite subdividirla en elementos componentes. Las veces que una superficie de terreno puede ser subdividida depende del nivel de percepción usado para ésto. Aunque el concepto de nivel de percepción es subjetivo cuando se usa el ojo humano, el mismo ayuda a jerarquizar los componentes estructurales de una superficie de terreno.

A continuación, se desarrolla un ejemplo que ilustra el efecto de la escala de percepción en la identificación secuencial de diferentes porciones de terreno. El ejemplo se refiere a la zona de contacto entre el Mar Caribe y la margen norte del continente suramericano en Venezuela (Zinck, 1980). El uso de niveles de percepción sucesivos, cada vez más precisos, materializados por plataformas de observación de alturas decrecientes en relación a la superficie de la tierra, permite subdividir la porción de continente seleccionada en clases de geoformas que se distribuyen en varias categorías jerárquicas (Fig. 5.6 y Tabla 5.3). Un observador montado en una nave espacial a unos 800-1000 km de altura divisaría dos provincias fisiográficas, a saber la cadena orientada este-oeste de la Cordillera de la Costa al norte y la depresión de los Llanos al sur. Estas dos macro-unidades de relieve contrastado corresponden a dos tipos de geoestructura: una cadena de montaña plegada de tipo cordillera y una cuenca sedimentaria de tipo geosinclinal, respectivamente. A partir de un avión volando a unos 10 km de altura, se podrá distinguir los dos ramales principales, paralelos, de la Cordillera de la Costa, a saber la Serranía del Litoral al norte y la Serranía del Interior al sur, separadas por una alineación de depresiones tectónicas como la del Lago de Valencia. Estas unidades son regiones naturales que corresponden a tipos de ambiente morfogenético: las serranías son ambientes estructurales sometidos a erosión, mientras que las depresiones son ambientes deposicionales. Si se aumenta el nivel de percepción, a partir de un helicóptero volando a dos km de altura, las serranías podrán ser divididas en paisajes de montaña y paisajes de valle. Un recorrido de campo por alguno de los valles permitirá de ver una serie de escalones topográficos que corresponden a terrazas fluviales. La observación detallada

de la topografía y de los sedimentos en una terraza determinada revelará una secuencia de unidades deposicionales desde la más alta, el albardón de orilla (banco), hasta la más baja, la cubeta de decantación (bajío). Los resultados de este procedimiento exploratorio inductivo, conduciendo a la segmentación secuencial de una porción de continente, se encuentran resumidos en la Tabla 5.3. De esta aproximación empírica resulta un esquema jerárquico de geformas en cinco niveles categóricos anidados, cada uno identificado por un concepto genérico pasando de lo general a lo detallado (Fig. 5.7).

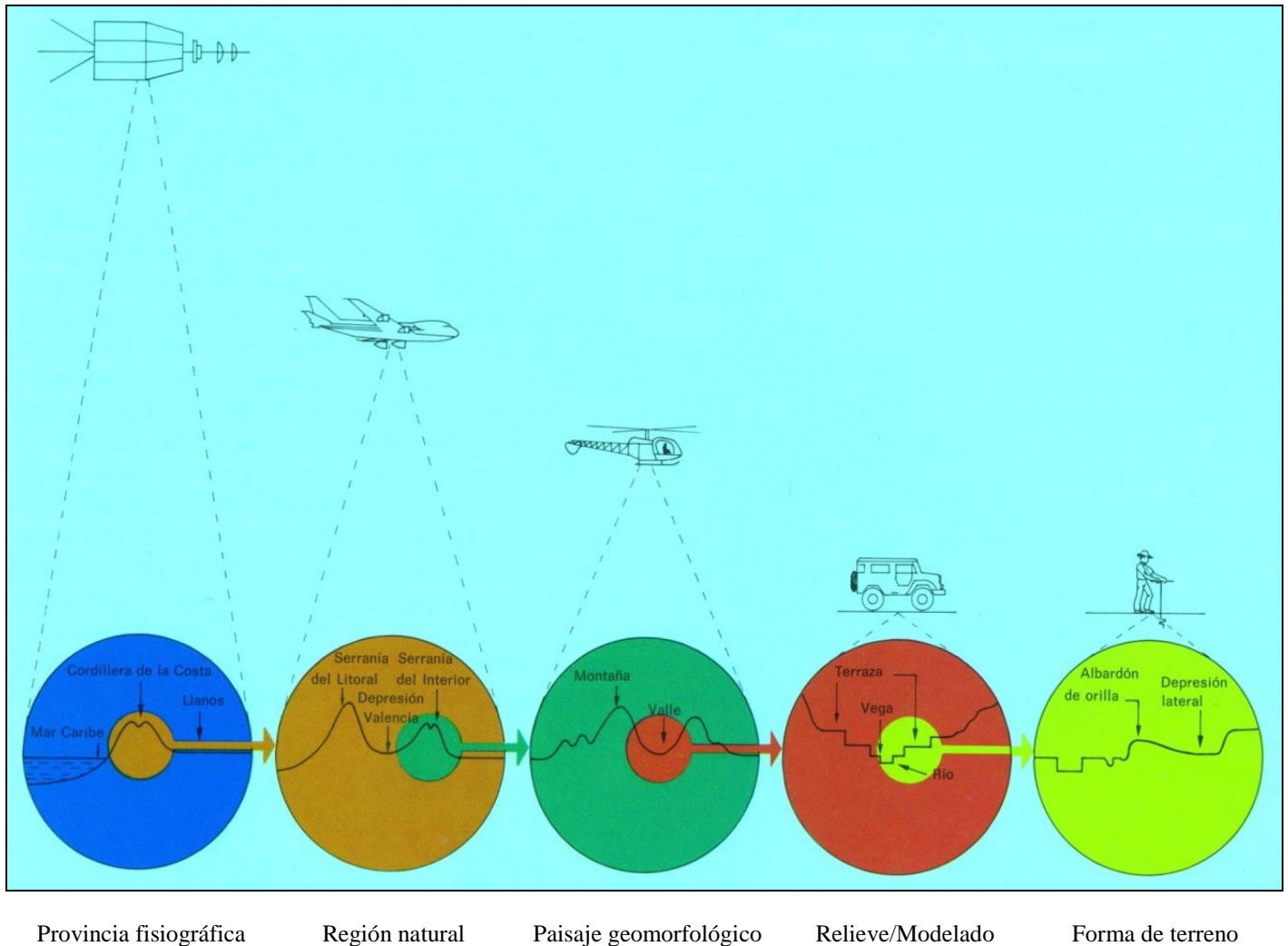


Fig. 5.6 Niveles sucesivos de percepción de geformas desde diversas alturas de observación (Zinck, 1980).

Tabla 5.3 Identificación secuencial de geoformas de acuerdo a niveles de percepción creciente (en base a los rasgos observados en la Fig. 5.6) (Zinck, 1988).

Plataforma de observación	Area de observación	Rasgos observados	Criterios usados Factores inferidos	Geoformas resultantes	Conceptos genéricos
Satélite	Amplia porción de continente	<i>Cordillera de la Costa</i> masa de relieve estrecha, longitudinal, alta; límites abruptos	Topografía Geodinámica interna (orogénesis)	Cordillera (cadena de montaña plegada)	Geoestructura
		<i>Llanos del Orinoco</i> masa de relieve amplia, plana y baja	Topografía Geodinámica interna (hundimiento)	Geosinclinal (cuenca sedimentaria)	
Aeroplano	Cordillera	<i>Serranía del Litoral y Serranía del Interior</i> cadenas montañosas paralelas, disectadas	Topografía Geodinámica interna y externa (erosión)	Ambiente estructural/erosional	Ambiente morfogenético
		<i>Depresión de Valencia</i> terrenos bajos planos; márgenes cóncavos	Topografía Geodinámica interna y externa (deposición de sedimentos)	Ambiente deposicional	
Helicóptero	Ambiente estructural/erosional	Filas montañosas paralelas	Topografía Tectónica Hidrografía	Montaña	Paisaje geomorfológico
		Depresiones y entalles, longitudinales, estrechos, paralelos o perpendiculares a las filas	Topografía Tectónica Hidrografía	Valle	
Superficie del terreno	Valle	Niveles topográficos escalonados, paralelos, separados por escarpes	Topografía	Terraza	Relieve o modelado
		Fondo de valle, red fluvial, bosque ripario	Topografía Drenaje Vegetación	Llanura de inundación	
Superficie y subsuperficie del terreno	Terraza	Banco longitudinal, angosto, convexo, bien drenado, con textura gruesa	Topografía Drenaje Morfogénesis	Albardón	Forma de terreno
		Depresión amplia, cóncava, pobremente drenada, con textura fina	Topografía Drenaje Morfogénesis	Cubeta	

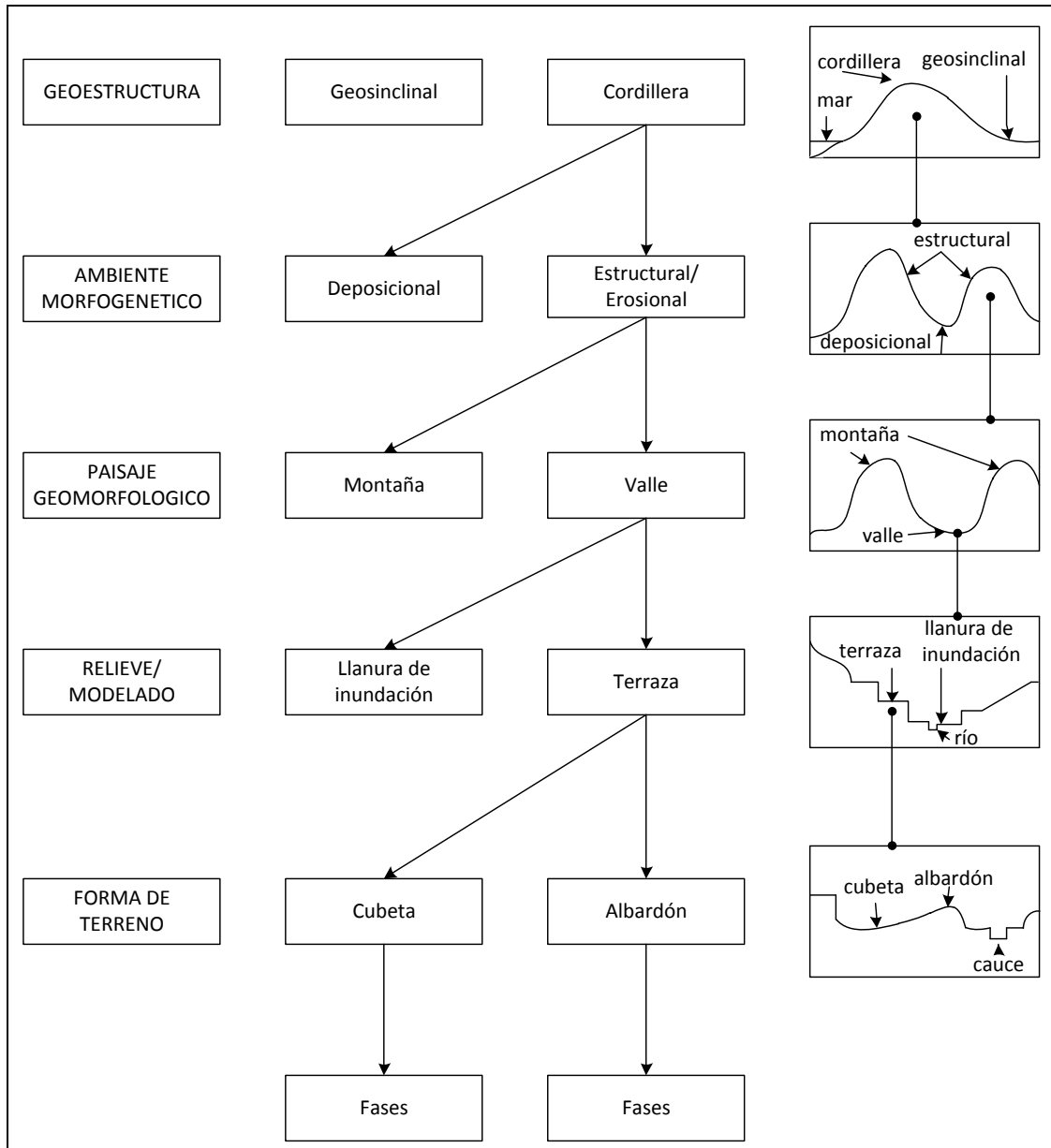


Fig. 5.7 Generalización de la información contenida en la Tabla 5.3 (Zinck, 1988).

5.6 Estructura de un sistema taxonómico de las geoformas

Combinando los criterios básicos para construir un sistema taxonómico (secciones 5.3 y 5.4) con los resultados del ensayo exploratorio para detectar lineamientos de estructura jerárquica en el entorno geomorfológico (sección 5.5), se obtiene una estructura en niveles categóricos anidados. Cinco de estos niveles se deducen fundamentalmente de la expresión fisiográfica (epigea) de las geoformas. Las unidades reconocidas a los dos niveles superiores se identifican con nombres propios, porque pertenecen a un determinado contexto nacional o regional. Son unidades corológicas que se formalizan como unidades taxonómicas bajo el concepto genérico de geoestructura y ambiente morfogenético, respectivamente. Para substanciar las relaciones entre geoforma y suelo hace falta introducir en el sistema información sobre el componente interno

(hipogeo) de las geoformas, a saber el material constituyente, el cual es a su vez el material originario (parental) de los suelos. A consecuencia de lo anterior, es necesario considerar un nivel adicional que documente la litología en caso de substrato rocoso o la facies en caso de materiales no-consolidados. Después de varias iteraciones, se optó por insertar este nivel entre relieve/modelado (nivel 3) y forma de terreno (nivel 1). Su inserción en la parte inferior del sistema se justifica por el hecho de que se necesita a menudo información de campo para complementar o precisar la información general suministrada por los mapas geológicos. De esto resulta finalmente un sistema con seis niveles categóricos, identificados por sus respectivos conceptos genéricos (Tabla 5.4), los cuales se explican en el Capítulo 6. Se puede notar de paso que la obtención de un sistema en seis categorías es conforme a la regla llamada *Ley de Miller*, la cual postula que la capacidad de la mente humana para procesar información se sitúa en un rango de siete renglones más o menos dos (Miller, 1956, 2003).

Tabla 5.4 Síntesis del sistema taxonómico de las geoformas (Zinck, 1988).

Nivel	Categoría	Concepto genérico	Definición
6	Orden	Geoestructura	Extensa porción continental caracterizada por su macroestructura geológica (p.e. cordillera, geosinclinal, escudo)
5	Suborden	Ambiente morfo-genético	Amplio tipo de medio biofísico originado y controlado por un estilo de geodinámica interna y/o externa (p.e. estructural, deposicional, erosional, etc.)
4	Grupo	Paisaje geomorfológico	Gran porción de terreno caracterizada por sus rasgos fisiográficos; corresponde a una repetición de tipos de relieve similares o a una asociación de tipos de relieve disímiles (p.e. valle, altiplanicie, montaña, etc.)
3	Subgrupo	Relieve/modelado	Tipo de relieve originado por una determinada combinación de topografía y estructura geológica (p.e. cuesta, horst, etc.). Tipo de modelado determinado por específicas condiciones morfoclimáticas o procesos morfogenéticos (p.e. glacis, terraza, delta, etc.).
2	Familia	Litología/facies	Naturaleza petrográfica de las rocas duras (p.e. gneis, caliza, etc.) u origen/naturaleza de las formaciones no-consolidadas de cobertura (p.e. periglaciario, lacustre, aluvial, etc.)
1	Subfamilia	Forma de terreno	Tipo básico de geoforma caracterizado por una combinación única de geometría, historia y dinámica.

Capítulo 6

EL PAISAJE GEOMORFOLOGICO: CLASIFICACION DE LAS GEOFORMAS

6.1 Introducción

Los vocablos utilizados en este sistema para designar las geoformas han sido tomados de una selección de manuales, compendios y otros libros generales de geomorfología, incluyendo entre otros: Tricart & Cailleux (1962, 1965, 1967, 1969), Tricart (1965a, 1968, 1977), Derruau (1965, 1966), Thornbury (1966), Viers (1967), CNRS (1972), Garner (1974), Ruhe (1975), Verstappen & Van Zuidam (1975), Visser (1980), Verstappen (1983), Van Zuidam (1985), Lugo-Hubp (1989), Fairbridge (1997), Goudie (2004). Posiblemente, la terminología propuesta no hará unanimidad entre los lectores debido a que algunos términos pueden ser sujetos a controversia o variabilidad de uso entre geomorfólogos, escuelas de geomorfología, y países.

Una parte del vocabulario usado para nombrar geoformas tiene origen vernacular, derivado de términos utilizados localmente para designar rasgos del paisaje y transmitidos oralmente de generación en generación (Barrera-Bassols et al., 2006). Muchos de estos términos, originalmente extraídos del conocimiento indígena por exploradores y geomorfólogos de campo, recibieron posteriormente definiciones más precisas y fueron gradualmente incorporados al lenguaje científico de la geomorfología. Un ejemplo típico es el término de carst, el cual designa un amontonamiento de fragmentos de caliza en lenguaje serbo, y se aplica ahora al proceso de disolución de las rocas calcáreas y a las geoformas resultantes. Muchos términos siguen utilizándose con acepciones diferentes según los países. Por ejemplo, el término de estero, de acuerdo a como se utiliza en España, designa una depresión alargada, intercalada entre cordones arenosos en paisaje costero. En Venezuela, el mismo término se refiere a depresiones cerradas, anegadas la mayor parte del tiempo, en planicies aluviales. Este tipo de desvirtuación de conceptos es común en los países colonizados por Europeos para describir paisajes desconocidos por similitud con su experiencia de origen. De esto resultaron muchas confusiones y ambigüedades de vocabulario que perduran hoy día. Todavía no hay un vocabulario de geoformas uniformemente reconocido, con problemas semánticos adicionales cuando los vocablos se traducen de un idioma a otro. A continuación, se utiliza un amalgama de vocablos provenientes de diversas fuentes para designar las clases de geoformas pertenecientes a las seis categorías del sistema de clasificación (Tabla 5.4).

6.2 La taxonomía: categorías y principales clases de geotaxa

Las categorías son por orden decreciente:

- Geoestructura
- Ambiente morfogenético
- Paisaje geomorfológico
- Relieve/modelado
- Litología/facies
- Forma de terreno

6.2.1 Geoestructura

El concepto de geoestructura se refiere a una extensa porción continental caracterizada por su estructura geológica, incluyendo la naturaleza de las rocas (litología), su edad (estratigrafía) y sus deformaciones (tectónica). Estas macro-unidades tienen relación con la tectónica de placas. Comprenden tres taxa: cordillera, escudo, y geosinclinal.

- *Cordillera*: sistema de cadenas montañosas jóvenes, incluyendo planicies y valles, que han sido fuertemente plegadas por orogénesis relativamente reciente. Las cadenas componentes pueden tener varias orientaciones, pero la cordillera tiene usualmente una sola dirección general.
- *Escudo*: bloque continental que ha estado relativamente estable durante un período largo de tiempo y que ha experimentado sólo ligeras deformaciones, a diferencia de las cordilleras; está compuesto principalmente de rocas del Precámbrico.
- *Geosinclinal (o cuenca sedimentaria)*: amplia depresión, generalmente alargada, que se hundió profundamente durante largos períodos de tiempo y en la cual se han acumulado espesas secuencias de sedimentos clásticos estratificados, capas de material orgánico, y a veces cenizas volcánicas. Por orogénesis y plegamiento, los geosinclinales se transforman en cordilleras.

6.2.2 Ambiente morfogenético

El ambiente morfogenético se refiere a un tipo general de medio biofísico, originado y controlado por un estilo de geodinámica interna y/o externa. Comprende seis taxa.

- *Ambiente estructural*: controlado por la geodinámica interna a través de la tectónica (basculamiento, plegamiento, corrimiento, fallamiento) y/o del volcanismo.
- *Ambiente deposicional*: controlado por la deposición de materiales detríticos, solubles y/o biogénicos, transportados por agua, viento, hielo, movimiento en masa, o gravedad.
- *Ambiente erosional (o denudacional)*: controlado por procesos de disección y remoción de materiales transportados por agua, viento, hielo, movimiento en masa, o gravedad.
- *Ambiente disolucional*: controlado por procesos de disolución de rocas generando erosión química (carst en rocas calcáreas, pseudocarst en rocas no-calcáreas).
- *Ambiente residual*: caracterizado por la presencia de rasgos de relieve en sobrevivencia (p.e. inselberg).
- *Ambiente mixto*: por ejemplo, un ambiente estructural disectado por erosión.

6.2.3 Paisaje geomorfológico

6.2.3.1 Definición

Paisaje es un concepto complejo que cubre muchas acepciones:

- En lenguaje común: escenario de una porción de terreno o su representación pictórica.
- En lenguaje mediático: paisaje político, financiero, intelectual, artístico, etc.
- En lenguaje científico: término usado diferentemente en ecología de paisajes, pedología, biogeografía, geomorfología, arquitectura, etc.

- En la literatura geomorfológica: se utiliza la expresión *paisaje geomorfológico* sin connotación taxonómica o de nivel de generalización, pudiendo corresponder a cualquiera de las seis categorías del sistema que se describe aquí.
- Definición adoptada: amplia porción de terreno caracterizada por su expresión fisiográfica; corresponde a una repetición de tipos de relieve/modelado similares o a una asociación de tipos de relieve/modelado disímiles. Por ejemplo, una planicie aluvial activa puede estar constituida por una repetición sistemática del mismo tipo de modelado, usualmente llanuras de inundación. En contraste, un valle muestra por lo general una asociación de varios tipos de modelado, tales como llanura de inundación, terraza, abanico y glacis.
- Ambigüedad del concepto de paisaje: un valle, por ejemplo, puede cubrir tres tipos diferentes de espacio (Fig. 6.1):
 - Un área de transporte y deposición longitudinal de sedimentos, incluyendo la llanura de inundación (vega) y las terrazas del fondo de valle. Este espacio corresponde al concepto de valle sensu stricto.
 - Un área semejante a la anterior, más los sectores de deposición lateral formando abanicos y glacis. El espacio modelado por depósitos laterales corresponde en realidad al concepto de paisaje de piedemonte.
 - Un área controlada por asentamientos humanos, incluyendo las partes inferiores de las vertientes montañosas aledañas. Esta porción de espacio pertenece de facto al paisaje de montaña.

No hay consenso en cuanto a restringir el concepto de valle a los depósitos longitudinales o incluir también uno o ambos de los dos otros componentes.

6.2.3.2 Taxa

Este sistema de clasificación de geoformas reconoce siete taxa al nivel categórico de paisaje geomorfológico: valle, planicie, peneplanicie (peniplanicie), altiplanicie, piedemonte, lomerío, y montaña (Fig. 6.2).

- *Valle*: porción de terreno alargada y plana, intercalada entre dos zonas circundantes de relieve más alto (p.e. piedemonte, altiplanicie, lomerío, o montaña). Un valle está generalmente drenado por un solo río. Son frecuentes las confluencias de corrientes de agua. Para su reconocimiento, un valle debe tener un sistema de terrazas que, en su mínima expresión, comporta por lo menos una vega y una terraza baja. En ausencia de terrazas, se trata simplemente de un entalle fluvial, el cual queda expresado en un mapa por la red hidrográfica.
- *Planicie*: porción de terreno extensa, plana, no confinada, de posición baja, con poca energía de relieve (1-10 m de diferencia de altura relativa) y pendientes suaves, generalmente menores a 3%. Varios ríos contribuyen a formar un sistema fluvial complejo. Difluencias de corrientes de agua son frecuentes.
- *Peneplanicie*: porción de terreno ligeramente ondulada, caracterizada por una repetición sistemática de cerros bajos, redondeados (colinas) o alargados (lomas), con cimas de similar altura, separados por una densa red hidrográfica de patrón reticular. Las colinas y lomas se forman ya sea por disección de una planicie o altiplanicie anterior, o por erosión y aplanamiento de una superficie originalmente quebrada. Frecuentemente, una peneplanicie consta de una asociación de tres tipos de relieve/modelado: cerros rodeados por un cinturón de glacis y circunscritos en la periferia por vallecitos coluvio-aluviales.

- *Altiplanicie (altiplano, planalto, plateau)*: porción de terreno relativamente elevada, extensa, plana, comúnmente limitada por lo menos en un lado por una caída brusca (escarpe) a terrenos más bajos. Se origina frecuentemente por levantamiento tectónico de una planicie anterior, subsecuentemente subdividida por la incisión de profundas gargantas y valles. La superficie topográfica es tabular o ligeramente ondulada, porque la erosión es mayormente de entalle lineal. El paisaje de altiplanicie es independiente de la altitud, siempre y cuando cumpla con las características diagnósticas de esta geofoma, como son posición alta, topografía tabular, y escarpes en sus bordes o a lo largo de los cursos de agua que la entallan profundamente. De acuerdo a esta concepción, los relieves planos de la Formación Mesa en el oriente venezolano, entallados por una serie de valles de profundidad variable (40-100 m), conforman un paisaje de altiplanicie a no más de 200-300 msnm; mientras que el Altiplano Boliviano es un paisaje de altiplanicie a 3500-4000 msnm.

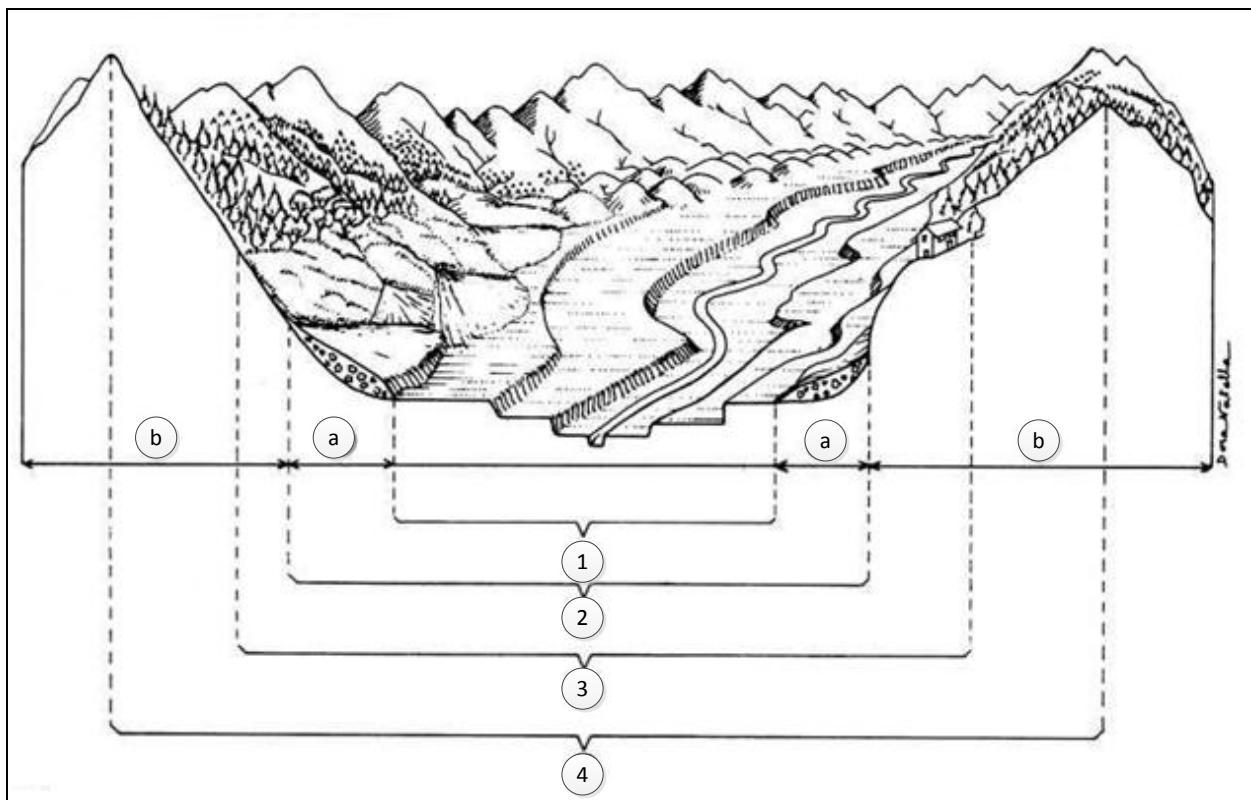


Fig. 6.1 Diferentes definiciones del concepto “Valle” y su expresión espacial (Zinck, 1980).

1. Valle como área de deposición de los aportes longitudinales de sedimentos, correspondiente a la vega (llanura de inundación) y a las terrazas del fondo de valle.
 2. Valle como área de deposición de los aportes longitudinales y de los aportes laterales de sedimentos, incluyendo los planos inclinados del piedemonte.
 3. Valle como área directamente influenciada por la ocupación humana, incluyendo los tramos inferiores de las vertientes circundantes.
 4. Cuenca hidrográfica delimitada por las divisoria de agua comunes entre cuencas adyacentes.
- a. Piedemonte
b. Montaña

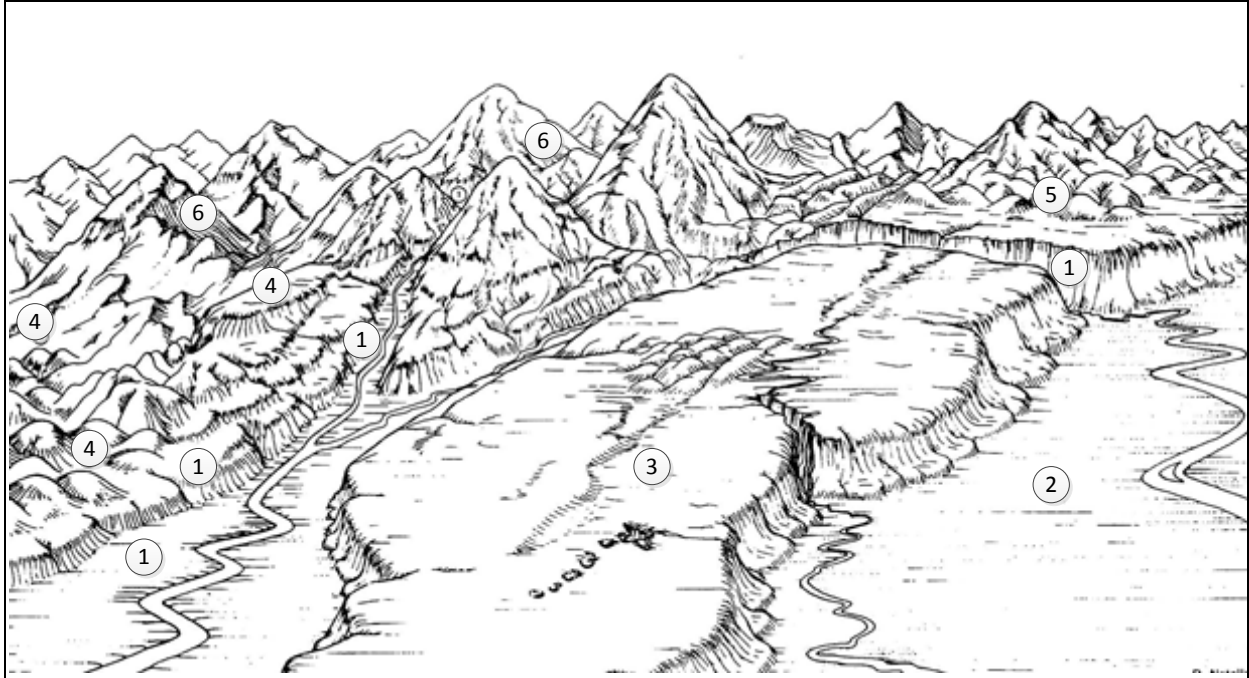


Fig. 6.2 Tipos de paisaje geomorfológico (Zinck, 1980).

1: valle; 2: planicie; 3: altiplanicie; 4: piedemonte; 5: lomerío; 6: montaña

- *Piedemonte*: porción de terreno inclinada al pie de unidades de paisaje más elevadas (p.e. altiplanicie, montaña). Su composición interna es generalmente heterogénea e incluye:
 - colinas y lomas desarrolladas en el substrato precuaternario, expuesto por exhumación después de que la cobertura aluvial del Cuaternario ha sido removida por erosión;
 - abanicos y glaciares, a menudo en posición de terraza (abanico-terrace, glacis-terrace), compuestos por material detrítico del Cuaternario transportado por torrentes desde terrenos altos circundantes.
 Los piedemontes situados al pie de sistemas montañosos recientes (cordilleras) muestran generalmente rasgos neotectónicos, como por ejemplo terrazas falladas y basculadas.
- *Lomerío*: porción de terreno quebrada, caracterizada por una repetición de colinas redondas o lomas alargadas, con cumbres a alturas variables, separadas por una red hidrográfica moderadamente densa y vallecitos coluvio-aluviales.
- *Montaña*: porción de terreno elevada, escabrosa, profundamente disectada, caracterizada por:
 - alturas relativas importantes con relación a las unidades de paisaje circundantes (externas) de posición más baja (p.e. planicies, piedemontes);
 - importante disección interna, generando una neta energía de relieve entre las áreas montañosas y los valles intercalados.

6.2.4 Relieve/modelado

6.2.4.1 Definición

Los conceptos de relieve y modelado están basados en la definición que se da comúnmente a ambos términos en la literatura geomorfológica francesa (Viers, 1967).

- Relieve: geoforma que resulta de una determinada combinación de topografía y estructura geológica (p.e. relieve de cuesta); controlada mayormente por la geodinámica interna.
- Modelado: geoforma determinada por condiciones morfoclimáticas o procesos morfogénicos específicos (p.e. glacis, abanico, terraza, delta); controlada mayormente por la geodinámica externa.

6.2.4.2 Taxa

Relieve y modelado constan de una amplia variedad de taxa que pueden agruparse en familias de acuerdo al proceso formador dominante: estructural, erosional, deposicional, disolucional, y residual (Tabla 6.1). En general, la literatura geomorfológica no establece una clara diferenciación entre las geoformas de nivel 4 (relieve/modelado) y las geoformas de nivel 6 (forma de terreno). La lista de geoformas consignadas en la Tabla 6.1 se obtuvo por tanteo, tomando en cuenta la posibilidad de subdividir los tipos de relieve y de modelado en formas de terreno al nivel 6 del sistema. Se trata de una colección abierta, que permite incorporar geoformas adicionales.

Tabla 6.1 Tipos de relieve y de modelado (Zinck, 1988).

Estructural	Erosional	Deposicional	Disolucional	Residual
depresión	depresión	depresión	depresión	área de aplanamiento
mesa (meseta)	vallecito (vale)	vallecito (swale)	domo	domo
cuesta	cañón (garganta)	llanura de inundación	torre	inselberg
crestón	glacis	plano (p.e. tidal flat)	colina (hum)	campo de bloques
hogback	mesa (meseta)	terrazza	polje	...
barra	colina	mesa (meseta)	vallecito ciego	
flatirón	loma	abanico	vallecito seco	
escarpa	cresta	cono	cañón	
graben	fila	glacis	...	
horst	viga (chevron)	bahía		
anticlinal	cadena (montañosa)	delta		
sinclinal	dique	estuario		
anticlinal excavado	artesa	marisma		
sinclinal colgante	circo	arrecife coralino		
comba	...	atolón		
cadena (montañosa)		...		
cono (volcánico)				
dique				
...				

6.2.5 Litología/facies

6.2.5.1 Definición

El nivel 5 provee información sobre (1) la naturaleza petrográfica de las rocas duras que sirven de substrato a las geoformas, y (2) la facies de las formaciones no-consolidadas de cobertura, que constituyen frecuentemente el componente interno (hipogeo) de las geoformas. En ambos casos, se trata de los materiales parentales de los suelos.

Si el sistema taxonómico estuviera restringido a las geoformas deposicionales, el presente nivel categórico podría resultar redundante y por lo tanto superfluo, ya que la litología estaría cubierta convenientemente por la facies del material geomorfológico (el material parental del suelo) al nivel más bajo del sistema (el nivel de la forma de terreno). Sin embargo, en el caso de las áreas donde los suelos se forman directamente o indirectamente desde el material geológico consolidado, el sistema debe permitir introducir información sobre la litología de las rocas.

En algunas leyendas de mapas o sistemas geomorfológicos en uso, la litología se menciona a niveles categóricos altos. Por ejemplo, en el caso del mapa geomorfológico de Francia, la litología ocupa el segundo estrato informacional en la estructura de la leyenda, después de un primer nivel dedicado a la localización de los sitios de descripción (CNRS, 1972).

Analizando la porción de terreno representada en la Fig. 6.3, un observador reconocería sucesivamente (jerárquicamente) los patrones identificados en la Tabla 6.2, por razonamiento en el campo o por medio de fotointerpretación. El ejemplo muestra que la litología debe situarse a un nivel categórico más bajo que los niveles donde se encuentran los conceptos de paisaje y de relieve/modelado, respectivamente, tomando en cuenta factores como el mecanismo de subdivisión jerárquica, el nivel de percepción y el grado de resolución por interpretación de fotos aéreas (IFA), y la necesidad de datos de campo y laboratorio.

6.2.5.2 Taxa

- Clases de rocas duras (de acuerdo a la clasificación convencional de las rocas):
 - ígneas, incluyendo rocas intrusivas (p.e. granito, granodiorita, diorita, gabbro) y rocas extrusivas (p.e. riolita, dacita, andesita, basalto)
 - metamórficas (p.e. pizarra, esquisto, gneis, cuartzita, mármol)
 - sedimentarias (p.e. conglomerado, arenisca, limolita, lutita, caliza)
- Facies de materiales no-consolidados:
 - nival (nieve)
 - glaciar (hielo, glaciares)
 - periglacial (hielo, crioclastismo, termoclastismo)
 - aluvial (corriente de agua concentrada = fluvial = río)
 - coluvial (corriente de agua difusa)
 - diluvial (corriente de agua torrencial)
 - lacustre (depósitos en lagos)
 - lagunar (depósitos en aguas salobres)
 - litoral o costero (depósitos a lo largo de la franja entre continente y mar; \cong tidal)
 - movimiento en masa (flujo de detritos plásticos y líquidos; deslizamientos)
 - gravedad (caída de rocas)
 - volcánico (flujo superficial o salpicación aérea de materiales ígneos extrusivos)
 - biogénico (arrecife de coral)
 - mixto (fluvio-glaciar, coluvio-aluvial, fluvio-volcánico)
 - antrópico (kitchen midden, sambaqui, tumulus, escombro, suelo urbano, etc.)

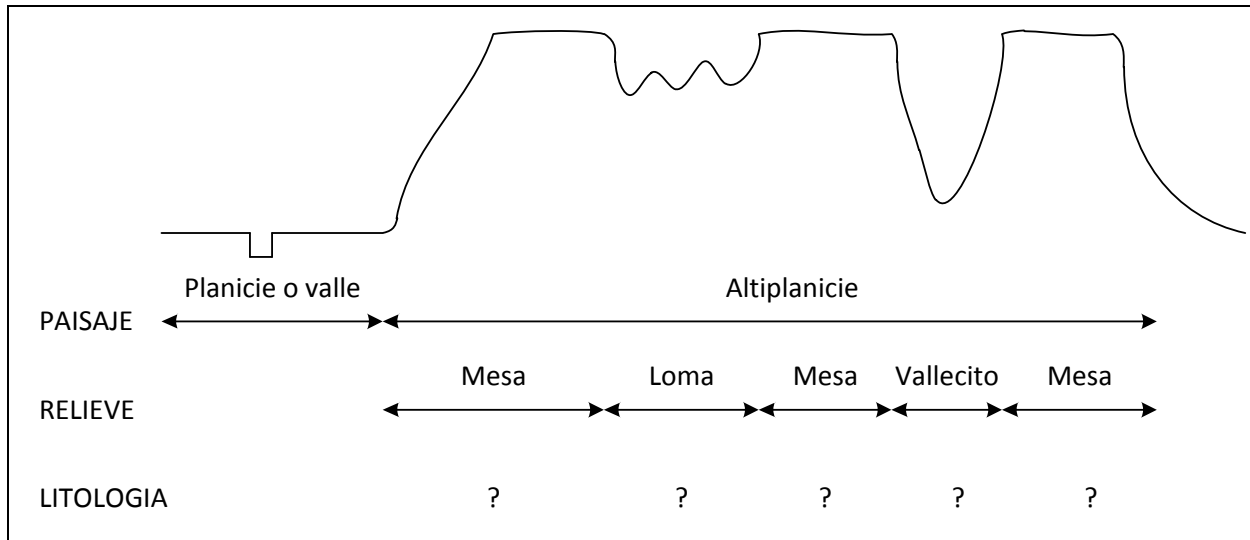


Fig. 6.3 Partición secuencial de un paisaje de altiplanicie en patrones de relieve para inferir la litología del substrato (ver Tabla 6.2 para las posibles alternativas de litología) (Zinck, 1988).

Tabla 6.2 Inferencia de la litología del substrato correspondiente al paisaje de altiplanicie representado en la Fig. 6.3 (Zinck, 1988).

Nivel categórico	Rasgos de identificación	Geoforma o material inferido	Concepto genérico	Resolución	
				IFA	Campo
Alto	Topografía de cumbre plana Posición elevada con relación a los alrededores Bordes abruptos (escarpes) Profunda incisión de la red de drenaje	Altiplanicie	Paisaje	+	-
Intermedio	Topografía de cumbre dividida en: (1) áreas planas (2) áreas onduladas	(1) Mesas (2) Lomas	Relieve/ modelado	+	+
Bajo	(1) Si hay concordancia entre la topografía y el buzamiento de las capas de roca, entonces se tiene una superficie estructural apoyada en rocas estratificadas de disposición horizontal. (2) Si no hay concordancia entre la topografía y el buzamiento de las capas de roca, entonces se tiene una superficie de erosión truncando rocas en disposición no-horizontal.	(1a) Rocas sedimentarias resistentes (caliza, arenisca) o (1b) Rocas ígneas extrusivas resistentes (basalto, lava) (2a) Rocas estratificadas tectonizadas (sedimentarias o volcánicas) o (2b) Rocas ígneas intrusivas	Litología	-	+

IFA: interpretación de fotos aéreas

6.2.6 Forma de terreno

6.2.6.1 Definición

El término *forma de terreno* se usa frecuentemente como un concepto general, que cubre cualquier tipo de unidad geomorfológica desde el nivel de paisaje hasta los niveles más bajos del sistema, sin distinción de jerarquía o de grado de abstracción. En este sentido, el término de forma de terreno es sinónimo de geoforma.

En este sistema jerárquico de clasificación de las geoformas, la forma de terreno se considera como el concepto genérico del nivel inferior del sistema. Corresponde a la unidad geomorfológica elemental, la cual puede ser dividida sólo por medio de fases. Se caracteriza por su geometría, dinámica, e historia.

En general, los manuales de geomorfología no establecen una diferenciación jerárquica de geoformas por debajo del nivel de paisaje. La ordenación de las colecciones de geoformas consignadas en las Tablas 6.3 a 6.11 se basa en juicio experto y experiencia de campo. Se consideró apropiado repartir las formas de terreno en dos grupos: las formas de terreno predominantemente controladas por la estructura geológica (geodinámica interna) y las formas de terreno predominantemente controladas por los agentes morfogenéticos (geodinámica externa). La sección 6.3 provee más detalles.

6.2.6.2 Taxa

- Geoformas predominantemente controladas por la estructura geológica
 - Estructurales (monoclinales, plegadas, falladas)
 - Volcánicas
 - Cársticas
- Geoformas predominantemente controladas por los agentes morfogenéticos
 - Nivales, glaciares, periglaciares
 - Eólicas
 - Aluviales y coluviales
 - Lacustrinas
 - De gravedad y movimientos en masa
 - Litorales
- Geoformas banales

6.3 Clasificación de las geoformas a los niveles inferiores

6.3.1 Introducción

Los geotaxa pertenecientes a los niveles altos y medios del sistema se encuentran definidos en la sección anterior. Esta sección presenta un ensayo de clasificación de las geoformas a los niveles categóricos inferiores del sistema: relieve/modelado y forma de terreno. La lista de geotaxa no es exhaustiva, ni exenta de ambigüedades. En la literatura especializada se encuentra una variedad de términos sinónimos, y un mismo tipo de geoforma puede ser referido con nombres diferentes. Con el avance de la cartografía geomorfológica se identificarán probablemente nuevos tipos de

geoforma y nuevos nombres aparecerán. Los conceptos y vocablos utilizados aquí fueron extraídos de manuales y tratados generales de geomorfología. En los casos de multiplicidad de términos para designar una misma geoforma, se dio preferencia al término de más común uso. Vocablos sin términos correspondientes en español se mantuvieron en su idioma original, cuando la traducción literal hubiese resultado insatisfactoria (p.e. hogback, flatiron).

Un criterio frecuentemente usado para agrupar las geoformas por familias es su origen o modo de formación. El concepto de origen se utiliza aquí en un sentido amplio, pudiendo referirse indistintamente a un tipo de ambiente (p.e. estructural), a un agente (p.e. viento), a un sistema morfogenético (p.e. periglaciario), o a un simple proceso (p.e. explayamiento).

El concepto de origen, como sinónimo de formación, es implícitamente o explícitamente presente a todos los niveles del sistema taxonómico, pero su peso diagnóstico aumenta en los niveles inferiores. El origen controlado por la geodinámica interna es más importante en las categorías superiores, mientras que el origen controlado por la geodinámica externa es más importante en las categorías inferiores. De lo anterior resulta que hay una jerarquización diferencial de los atributos diagnósticos de acuerdo al origen de las geoformas. Por ejemplo, en el caso de las geoformas de origen estructural, los rasgos genéticos tienen peso máximo a nivel de tipo de relieve, mientras que en el caso de las geoformas originadas por agentes subaéreos (p.e. agua, viento, hielo) los rasgos genéticos tienen peso máximo a los niveles más bajos del sistema (facies y forma de terreno).

Un mismo agente morfogenético puede causar rasgos erosionales o rasgos deposicionales de acuerdo al contexto en el cual el proceso se desarrolla. Por esta razón, se hace una diferenciación entre formas de terreno erosionales y deposicionales. Similarmente, geoformas estructurales pueden haber sido fuertemente modificadas por erosión, lo que lleva a distinguir entre formas originales (primarias) y formas derivadas.

Se considera una forma de terreno como erosional cuando la erosión, ya sea por remoción areal de material o por disección lineal, es responsable de crear la configuración dominante de la geoforma. Modificaciones locales causadas, por ejemplo, por la incisión de surcos y cárcavas o por deflación eólica superficial se identifican como fases de las unidades taxonómicas afectadas. Similarmente, rasgos puntuales y fenómenos de limitada extensión no se consideran como unidades taxonómicas y se representan mediante símbolos cartográficos en los mapas (p.e. geysers, bloques erráticos, pingos, etc.).

Para la definición de las geoformas, cuyos nombres se encuentran reportados en las tablas anexas, se recomienda consultar manuales generales y diccionarios de geomorfología: Derruau (1966), CNRS (1972), Visser (1980), Lugo-Hubp (1989), entre otros. Algunas geoformas pueden aparecer nombradas a la vez a nivel de relieve/modelado y a nivel de forma de terreno, porque su posición taxonómica en el sistema de clasificación todavía no está claramente definida.

6.3.2 Geoformas mayormente controladas por la estructura geológica

El control geoestructural actúa por intermedio de la tectónica, del volcanismo y/o de la litología. Por lo tanto, la geodinámica interna es determinante en la formación de esta clase de geoformas, en combinación con procesos externos de erosión o deposición en grados variables. La disección de relieves estructurales primarios por erosión mecánica, por ejemplo, resulta en la formación de relieves derivados. La erosión química por disolución de calizas o desagregación de areniscas causa la formación de relieves cársticos y pseudocársticos. La deposición de cenizas o escorias volcánicas puede alterar la configuración original de un relieve estructural.

6.3.2.1 Geoformas estructurales propiamente dichas (Tabla 6.3)

- Relieves monoclinales: los estratos de roca se inclinan en una sola dirección con buzamiento variable desde 1° hasta 90° (Fig. 5.4). Estratos de rocas duras (p.e. arenisca, cuarcita, caliza) sobreyacen a rocas más blandas (p.e. marga, lutita, pizarra). El binomio roca dura/roca blanda puede repetirse en el paisaje, creando desdoblamiento del relieve (p. e. cuevas desdobladas).
- Relieves plegados de estilo jurásico: pliegues simétricos en secuencias regulares de altos estructurales (anticlinales) y bajos estructurales (sinclinales) en su forma original o casi original. Están relacionados con espesores importantes de rocas sedimentarias estratificadas.
- Relieves plegados de estilo apalachiano: relieves plegados en avanzado estado de aplanamiento y disección.
- Relieves plegados complejos: relieves primarios o derivados controlados por tectónica de sobrecorrimiento (cabalgamiento) y pliegues complejos.
- Relieves fallados: relieves primarios o derivados originados por fallas o fracturas. El estilo de fallamiento (normal, inverso, conforme, contrario) controla el tipo de relieve resultante.

6.3.2.2 Geoformas volcánicas

Los materiales volcánicos pueden constituir lo esencial del substrato o limitarse a formaciones de cobertura en una amplia variedad de paisajes incluyendo montaña, altiplanicie, piedemonte, planicie y valle. Las geoformas volcánicas son de complejidad variable, lo dificulta una estricta separación entre tipos de relieve y formas de terreno. Un cono de ceniza, por ejemplo, puede ser muy simple y constituir una forma de terreno elemental, mientras que un cono de estratovolcán es generalmente un edificio volcánico mucho más complejo con varias formas de terreno (Tabla 6.4).

6.3.2.3 Geoformas cársticas

El carstismo opera por erosión química de las rocas solubles y origina terrenos esculpidos de configuración compleja, que se caracterizan por geoformas residuales de relieve positivo o negativo. Los taxa resultantes entran en el sistema esencialmente a nivel del tipo de relieve. Las geoformas cársticas son a la vez endógenas por la influencia de la litología en su formación y exógenas por el proceso de disolución que las origina (Tabla 6.5).

Tabla 6.3 Geoformas estructurales (Zinck, 1988).

Relieve		Forma de terreno
Primario	Derivado	
<i>Monoclinal</i>		
Cuesta (1-10° buzamiento)	Cuesta desdoblada	Frente de relieve
Crestón (10-30°)	Cerro testigo	Escarpe (cornisa)
Hogback (30-70°)	Antecerro	Talud de derrubios
Barra (70-90°)	Depresión ortoclinal (subsecuente)	Reverso de relieve (dorso)
Flatiron	Depresión cataclinal (consecuente)	Superficie estructural
	Depresión anaclinal (obsecuente)	Superficie subestructural
		Embudo de abertura cataclinal
<i>Plegado (jurásico)</i>		
Monte (anticlinal conservado)	Anticlinal excavado	Charnela anticlinal
Valle (sinclinal conservado)	Sinclinal colgante	Charnela sinclinal
	Viga (chevron)	Flanco de pliegue
	Crestón	Escarpe
	Comba	Talud de derrubios
	Cluse	
	Ruz	
<i>Plegado (apalachiano)</i>		
	Anticlinal truncado	Escarpe
	Barra	Talud de derrubios
	Sinclinal colgante	
	Embudo de abertura cataclinal	
<i>Plegado (complejo)</i>		
Manto de cabalgamiento	Klippe	Escarpe
Manto de sobrecorrimiento	Crestón de flanco de pliegue	Talud de derrubios
Pliegue en cofre	Escarpe de pliegue fallado	
Pliegue diapírico	Ventana tectónica (comba)	
<i>Fallado/fracturado</i>		
Escarpe de falla	Escarpe de línea de falla	Escarpe
Pilar tectónico (horst)	Escarpe con facetas trapezoidales	Talud de derrubios
Fosa tectónica (graben)	Cuesta	
Bloques de falla escalonados		
Bloques de falla monoclinales		

Tabla 6.4 Geoformas volcánicas (Zinck, 1988).

Relieve	Variedad de geoformas
Depresión	Cráter
	Caldera
	Maar
	Lago
Cono	Cono de ceniza
	Cono de escoria
	Cono de lava
	Cono de salpicaduras de lava
	Volcán en escudo
	Estratovolcán
	Cumulovolcán
Domo	Domo de intrusión
	Domo de extrusión
	Cilindro de extrusión
Llanura	Colada de lava
	Lava caótica o escoriácea (aa)
	Lava rizada o cordada (pahoehoe)
	Lava de almohada
	Flujo fluviovolcánico
	Campo de escorias
	Manto de cenizas
	Flujo piroclástico
Mesa	Planèze
Cuesta	Flujo de lava colgante
	Sill
Barra	Dique longitudinal
Dique	Dique anular (ring-dike)
Espigón	Escarpe de volcán
Pitón	Cuello volcánico (neck)
	Chimenea volcánica
	Aguja de lava

Tabla 6.5 Geoformas cársticas (Zinck, 1988).

Relieve	Forma de terreno
Carst de pitones (hum)	Campo de lapiez
Carst de torrecillas (hum)	Sima (aven)
Carst cónico (domos)	Ponor
Carst espumoso	Dolina
Llanura cárstica (polje)	Uvala
Cañón (valle de colapso)	
Valle ciego	
Valle seco	

6.3.3 Geoformas mayormente controladas por los agentes morfogenéticos

El agua, el viento y el hielo son agentes morfogenéticos que causan erosión o deposición de acuerdo a las condiciones ambientales prevalecientes. Las geoformas resultantes son generalmente más homogéneas que las geoformas controladas por la estructura interna. Por esta razón, muchas de las geoformas originadas por agentes externos pueden ser clasificadas a nivel de forma de terreno. Se distinguen aquí seis familias principales de formas de terreno de acuerdo a su origen, tal como sigue.

6.3.3.1 Geoformas nivales, glaciares y periglaciares

Las geoformas nivales, glaciares y periglaciares tienen en común el hecho de que se desarrollan en ambientes fríos (altas latitudes y altitudes) por la acumulación de nieve (geoformas nivales), la alternancia hielo-deshielo causando gelifracción (geoformas periglaciares) o la acumulación de hielo en masa (geoformas glaciares). Algunas geoformas se originan por deposición (p.e. morrenas), otras por erosión (p.e. circo glaciar) (Fig. 6.4). Algunas pueden reconocerse y mapearse como formas de terreno elementales (p.e. una morrena). Otras son tipos de modelado que constan de más de una clase de forma de terreno. Una artesa glaciar, por ejemplo, puede contener diversos tipos de morrena (de fondo, lateral, frontal), superficies de rocas aborregadas, valles colgantes, lagunas, entre otros (Tablas 6.6 y 6.7). Las formas nivales no son formas de terreno propiamente dichas, ya que están cubiertas de nieve (p.e. circo de nivación, manto de nieve permanente, corredor y abanico de avalancha de nieve).

Tabla 6.6 Geoformas glaciares (Zinck, 1988).

Modelado	Forma de terreno
Circo	Umbral
Artesa	Cubeta de sobre-excavación Hombreira (rellano) Valle colgante (garganta) Superficie de rocas aborregadas Morrena de fondo Morrena lateral Morrena central Morrena frontal (terminal) Arco morrénico Corriente de bloques Depresión de hielo muerto
Llanura	Campo de rocas aborregadas Campo de drumlin Morrena de fondo Morrena de empuje Kame Ôs Esker Explayamiento fluvio-glaciar (sandur)

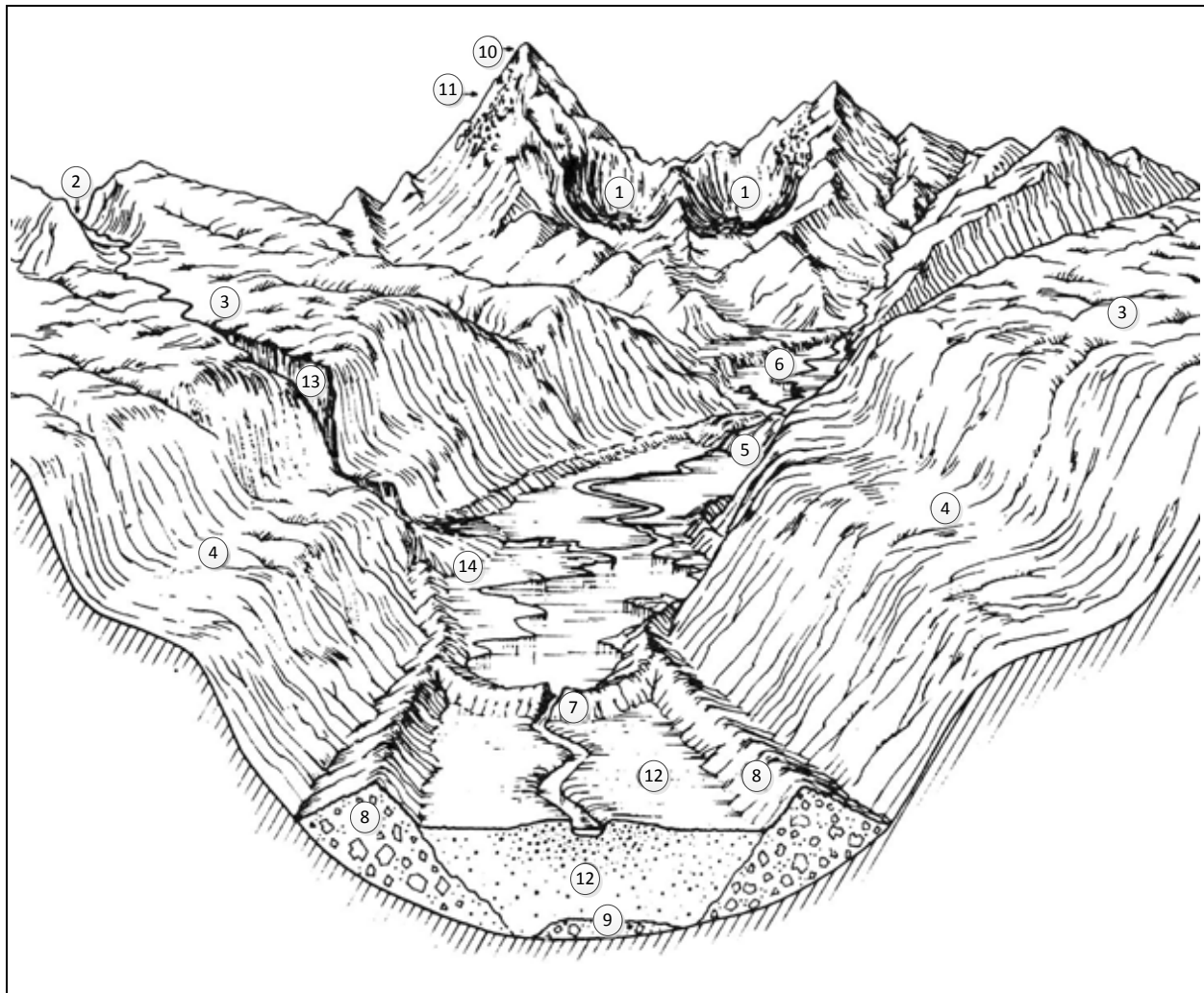


Fig. 6.4 Configuración y componentes de un valle o artesa glaciar (Zinck, 1980).

Modelado de erosión glaciar

- 1 Circo glaciar con laguna actual
- 2 Ensilladura de difluencia glaciar
- 3 Rocas aborregadas con superficie pulida
- 4 Hombreira o rellano de artesa glaciar
- 5 Umbral con estrechamiento del valle
- 6 Cubeta de sobre-excavación con laguna

Modelado de acumulación glaciar

- 7 Morrena frontal reteniendo laguna
- 8 Morrena lateral
- 9 Morrena de fondo

Modelado periglaciar

- 10 Horn o picacho de gelifracción
- 11 Talud de derrubios de gravedad

Modelado fluvial postglaciar

- 12 Superficie de agradación por relleno aluvial
- 13 Valle lateral colgante con escalones de confluencia
- 14 Cono de deyección

Tabla 6.7 Geformas periglaciares (Zinck, 1988).

Modelado	Forma de terreno
Cresta (gelifracción)	Nunatak (horn)
	Talud de derrubios
	Abanico de derrubios
Llanura	Suelo poligonal
	Campo de barro
	Campo de piedras
	Enlosado nival
	Césped almohadillado
	Turbera
	Campo de dunas
	Manto de loess
Vertiente	Derrubio de gravedad
	Derrubio ordenado
	Colada de bloques
	Glaciar rocoso
	Suelo estriado
	Colada de barro (soliflucción)

6.3.3.2 Geformas eólicas

Los ambientes secos, desérticos y subdesérticos, son los más favorables a la formación de geformas eólicas. Estas ocurren esencialmente en paisaje de planicie costera o continental donde el efecto del viento es más pronunciado (Tabla 6.8).

Tabla 6.8 Geformas eólicas (Zinck, 1988).

Modelado	Forma de terreno
Llanura (campo de dunas, erg)	Barcana
	Nebka
	Duna parabólica
	Duna longitudinal
	Duna transversal
	Duna piramidal (ghourd)
	Duna reticulada
	Albardón (dique) eólico
	Cobertura de loess
	Cubeta de deflación
	Superficie de deflación pedregosa (reg)
	Yardang
Meseta	Superficie de deflación rocosa (hamada)

6.3.3.3 Geformas aluviales y coluviales

Geformas aluviales pueden ocurrir en prácticamente todos los tipos de paisaje, pero mayormente en planicies y valles formando terrazas y llanuras de inundación. Las geformas coluviales son características del paisaje de piedemonte (Tabla 6.9).

Tabla 6.9 Geoformas aluviales y coluviales (Zinck, 1988).

Facies deposicional/erosión	Forma de terreno
Facies de exceso de carga	Banco de arena de cauce
	Orillar (point bar)
	Albardón de río
	Albardón de distributario (difluente)
	Albardón de brazo deltáico
	Eje de explayamiento
	Napa de explayamiento
	Explayamiento de ruptura
	Abanico de explayamiento
	Glacis de explayamiento
	Cono de deyección
Facies de desbordamiento	Napa de desbordamiento
	Cubeta de desbordamiento
Facies de decantación	Cubeta de decantación
	Depresión lateral
	Pantano (backswamp)
	Meandro abandonado con laguna semilunar
Facies coluvial	Cauce colmatado
	Abanico coluvial
Rasgos de erosión hídrica	Glacis coluvial
	Superficie de ablación
	Surco
	Cárcava
	Badland

6.3.3.4 Geoformas lacustres

El retroceso episódico de los lagos a consecuencia de fases de desecamiento - un proceso muy común en lagos originados después de la última glaciación - deja expuesto material lacustrino en forma de terrazas escalonadas. En ambiente árido y semiárido ocurren depósitos fluvio-lacustrinos estratificados en depresiones de tipo playa. En áreas emergidas de lagos proglaciares se observan depósitos estratificados de tipo varva.

6.3.3.5 Geoformas de gravedad y movimiento en masa

El estado mecánico del material, con solución de continuidad desde sólido hasta líquido, controla los procesos de movimiento en masa incluyendo reptación, colada, deslizamiento y caída, que dan origen a las formas de terreno (Tabla 6.10).

6.3.3.6 Geoformas costeras

Las geoformas costeras más típicas se desarrollan en los terrenos litorales bajos y caracterizan el modelado de las marismas, estuarios, deltas, y bahías. El acantilado es la forma más común en las costas rocosas (Tabla 6.11).

Tabla 6.10 Geoformas de gravedad y movimiento en masa (Zinck, 1988).

Proceso (estado del material)	Forma de terreno
Reptación (variable)	Manto de reptación
	Pisada de vaca
	Terraceta
Colada o flujo (plástico/líquido)	Flujo de rocas
	Flujo de tierra
	Flujo de detritos
	Flujo de lodo
	Soliflucción generalizada
	Lengua de soliflucción
	Lupia de soliflucción
	Alud (lava) torrencial
Deslizamiento (semi-sólido)	Deslizamiento rotacional (slump)
	Deslizamiento traslacional (en plancha)
	Deslizamiento de rocas
	Deslizamiento de bloques
	Deslizamiento de detritos
	Deslizamiento de tierra
Caída (sólido)	Superficie/cara de desprendimiento
	Talud de derrubios

Tabla 6.11 Geoformas costeras (litorales) (Zinck, 1988).

Modo de formación	Forma de terreno
Deposición mecánica	Playa
	Cordón de playa (con gradas y cresta)
	Barra prelitoral o de antecosta (con cresta y surco)
	Barra de bahía (restinga)
	Flecha litoral
	Tómbolo
	Brecha colmatada
	Llano de marea lodoso (con slikke-schorre)
	Albardón de marea
	Pantano litoral
	Albufera (laguna)
	Duna
	Plataforma de roca de playa
Formación biogénica	Arrecife barrera
	Arrecife anular
	Arrecife litoral
	Arrecife coralino
	Atolón
Erosión	Acantilado
	Superficie de abrasión
	Canal de marea
	Grao

6.3.4 Geoformas “banales”

Se llaman *banales* aquellas geoformas que no presentan rasgos fisiográficos particularmente resaltantes (CNRS, 1972). Estas geoformas ocurren por lo general en rocas sedimentarias blandas, desprovistas de control estructural (p.e. margas y otras rocas arcillosas), y en rocas ígneo-metamórficas sin esquistosidad marcada (p.e granito, gneis). Su expresión fisiográfica más común es la de vertientes convexo-cóncavas.

6.3.4.1 Características generales

- Topografía general de colinas, lomas, cerros, filas y crestas, originada por disección.
- Poca o ninguna influencia estructural, en particular ausencia de control específico de tectónica de fallas en la topografía.
- Presencia de fracturas que favorecen y controlan la incisión y la organización de la red hidrográfica.
- El patrón de drenaje tiene influencia fundamental en la configuración de la topografía de disección resultante, especialmente en los paisajes de peneplanicie y lomerío.
- Substrato rocoso homogéneo en amplias extensiones.
- Material de moderada a débil resistencia a la erosión, incluyendo:
 - rocas ígneas (granito, diorita, gabbro)
 - rocas metamórficas (gneis, esquisto, pizarra)
 - rocas sedimentarias (lutita, marga)

6.3.4.2 Clases de geoformas banales

Geoformas banales ocurren a nivel de relieve/modelado y de forma de terreno en paisajes de montaña, lomerío, peneplanicie, y piedemonte.

(a) A nivel de relieve/modelado

Dos clases son frecuentes:

- La configuración de espinazo (o esqueleto de pez) que consiste en la asociación de una dorsal maestra longitudinal y de lomas perpendiculares a la anterior (viga, chevron, rafter, nariz), separadas por entalles de vallecitos (Fig. 6.5). Este tipo de relieve es frecuente en rocas sedimentarias fracturadas. Su evolución ulterior genera relieves de configuración alargada en forma de lomo-de-caballo.
- La configuración de media-naranja que consiste en una repetición sistemática de colinas redondeadas de similar altura. Este tipo de relieve es típico del paisaje de peneplanicie en substrato ígneo o metamórfico homogéneo pero intensivamente fracturado, con patrón de drenaje reticular. Es frecuente en los escudos precámbricos de la zona intertropical.

(b) A nivel de forma de terreno

El concepto más conveniente para subdividir un relieve de loma o colina es el de faceta de vertiente. A este efecto pueden implementarse los modelos de vertiente existentes, como el modelo de las nueve facetas de Conacher & Dalrymple (1977) o el modelo de las cinco facetas

de Ruhe (1975) En la Tabla 6.12, se muestran las relaciones entre faceta de vertiente, perfil topográfico, y dinámica morfogenética dominante en el modelo de Ruhe (Fig. 6.6). Es de notar que la faceta de pie-de-vertiente no es en realidad una faceta de vertiente; es una unidad que pertenece al valle o vallecito adjunto, con pendiente perpendicular a la de la vertiente y con depósitos longitudinales.

Modelos son generalizaciones convenientes de situaciones reales. El modelo general de vertiente con perfil convexo-cóncavo puede ser perturbado por irregularidades. Por ejemplo, el perfil transversal de una colina o loma muestra frecuentemente complicaciones que hay que tomar en cuenta en el mapeo de geformas y suelos. Estas complicaciones pueden derivar de la heterogeneidad del substrato geológico local o de la morfodinámica local. Una vertiente convexo-cóncava puede ser interrumpida por resaltos y escarpes que reflejan influencia tectónica local o cambios litológicos. Igualmente, el perfil topográfico general puede ser localmente disturbado o modificado por erosión hídrica (entalle de surcos o cárcavas) o por movimientos en masa (terracedas, deslizamientos, cicatrices y lenguas de soliflucción).

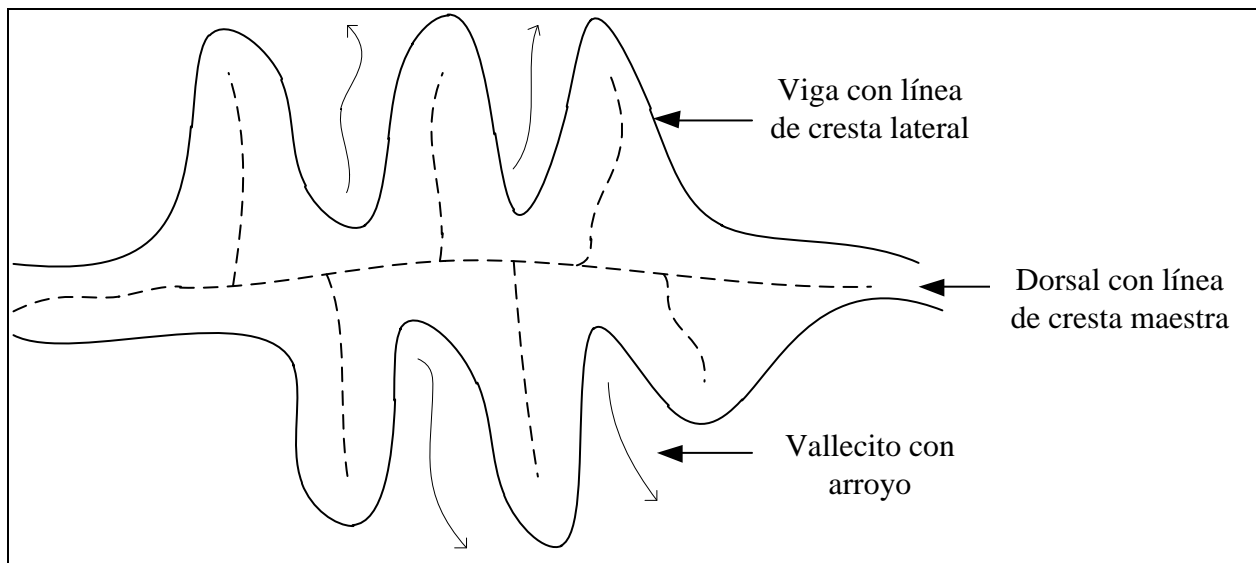


Fig. 6.5 Lomerío con configuración de relieve en espinazo compuesto de una dorsal longitudinal y vigas perpendiculares.

Tabla 6.12 El modelo de facetas de vertiente (adaptado de Ruhe, 1975).

Faceta de vertiente	Perfil topográfico	Morfodinámica dominante
Cumbre	Plano/convexo	Ablación/erosión
Hombro	Convexo	Erosión
Ladera	Rectilíneo-inclinado	Material en tránsito
Falda	Cóncavo	Acumulación lateral
Pie-de-vertiente	Cóncavo/plano	Acumulación longitudinal

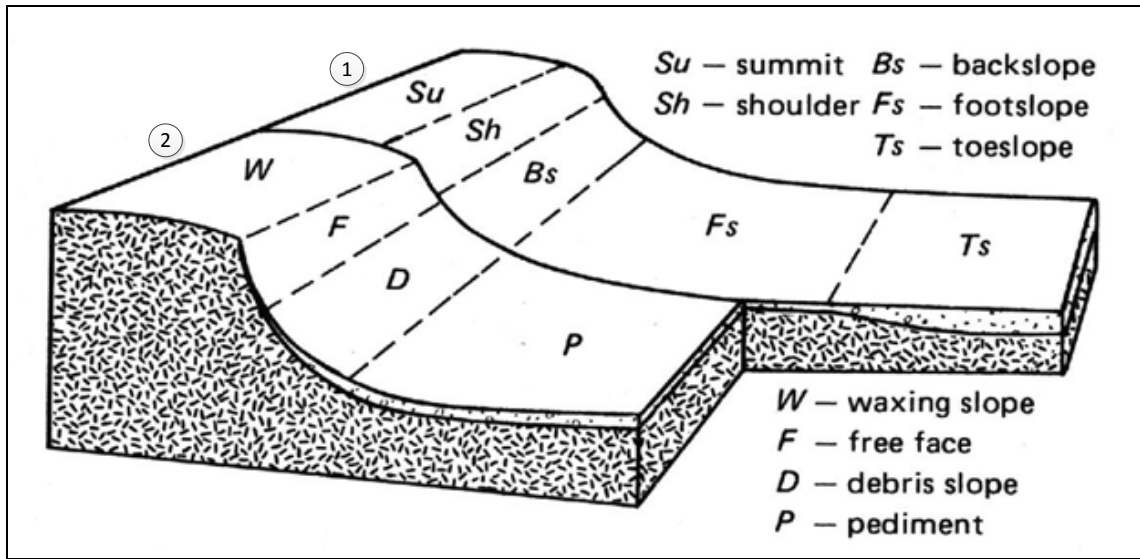


Fig. 6.6 Modelos de vertiente convexo-cóncava con depósitos laterales (tomado de Ruhe, 1975).
 1. Modelo de Ruhe: Su = cumbre, Sh = hombro, Bs = ladera, Fs = falda, Ts = pie-de-vertiente (este último con depósitos longitudinales).
 2. Modelo combinando elementos tomados de Wood (1942) y King (1957): W = superficie de ablación, F = cara rocosa, D = pendiente de detritos, P = pedimento.

Capítulo 7

EL PAISAJE GEOMORFOLOGICO: ATRIBUTOS DE LAS GEOFORMAS

7.1 Introducción

Los atributos son características usadas para la descripción, identificación y clasificación de las geoformas. Los atributos son indicadores descriptivos y funcionales que hacen el sistema multicategorico de geoformas operacional. Esto implica cumplir con dos requerimientos: (1) seleccionar atributos descriptivos que permitan identificar las geoformas, y (2) seleccionar atributos diferenciadores que permitan clasificar las geoformas a los varios niveles categoricos del sistema taxonomico.

Para determinar una geoforma, es necesario realizar secuencialmente las siguientes operaciones:

- descripción y medición, para caracterizar propiedades y constituyentes;
- identificación, para comparar las geoformas a determinar con tipos de referencia establecidos;
- clasificación, para colocar las geoformas a determinar en el sistema taxonomico.

Para este propósito, se usan cuatro clases de atributos, siguiendo lo que Tricart propuso con respecto a los cuatro tipos de datos que debe comportar un mapa geomorfológico detallado (Tricart, 1965a, 1965b):

- atributos geomorfográficos, para describir la geometría de las geoformas;
- atributos geomorfométricos, para medir las dimensiones de las geoformas;
- atributos geomorfogenéticos, para determinar el origen y la evolución de las geoformas;
- atributos geomorfocronológicos, para circunscribir el contexto temporal en que se originaron las geoformas.

Con el fin de simplificar las expresiones, se acostumbra omitir el prefijo *geo* en la denominación de los atributos.

Los atributos morfométricos y morfográficos se aplican principalmente al componente externo (epigeo) de la geoforma, son esencialmente descriptivos, y pueden ser extraídos de documentos de sensoramiento remoto o derivados de modelos digitales de elevación. Los atributos morfogenéticos y morfocronológicos se aplican mayormente al componente interno (hipogeo) de la geoforma, se caracterizan mediante observaciones y mediciones de campo, y requieren ser substanciados por determinaciones de laboratorio.

7.2 Atributos morfográficos: la geometría de las geoformas

Los atributos morfográficos son esencialmente descriptivos. Describen la geometría de las geoformas en términos topográficos y planimétricos. Se utilizan corrientemente para identificación automatizada de ciertos rasgos de las geoformas a partir de MDE (Hengl, 2003).

7.2.1 Topografía

La topografía se refiere a la sección transversal de una porción de terreno (Fig. 7.1). Puede visualizarse en dos dimensiones mediante un corte topográfico o perfil de la topografía (Tabla 7.1) y en tres dimensiones mediante un modelo tridimensional de terreno o forma de la topografía (Tabla 7.2). La caracterización de este rasgo es particularmente importante en áreas de pendiente. La forma y el perfil de la topografía están relacionados entre sí, pero se describen a niveles categóricos diferentes. Los atributos de la forma topográfica se utilizan a nivel de paisaje, mientras que los atributos del perfil topográfico se utilizan a nivel de relieve y de forma de terreno. El tercer descriptor, la exposición que indica la orientación del relieve en las cuatro direcciones cardinales y sus subdivisiones, puede utilizarse a cualquier nivel del sistema.

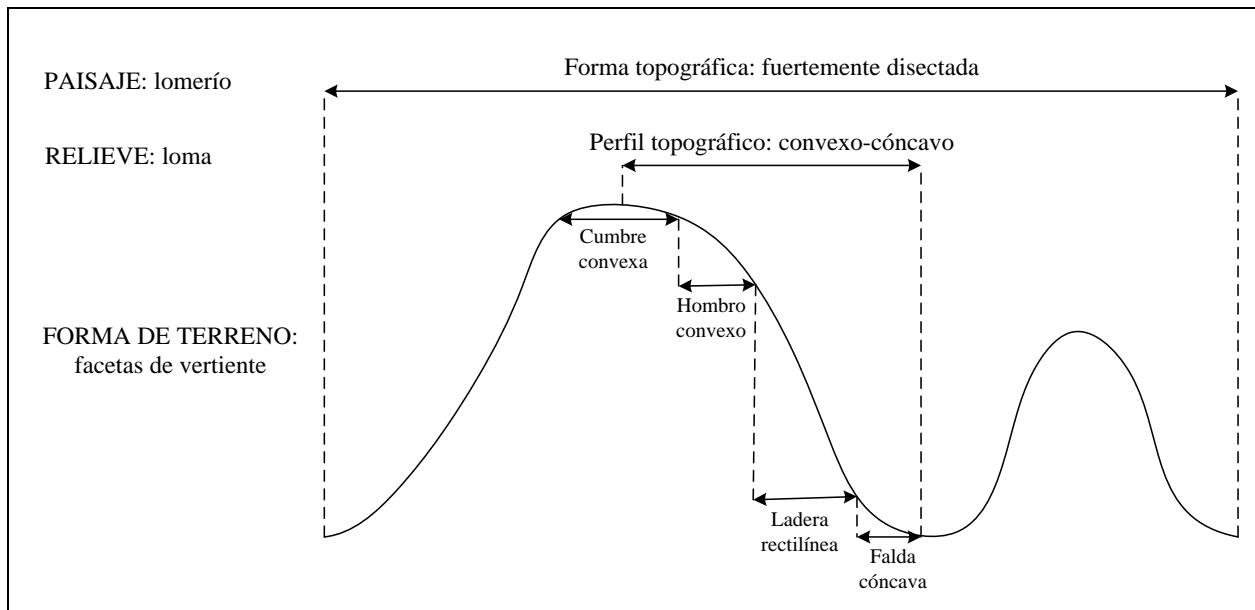


Fig.7.1 Relación entre los atributos topográficos y los niveles categóricos del sistema de clasificación de las geoformas.

Tabla 7.1 El perfil de la topografía

Clases	Ejemplos
Plano	mesa, terraza
Cóncavo	cubeta, falda de vertiente
Convexo	albardón, hombro de vertiente
Convexo-cóncavo	complejo de facetas de vertiente
Convexo-rectilíneo-cóncavo	complejo de facetas de vertiente
Rectilíneo	ladera
Con peldaños intermedios	complejo de facetas de vertiente
Con afloramientos rocosos	complejo de facetas de vertiente
Con escarpe rocoso	complejo de facetas de vertiente, cuesta
Disimétrico	loma, hogback
Irregular	vertiente

Tabla 7.2 La forma de la topografía (modificado de FAO, 2009)

Clases	Pendiente %	Amplitud del relieve
Plano o casi plano	0-2	muy baja
Ondulado	2-8	baja
Fuertemente ondulado	8-16	baja
Colinoso	16-30	moderada
Fuertemente disectado	>30	moderada
Montañoso	>30	alta

7.2.2 Planimetría

La planimetría se refiere a la proyección vertical de los límites de la geoforma sobre un plano horizontal. Es una representación bidimensional de determinados aspectos de la geoforma que controlan estrechamente los patrones de distribución de suelos. Fridland (1965, 1974, 1976) y Hole & Campbell (1985) fueron entre los primeros en reconocer modelos de configuración, que delimitan cuerpos de suelo, y en relacionar éstos con el contexto pedogenético. La configuración de la geoforma, el diseño de sus contornos, el patrón de drenaje, y las condiciones del medio circundante son los principales atributos descritos para este propósito.

7.2.2.1 Configuración de las geoformas

Muchas geoformas a nivel de relieve/modelado y forma de terreno tienen configuraciones típicas, que permiten realizar una primera identificación en base a la covarianza entre atributos morfológicos y atributos morfogenéticos. Por ejemplo, un albardón es generalmente estrecho y alargado, mientras que una cubeta es ancha y masiva. Los atributos de configuración dan una idea de la masividad o de la estrechez de una geoforma (Tabla 7.3).

Tabla 7.3 Configuración de las geoformas

Clases	Ejemplos
Estrecho	albardón
Ancho	napa de desborde
Alargado	dique
Masivo	cubeta
Anular	dique volcánico
Ovalado/elíptico	dolina
Redondeado	colina
Triangular	abanico, delta
Irregular	base de vertiente

7.2.2.2 Diseño de los contornos de las geoformas

El diseño de los contornos describe el trazado de la periferia de la geoforma a nivel de relieve/modelado y forma de terreno (Fig. 7.2 y Tabla 7.4). El mismo puede variar desde rectilíneo (p.e. la base de un escarpe de falla) a ondulado (p.e. una cubeta deposicional) hasta indentado (p.e. un escarpe disectado por erosión). Estas variaciones de contorno desde muy simples trazados lineales hasta complejos trazados convolucionados, que aproximan configuraciones areales, se reflejan en variaciones de la dimensión fractal (Saldaña et al., 2011). El atributo de diseño de los contornos puede ser utilizado también como un indicador morfogenético indirecto. Por ejemplo, una cubeta de decantación aluvial tiene generalmente una configuración masiva, pero el diseño de los contornos puede variar de acuerdo a la dinámica de las formas vecinas. Usualmente, una cubeta tiene un contorno sinuoso, pero cuando un explayamiento de ruptura que se forma después de abrirse una brecha en un albardón de orilla en condiciones de aguas altas penetra en la cubeta, los diferentes brazos del explayamiento crean un contorno lobulado. De esta manera, un contorno lobulado de cubeta refleja la proximidad de un abanico de explayamiento de ruptura, con sobreposición de un depósito arenoso de color claro fosilizando el material arcilloso gris gleyzado de la cubeta (Fig. 7.3).

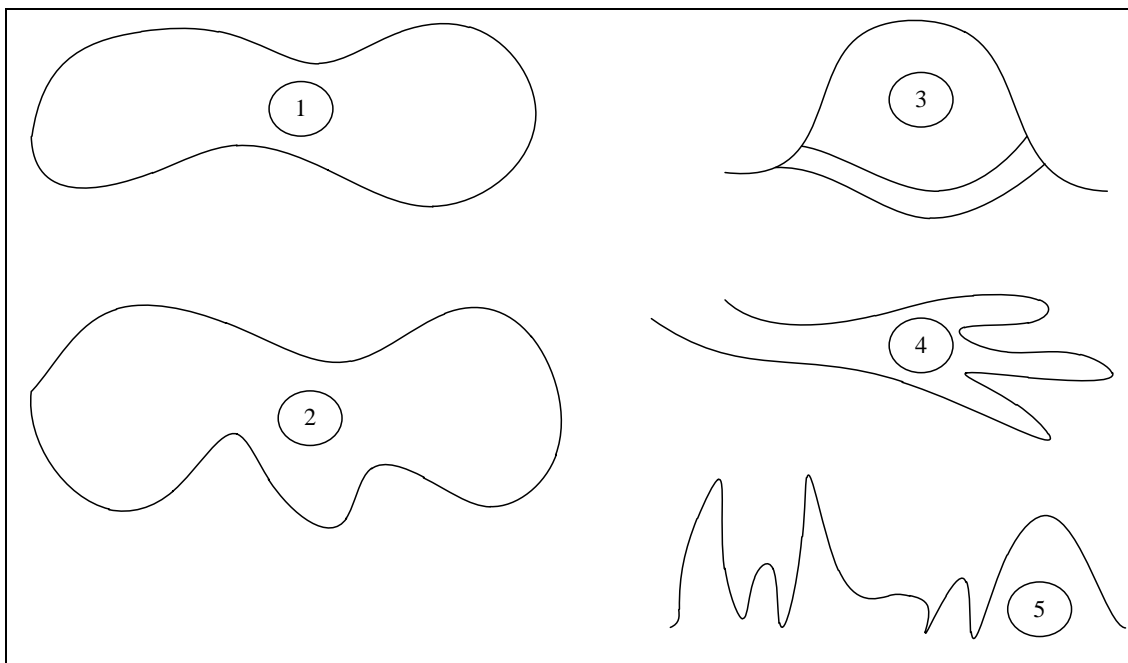


Fig. 7.2 Configuración y diseño de contornos de algunas geoformas (en planta).

- 1 Cubeta con configuración ovalada y contorno sinuoso
- 2 Cubeta con configuración ovalada y contorno lobulado (en la parte inferior), reflejando la penetración de abanicos de explayamiento de ruptura (ver Fig. 7.3)
- 3 Bahía cerrada por un cordón litoral arqueado
- 4 Albardón de brazo deltáico con extremidades distales digitadas
- 5 Escarpe disectado denticulado

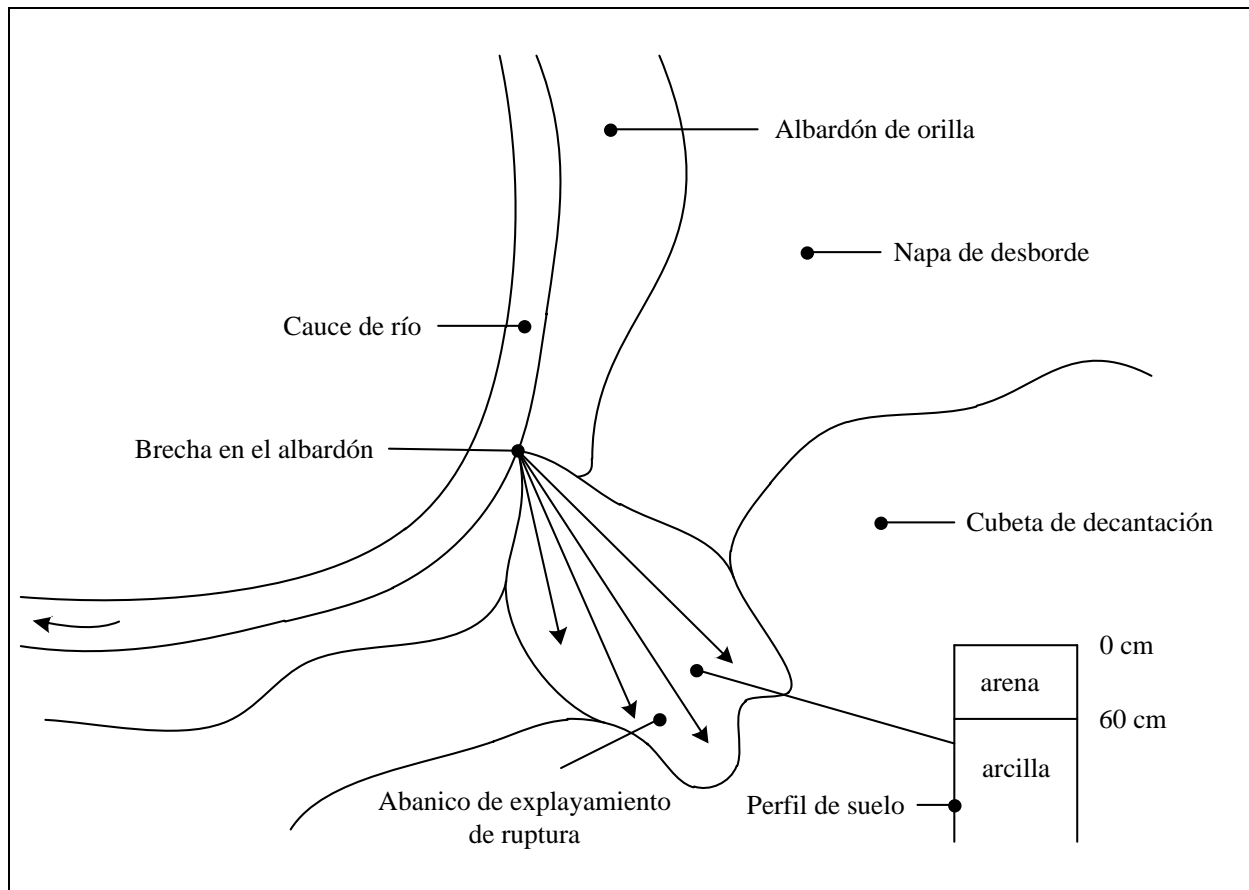


Fig. 7.3 Modificación del diseño de contorno de una cubeta por la penetración de un abanico de explayamiento, que se origina debido a la ruptura de un albardón de orilla en período de aguas altas. La intrusión del abanico en la depresión lateral vecina resulta en la superposición de sedimentos arenosos sobre el material arcilloso de la cubeta, creando una discontinuidad litológica a 60 cm de profundidad, con la formación de un suelo enterrado.

Tabla 7.4 Diseño de los contornos de las geoformas

Clases	Ejemplos
Rectilíneo	escarpe
Arqueado	barra costera
Sinuoso	albardón deltáico
Lobulado	cubeta
Denticulado	escarpe disectado
Digitado	albardón deltáico (distal)
Irregular	complejo de cárcavas

7.2.2.3 Patrón de drenaje

El patrón de drenaje se refiere a la red de cursos de agua, la cual contribuye a realzar la configuración y el diseño de los contornos de las geoformas. Está controlado principalmente por la estructura geológica (tectónica, litología, volcanismo) en áreas ablacionales y por la estructura y dinámica del sistema deposicional en áreas de agradación. Patrones representativos se encuentran en la Fig. 7.4 tomada del *Manual of Photographic Interpretation* (ASP, 1960): volcán con patrón radial, calderas concéntricas con patrón anular, rocas sedimentarias homogéneas blandas sin control estructural con patrón dendrítico, substrato sedimentario con alternancia de rocas duras y blandas y con control estructural (fallas y fracturas) generando un patrón enrejado, área aluvial con patrón paralelo, y área de planicie morrénica con patrón rectangular. La red de cursos de agua crea conectividad entre las áreas que atraviesa y controla los diversos tipos de flujo que ocurren en el paisaje (agua, materiales, fauna, vegetación, seres humanos).

7.2.2.4 Unidades vecinas y condiciones circundantes

Las unidades vecinas de una geoforma en consideración se mencionan junto con las condiciones circundantes. Este atributo es aplicable a nivel de paisaje, relieve/modelado y forma de terreno. De acuerdo a su posición en el paisaje, una geoforma puede dominar topográficamente otra geoforma, estar dominada por ella, o encontrarse a la misma altura (p.e. una planicie dominada por un piedemonte). Estas condiciones de adyacencia sugieren la posibilidad de relaciones dinámicas entre geoformas vecinas y permiten modelizarlas. Por ejemplo, en un paisaje de piedemonte pueden generarse flujos de agua, que van a causar inundaciones en los bajíos de una planicie vecina, o flujos de materiales que causan azolvamiento de campos agrícolas y embalses.

7.2.3 Morfografía y ecología de paisajes

Los atributos morfográficos, en particular la configuración de las geoformas y el diseño de los contornos, tienen estrecha relación semántica y cartográfica con los conceptos utilizados en ecología de paisajes, como son mosaico, matriz, corredor, y mancha (Forman & Godron, 1986). Un ejemplo que ilustra bien la relación entre planimetría de las geoformas y las métricas usadas en ecología de paisajes es la geoforma de llanura deltáica. Una llanura deltáica en posición distal en relación a un sistema deposicional es una entidad dinámica que recibe materiales y energía desde las partes troncales y proximales del mismo sistema. Los brazos deltáicos son ejes por donde el material penetra en el sistema, transita a través del sistema, y se distribuye hacia otras posiciones dentro del sistema como son las napas de desbordamiento y las cubetas. Los brazos son corredores estrechos, alargados y sinuosos, que alimentan al sistema deposicional deltáico. Por lo general, las napas son extensas y amplias, formando la matriz del sistema. Las cubetas son depresiones cerradas, formando manchas dispersas en el sistema (Fig. 7.5).

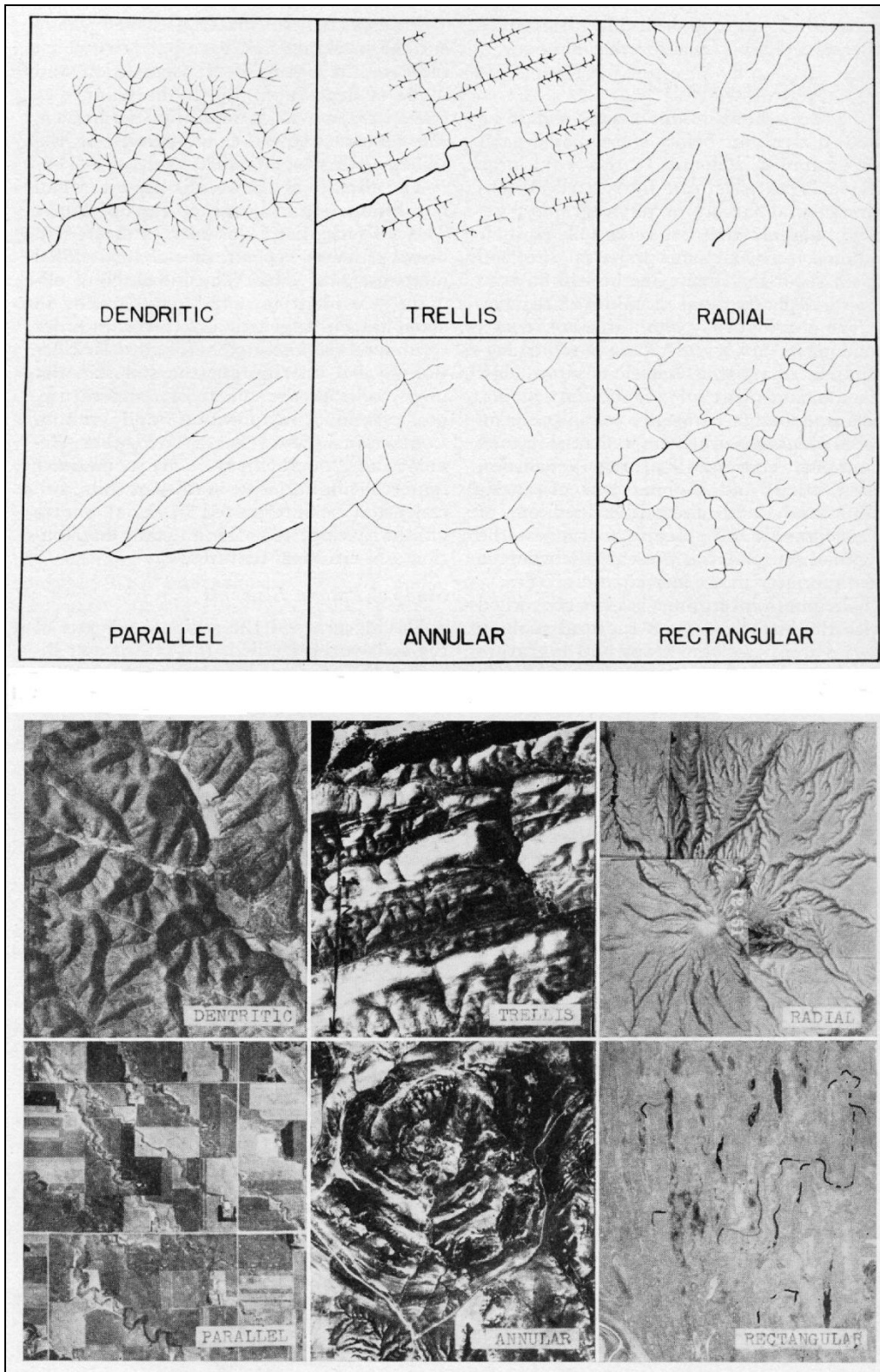


Fig. 7.4 Patrones de drenaje controlados por rasgos de la estructura geológica y geomorfológica (ver comentarios en el texto) (tomado de ASP, 1960).

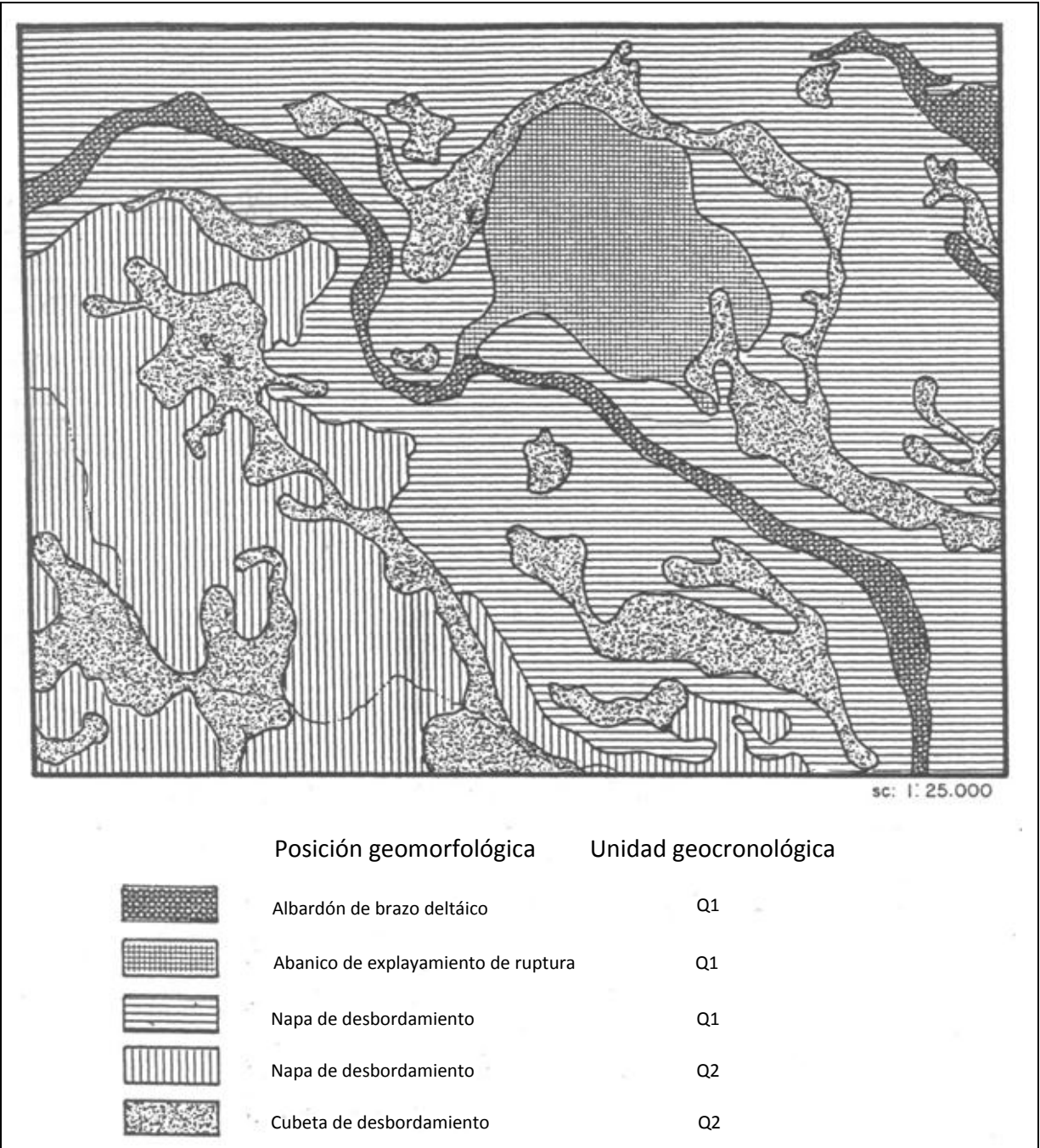


Fig. 7.5 Contacto entre dos sistemas deposicionales diferenciados por su edad relativa. Extracto del mapa de series de suelo de la planicie del río Santo Domingo, Venezuela, levantado a la escala de 1:25.000 (Pérez-Materán, 1967).

A la derecha, una porción de sistema aluvial deltáico de edad relativa Q1 (Pleistoceno superior) fosilizando un sistema deposicional anterior de edad relativa Q2 (Pleistoceno medio tardío), del cual las manchas de cubeta de desbordamiento son remanentes. El brazo deltáico es la unidad axial del sistema deposicional, que funciona como corredor por donde transitan aguas y sedimentos antes de ser distribuidos en el sistema. Sobre el brazo deltáico se injerta una unidad de configuración triangular correspondiente a un abanico de explayamiento, que se originó a consecuencia de una ruptura en el albardón del brazo. Las napas de desbordamiento constituyen las matrices de ambos sistemas (Q1 y Q2). Las cubetas y el abanico de explayamiento corresponden a manchas.

7.3 Atributos morfométricos: la dimensión de las geoformas

La morfometría abarca los rasgos dimensionales de las geoformas, derivados de una representación numérica de la topografía (Pike, 1995; Pike & Dikau, 1995). Procedimientos computarizados permiten la extracción a partir de los MDE y la medición de una variedad de parámetros morfométricos, algunos de carácter local y otros de carácter regional, incluyendo pendiente, hipsometría, orientación, exposición visual, insolación, curvatura tangencial, curvatura de perfil, características de cuenca hidrográfica (superficie, altura, pendiente), y rugosidad (Gallant & Hutchinson, 2008; Olaya, 2009). Si bien muchos de estos parámetros tienen aplicación en topografía, hidrografía, climatología, arquitectura, urbanismo, y otras áreas, sólo algunos contribuyen realmente a la caracterización de las formas de terreno, en particular la altura relativa, la densidad de drenaje, y el gradiente de las pendientes. Estos son atributos subordinados, no diagnósticos, los cuales pueden ser utilizados a cualquier nivel categórico con peso variable. Los atributos morfométricos están relacionados entre sí: en un determinado rango de altura relativa, hay una relación directa entre densidad de drenaje y gradiente de pendiente; a mayor densidad de drenaje, hay mayor gradiente de pendiente, e inversamente (A y B, respectivamente, en la Fig. 7.6).

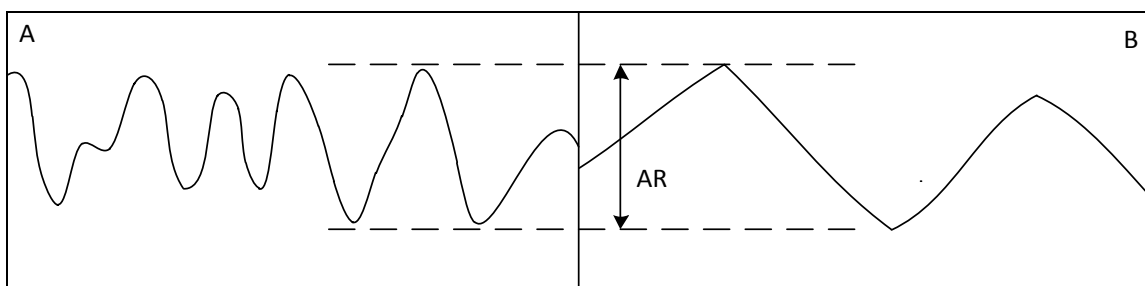


Fig. 7.6 Relación entre densidad de drenaje y gradiente de pendiente en condiciones similares de altura relativa (AR) (adaptado de Meijerink, 1988).

7.3.1 Altura relativa (*amplitud de relieve, relieve interno*)

La altura relativa entre dos geoformas se evalúa en alta, media, baja. A estas clases cualitativas pueden atribuirse rangos de valores numéricos (en metros) en el marco de una determinada región o un área de proyecto. Los rangos numéricos se establecen en base a condiciones locales y son válidos únicamente para estas condiciones. El atributo de altura relativa es descriptivo, y las clases de altura relativa son diferenciantes pero no diagnósticas. Igualmente, la altitud absoluta no es un criterio diagnóstico, porque geoformas similares pueden encontrarse a diversas elevaciones: por ejemplo, la altiplanicie del Altiplano Boliviano a 3500-4000 msnm, la altiplanicie de la Gran Sabana en Guayana a 800-1100 msnm, y la altiplanicie del Oriente venezolano a 200-400 msnm.

7.3.2 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje mide el grado de disección o incisión de una superficie de terreno. Las clases de densidad se establecen empíricamente para una región determinada o un área de

proyecto. Por ejemplo, Meijerink (1988) determina clases de densidad de drenaje (llamada valley density VD) en base a la relación $VD = \Sigma L/A$, donde ΣL es la longitud acumulada de líneas de drenaje en km y A es el área en km^2 . No solamente las condiciones propias de la región estudiada sino también la escala afectan los valores numéricos de VD (Fig. 7.7). En la Guía para la Descripción de Suelos de la FAO (2009), se definen valores de densidad de drenaje potencial en base al número de píxeles “receptores” dentro de una ventana de 10x10 píxeles.

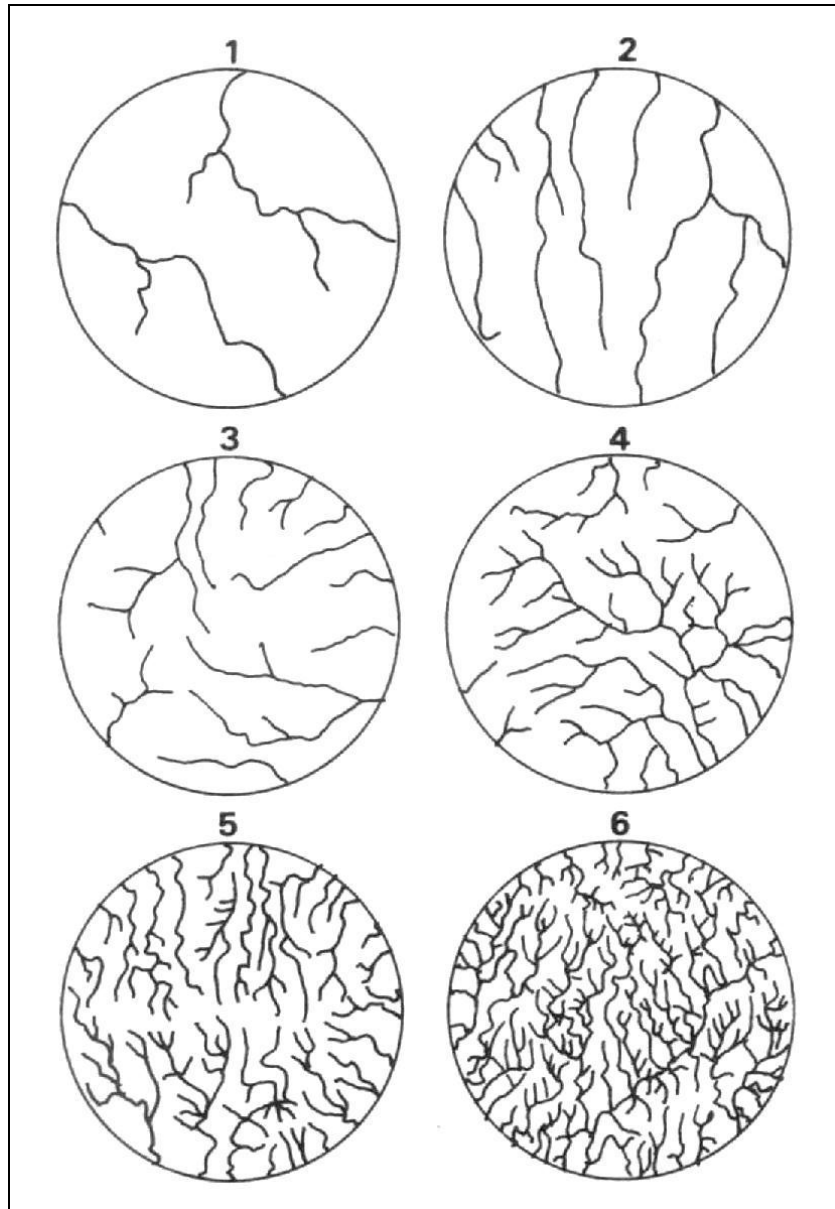


Fig. 7.7 Clases de densidad de drenaje (adaptado de Meijerink, 1988).

7.3.3 Pendiente del relieve

El gradiente de la pendiente se expresa en % o grados. Hay geformas que tienen pendientes características o rangos de pendiente específicos. Por ejemplo, un acantilado de costa o un

escarpamiento de falla es frecuentemente vertical y tiene por lo tanto una pendiente cercana a 90°. Un talud de derrubios tiene una pendiente de equilibrio de 30-35°, que corresponde al ángulo de reposo de los fragmentos sueltos que lo recubren. Sin embargo, el mero conocimiento de estos valores numéricos no contribuye directamente a identificar la geoforma correspondiente. La pendiente es esencialmente un atributo descriptivo, a lo más covariante. Obviamente, una colina tiene una pendiente mayor que un fondo de valle.

7.3.4 Contribución de la morfometría digital

Con el desarrollo de la cartografía digital, se utiliza en forma creciente la (geo)morfometría para caracterizar unidades de terreno en base a parámetros numéricos individuales, extraídos de MDE, tales como altitud, elevación relativa, pendiente, exposición, curvatura, entre otros, pero no en el marco de un sistema de clasificación de las geoformas. Atributos como la pendiente y la curvatura pueden presentar variaciones continuas en el espacio y se prestan por lo tanto al mapeo borroso (fuzzy mapping). Este es en particular el caso de los relieves banales con vertientes convexo-cóncavas conforme al modelo de Ruhe (1975). Sin embargo, muchas geoformas tienen límites discretos que reflejan su configuración y el diseño de contornos. Este es especialmente el caso de las geoformas construidas. En síntesis, la contribución de la morfometría digital reside esencialmente en la caracterización automatizada de los atributos dimensionales de las geoformas. Sin embargo, limitar la descripción de las geoformas a sus características morfométricas, debido a que éstas se prestan a extracción automatizada a partir de MDE, lleva el riesgo de substituir la observación de campo y en imágenes por parámetros numéricos que no reflejan satisfactoriamente la estructura y la formación del paisaje geomorfológico. El alcance de las características morfométricas para interpretar el origen y la evolución del relieve queda limitado, porque la morfometría cubre solamente parte de los rasgos externos de las geoformas, su componente epigeo.

7.4 Atributos morfogenéticos: la dinámica de las geoformas

Ciertos atributos de las geoformas reflejan procesos y por eso pueden ser usados para reconstruir la evolución morfogenética de un área o condiciones medio-ambientales pasadas. Por lo general, la relación atributo-proceso es más eficiente para identificar geoformas en ambiente deposicional que en ambiente ablacional. Las geoformas construidas son usualmente más conspicuas que las geoformas de erosión, salvo rasgos como las cárcavas o las formas que resultan de la erosión cárstica, por ejemplo. A continuación, se analizan algunos atributos morfogenéticos a título de ejemplos. La distribución por tamaño de partículas, la estructura, la consistencia, las características mineralógicas y los rasgos morfoscópicos son buenos indicadores del origen y de la evolución de las geoformas.

7.4.1 Granulometría

7.4.1.1 Importancia

La granulometría, o distribución por tamaño de partículas, así como su expresión sinóptica de textura, es la propiedad más importante del material geomorfológico, al igual que lo es para el material pedológico, porque controla directamente o indirectamente una serie de otras propiedades. La granulometría sirve de base para los siguientes propósitos:

- Caracterización básica del material y determinación de sus aptitudes de uso a fines utilitarios (p.e. uso agrícola, ingenieril, etc.).
- Inferencia de otras propiedades del material que dependen estrechamente de la distribución por tamaño de las partículas (a menudo, en combinación con la estructura del material), tales como densidad aparente, superficie específica, cohesión, adhesividad, permeabilidad, conductividad hidráulica, tasa de infiltración, consistencia, erodabilidad, CIC, etc.
- Inferencia y caracterización de rasgos geodinámicos y pedodinámicos tales como:
 - agentes de transporte (agua, viento, hielo, movimiento en masa)
 - procesos y ambientes deposicionales
 - procesos de meteorización (física y química)
 - procesos de formación de suelo

7.4.1.2 La información

La granulometría del material se determina en laboratorio utilizando métodos como la densitometría o el método de la pipeta para separar las fracciones de arena, limo y arcilla, y cedazos para separar las fracciones de arena. Los datos analíticos se utilizan para clasificar el material de acuerdo a escalas de tamaño de partículas. Las más comunes de estas clasificaciones granulométricas son la del USDA para fines agrícolas, y las de Unified y AASHTO para fines ingenieriles (USDA, 1971). Las diferencias más resaltantes entre estos sistemas de clasificación conciernen los aspectos siguientes:

- El límite superior de la fracción de arena: 2 mm en USDA y AASHTO; 5 mm en Unified.
- El límite inferior de la fracción de arena: 0.05 mm (50 μm) en USDA; 0.074 mm (74 μm) en Unified y AASHTO (umbral solifluidal).
- El límite entre limo y arcilla: 0.002 mm (2 μm) en USDA; 0.005 mm (5 μm) en Unified y AASHTO (umbral coloidal).

7.4.1.3 Ejemplos de inferencia e interpretación

Se mencionan algunos ejemplos para señalar el tipo de información que puede derivarse de datos de granulometría para caracterizar aspectos de sedimentología, meteorización, y formación de suelos. La composición granulométrica del material permite inferir e interpretar rasgos importantes de la formación y evolución de las geoformas: por ejemplo, la naturaleza de los agentes y de los procesos que movilizan el material, las modalidades de deposición del material y sus variaciones en tiempo y espacio, los mecanismos de desagregación y alteración de las rocas para formar regolita y material parental de suelo, y los procesos de diferenciación del material pedológico.

(a) Agentes de transporte

El viento y el hielo ilustran dos casos extremos de relación entre agente de transporte y granulometría del material transportado.

- El viento es un agente de transporte altamente selectivo. La competencia del viento abarca un estrecho rango de tamaño de partículas, que incluye usualmente las fracciones de arena fina, arena muy fina y limo grueso (250-20 μm). Partículas más gruesas son demasiado pesadas, excepto para saltación a corta distancia; partículas más pequeñas se encuentran a menudo

inmovilizadas en agregados o costras, lo que causa un efecto de retención mecánica in situ. En consecuencia, el material transportado por viento es generalmente homométrico.

- El hielo es un agente pobremente selectivo. Los depósitos de glaciares (p.e. morrenas) incluyen un amplio rango de partículas desde arcilla y limo (harina glaciar) hasta bloques grandes (bloques erráticos). De esto resulta un material heterométrico.

(b) Procesos de transporte

Curvas granulométricas cumulativas a escala semi-logarítmica, establecidas a partir de los datos analíticos de laboratorio, permiten inferir y caracterizar procesos de transporte y deposición, especialmente en el caso de los procesos controlados por agua y viento. La facies granulométrica de un depósito refleja su origen y modo de sedimentación (Rivière, 1952). Según Tricart (1965a), las curvas granulométricas son básicamente de tres tipos, a veces llamados curvas canónicas (Rivière, 1952): el tipo sigmoideo, el tipo logarítmico, y el tipo parabólico.

En la Fig. 7.8, se representan curvas granulométricas que corresponden a tres tipos de sedimentos depositados por una creciente del río Guil, en el sur de Francia (Tricart, 1965a).

- La curva sigmoidea, en forma de S, señala que una amplia proporción de la muestra (ca 85%) se concentra en un rango granulométrico bastante estrecho (150-40 μm), que corresponde mayormente a las fracciones de arena muy fina y limo grueso. Este sedimento resulta de un proceso deposicional muy selectivo, que es común en áreas de desbordamiento fluvial no torrencial. En estos sitios, la cobertura vegetal del suelo, especialmente cuando se trata de gramíneas, opera un efecto de tamizado y retención biótica de los limos (proceso de desbordamiento). Los depósitos eólicos de partículas que han sido transportadas sobre largas distancias, como en el caso del loess, generan curvas similares.
- La curva logarítmica, de pendiente más o menos rectilínea, revela que el depósito se distribuyó en proporciones aproximadamente iguales en todas las clases granulométricas. Esto refleja un mecanismo deposicional pobremente selectivo, característico del proceso de explayamiento. También los sedimentos de morrena glaciar pueden producir curvas de tipo logarítmico.
- La curva parabólica muestra una inflexión abrupta de la pendiente en el rango de 30-20 μm . Todas las partículas se encuentran repentinamente atrapadas por un efecto de bloqueo causado por una barrera natural o artificial. Por ejemplo, un deslizamiento transversal a un valle puede obstruir la corriente del río y originar la formación de una laguna donde queda retenida toda la carga sólida. Un efecto similar puede ser causado por un flujo de lava volcánica penetrando en un valle.

(c) Posiciones deposicionales

El transecto perpendicular a un valle aluvial muestra generalmente una secuencia de posiciones construidas por los desbordamientos del río. Estas posiciones son de albardón de orilla arenoso o francoso grueso, de napa de desbordamiento limosa o francosa fina, y de cubeta arcillosa, en esta secuencia desde la posición más alta y cercana al curso de agua hasta la posición más baja y más alejada (Fig. 3.3 en Cap.3).

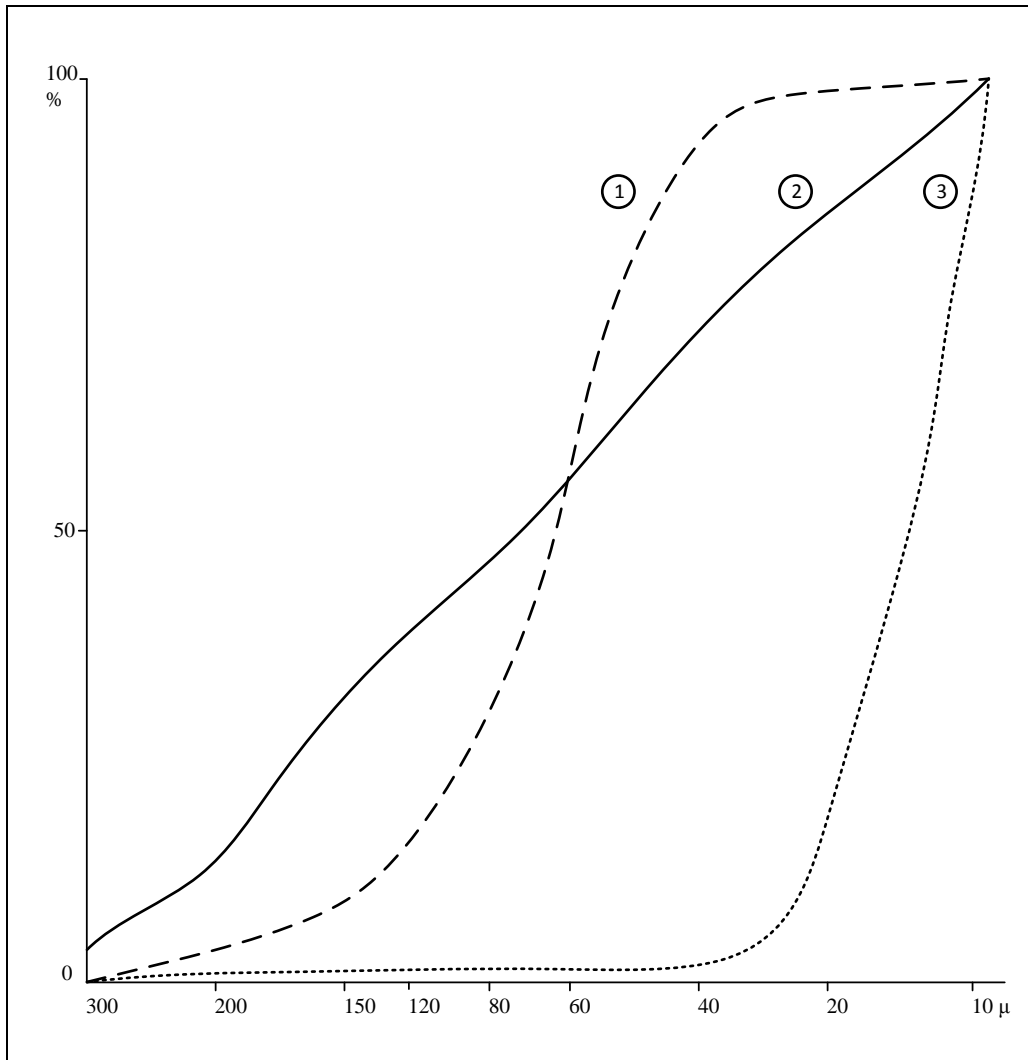


Fig. 7.8 Tipos de curva granulométrica en materiales deposicionales. Depósitos de crecienta (junio 1957) en la cuenca del río Guil, sur de Francia (tomado de Tricart, 1965a).

1: tipo sigmoideo, característico de una acumulación libre

2: tipo logarítmico, característico de una lava torrencial (en el presente caso)

3: tipo parabólico, característico de una acumulación forzada por efecto de obstáculo

(d) Discontinuidad litológica

En el perfil de suelo reportado en la Fig. 7.3, se nota un cambio vertical de textura desde arenosa a arcillosa, que constituye una discontinuidad litológica a los 60 cm de profundidad. Este cambio de tamaño de partículas revela una fase deposicional más reciente de explayamiento sobre una fase deposicional anterior de cubeta.

(e) Procesos de meteorización

- La meteorización física de rocas produce predominantemente fragmentos gruesos. Esto es particularmente frecuente en condiciones ambientales extremas como las siguientes:

- Ambientes fríos, donde la alternancia entre formación y derretimiento de hielo en las fisuras y en los poros de las rocas causa su fragmentación. El crioclastismo o gelifración es común en altas latitudes y altas altitudes.
- Ambientes cálidos y secos, donde la alta amplitud térmica entre día y noche favorece la repetición de ciclos diarios de dilatación-contracción diferencial entre minerales leucocratos (félsicos) y minerales melanocratos (máficos). El termoclastismo es común en regiones desérticas con amplias variaciones diarias de temperatura.
- La meteorización química genera predominantemente productos de grano fino, especialmente arcillas de neo-formación derivadas de la alteración de los minerales primarios de las rocas.

(f) Procesos de formación de suelos

Un ejemplo clásico es la comparación del contenido de arcilla entre horizonte eluvial y horizonte iluvial para inferir un proceso de traslocación de arcilla. El Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975, 1999), al igual que otros sistemas de clasificación de suelos, utiliza ratios de contenido de arcilla entre horizonte A y horizonte B con fines de reconocer horizontes Bt de tipo argílico. Por ejemplo, se requiere una relación de arcilla B/A de >1.2 para que un horizonte Bt sea considerado como argílico, cuando el contenido de arcilla en el horizonte A es de 15-40%. El índice B/A de iluviación de arcilla se utiliza también como indicador de cronología relativa en estudios de cronosecuencia de terrazas fluviales.

7.4.2 Estructura

7.4.2.1 Estructura geogenética

La estructura geogenética se refiere a la estructura del material geológico (rocas duras) o geomorfológico (materiales no-consolidados).

(a) Estructura de roca

El examen de la estructura de la roca permite evaluar su grado de meteorización por comparación entre el substrato R y el horizonte Cr, especialmente en el caso de rocas cristalinas (ígneas y metamórficas) donde la estructura original de la roca se identifica todavía en el horizonte Cr (saprolita). Por ejemplo, un gneis sometido a meteorización conserva el aspecto bandeado causado por la alternancia de bandas claras (minerales leucocratos, félsicos) y bandas oscuras (minerales melanocratos, máficos). La alteración de minerales primarios, especialmente los ferro-magnésicos, libera constituyentes (principalmente las bases) que se pierden por lavado hacia el nivel freático. En el horizonte Cr, el volumen de roca sigue siendo el mismo que el de la roca sana en el substrato R, pero el peso ha disminuido. Por ejemplo, la densidad podría bajar desde 2.7 Mg m^{-3} en la roca no-alterada hasta $2.2\text{-}2.0 \text{ Mg m}^{-3}$ en el horizonte Cr de alteración. Este proceso ha recibido el nombre de alteración isovolumétrica (Millot, 1964).

(b) Estructuras deposicionales

Los sedimentos muestran frecuentemente rasgos estructurales que revelan la naturaleza de los procesos deposicionales. Ejemplos de éstos son la estructura rítmica y la estructura lenticular, y las marcas de crioturbación y bioturbación.

- La estructura rítmica refleja fases o ciclos deposicionales sucesivos. Se manifiesta en los perfiles por la repetición de secuencias de estratos granulométricamente emparentados, denotando un proceso de agradación cíclica. Por ejemplo, una secuencia común en las napas de desbordamiento incluye estratos de texturas variables entre arena fina y limo. Secuencias consecutivas pueden estar separadas por discontinuidades litológicas.
- La estructura lenticular se caracteriza por la presencia de lentes de material grueso en una matriz de material más fino. Lentes de arena gruesa y/o gravilla, anchos de varios decímetros a metros y espesos de algunos centímetros a decímetros, son frecuentes en las napas de limos de desbordamiento. Corresponden a pequeños canales de escurrimiento concentrado, que funcionaban en un tiempo determinado en la superficie de un área deposicional, antes de ser fosilizados por una nueva fase de limos de desbordamiento.
- Las marcas de crioturbación resultan de una perturbación de la estructura deposicional original por cuñas o lentes de hielo.
- Las marcas de bioturbación resultan de una perturbación de la estructura deposicional original por la actividad biológica (madrigueras, túneles, pedotubules).

7.4.2.2 Estructura pedogenética

El tipo de estructura pedogenética es frecuentemente un buen indicador de la influencia del ambiente geomorfológico en la formación de suelo. Por ejemplo, en una posición de albardón bien drenado, la estructura es generalmente blocosa. La estructura es masiva o prismática en una posición de cubeta no-salina, mientras que es columnar en una cubeta salina o salino-sódica. A su vez, el grado de desarrollo estructural puede reflejar tiempos más o menos largos de formación de suelo.

7.4.3 Consistencia

Los límites de consistencia, también llamados límites de Atterberg, permiten describir el comportamiento mecánico, actual o potencial, de los materiales geomorfológicos y pedológicos de acuerdo a diferentes contenidos de humedad. En la Fig. 7.9, se relacionan estados, límites e índices de consistencia, los cuales son criterios importantes en la geomorfología de los movimientos en masa. Estas relaciones están controladas por la granulometría y la mineralogía de los materiales. Por lo general, materiales arcillosos son mayormente susceptibles a deslizamiento, mientras que materiales de limo y arena fina son más propensos a soliflucción. Un bajo índice de plasticidad hace el material más susceptible a licuefacción, con riesgo de generar flujos de lodo. El modelo gráfico de Carson & Kirkby (1972) muestra como las soluciones de continuidad que relacionan los mecanismos básicos de hinchamiento, deslizamiento y flujo, pueden ser segmentadas para diferenciar tipos de movimiento en masa (Fig. 7.10).

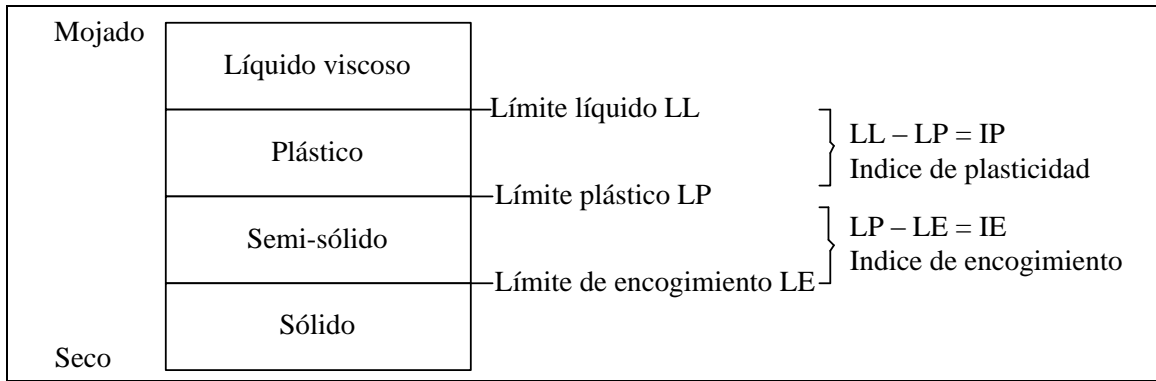


Fig. 7.9 Parámetros de consistencia

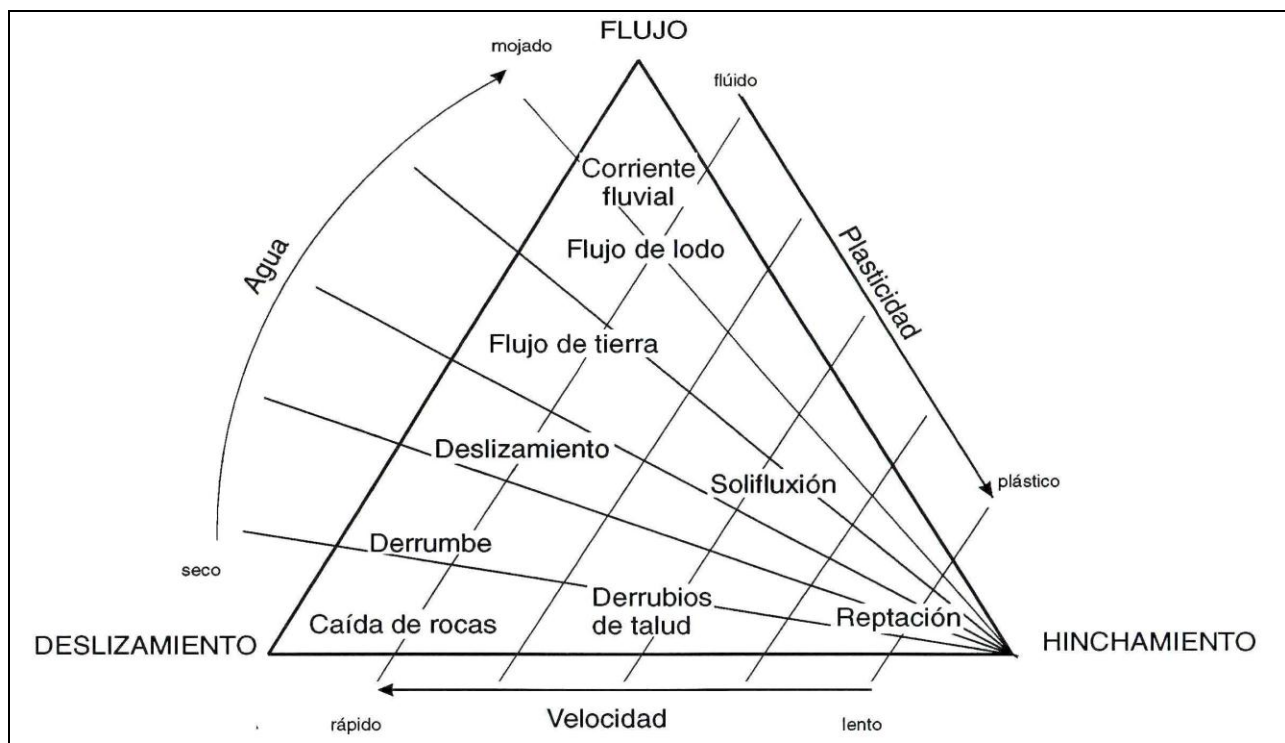


Fig. 7.10 Modelo relacional para la clasificación de movimientos en masa (adaptado de Carson & Kirkby, 1972).

7.4.4 Mineralogía

La composición mineralógica de las fracciones de arena, limo y arcilla en los materiales no-consolidados de las formaciones superficiales permite determinar la dinámica geoquímica del ambiente, relacionada con o controlada por procesos morfogenéticos, y seguir las rutas de transporte de minerales trazadores. Las asociaciones de minerales presentes en las formaciones de cobertura permiten hacer inferencias tales como las siguientes:

- Reflejan las litologías dominantes en las cuencas de producción de sedimentos.

- Permiten distinguir entre materiales frescos y materiales retrabajados; los últimos resultan de la mezcla de materiales durante la fase de transporte de sedimentos.
- Reflejan las condiciones morfoclimáticas del área de formación: por ejemplo, halitas en ambiente seco y caliente; kanditas en ambiente húmedo y caliente.
- Reflejan la influencia de la topografía en la formación y redistribución espacial de los minerales arcillosos a lo largo de una vertiente formando una catena de minerales. En ambiente tropical húmedo, una catena o toposecuencia de minerales incluye comúnmente kanditas (caolinita) en la cumbre, micas (ilita) en la ladera, y esmectitas (montmorilonita) en la falda de la vertiente.

En la Tabla 7.5, se presenta un ejemplo de determinación de minerales en las fracciones de arena y limo con fines de reconstituir los procesos morfogenéticos actuando en el área de contacto entre un piedemonte y un valle aluvial. Los sitios estudiados se ubican en la terraza baja del río Santo Domingo (Edo. Barinas, Venezuela) en su salida del piedemonte andino hacia la planicie de los Llanos, a lo largo de un transepto perpendicular al valle desde la base del piedemonte hasta la vega del río. El sitio A está cerca del piedemonte, el sitio C está cerca de la vega, y el sitio B se encuentra en una posición intermedia.

Tabla 7.5 Mineralogía de fracciones de limo y arena (%). Piedemonte oriental de los Andes, al oeste de la ciudad de Barinas, Venezuela.

Sitio	Cuarzo limpio + feldespatos	Cuarzo ferruginoso	Agregados de suelo	Fragmentos de roca	Micas	Total
A	40	5	55	0	0	100
B	21	14	22	42	1	100
C	22	0	0	0	78	100

Datos elaborados en el Instituto de Geografía de la Universidad de Strasbourg, Francia (cortesía J. Tricart)

- *Sitio A: depósito coluvial (material retrabajado).* Coluvión rubificado, originado a partir del truncamiento de un suelo rojo fuertemente desarrollado en una terraza alta (Q3). El efecto de retrabajamiento puede inferirse de los altos contenidos de granos de cuarzo limpio, lavados durante el transporte por escurrimiento difuso, y de agregados de suelos, respectivamente. La ausencia de fragmentos de roca y de micas indica que la coluviación removió material completamente pedogenizado del piedemonte.
- *Sitio B: depósito mixto, coluvial y aluvial.* Mezcla de material coluvial rojo (presencia de agregados), retomado de una cobertura pedológica en una terraza media (Q2), y de material reciente (presencia de fragmentos de roca) traído por el río Santo Domingo.
- *Sitio C: depósito aluvial.* Sedimentos aluviales del Holoceno, exclusivamente compuestos de cuarzo limpio y micas frescas. La alta proporción de micas resulta de la retención de partículas de limo atrapadas por una densa cobertura de gramíneas.

7.4.5 Morfoscopía

La morfoscopía (o exoscopía) trata de la examinación de los granos gruesos (arena y limo grueso) bajo microscopio binocular para determinar su grado de redondez y su aspecto de superficie.

- La forma de los granos puede variar desde muy irregular hasta bien redondeada.
 - Granos bien redondeados reflejan una acción continua por agua (de mar) o viento.
 - Granos irregulares indican un transporte torrencial o un transporte a corta distancia.
- La brillantez de los granos y la presencia de marcas de superficie, tales como estrías, pulido, aspecto mate, marcas de impacto, indican modalidades especiales de transporte o condiciones ambientales especiales:
 - Granos brillantes: acción del agua de mar
 - Superficie escarchada (mate): acción eólica
 - Granos percutidos: efecto de entrechoques eólicos o de corrosión química

7.5 Atributos morfocronológicos: la historia de las geoformas

7.5.1 Esquema de referencia para la geocronología del Cuaternario

El período del Cuaternario (2.6 Ma) es un marco temporal fundamentalmente importante en geopedología, porque la mayoría de las geoformas y de los suelos se ha formado o ha sido substancialmente modificada durante este período. Reliquias precuaternarias existen, pero son de menor extensión. El Cuaternario ha sido un período de fuerte actividad morfogenética debido a cambios climáticos, paroxismos tectónicos y erupciones volcánicas, que han causado destrucción, enterramiento o modificación de las geoformas y de los suelos precuaternarios y sincuaternarios, a la vez que nuevas geoformas y nuevos suelos se han desarrollado.

En las zonas templadas y boreales, así como en las áreas de montaña, períodos glaciares y períodos interglaciares han alternado varias veces. En su esquema clásico elaborado en base a observaciones hechas en los Alpes, Penck & Brückner (1909) consideraban un número relativamente limitado de períodos glaciares (Würm, Riss, Mindel, Günz). Un esquema similar se estableció para la cronología del Cuaternario en América del Norte. Investigaciones recientes muestran que las alternancias de períodos glaciares-interglaciares han sido en realidad más numerosas. En el Antártico se han reconocido hasta ocho ciclos glaciares durante los últimos 740.000 años (740 ka). La duración media de los ciclos climáticos era de 100 ka para los últimos 500 ka y de 41 ka para el Cuaternario antiguo (antes de 1 Ma), con un comportamiento intermedio para el período de 1 Ma a 500 ka (EPICA, 2004). Además, variaciones climáticas más cortas han ocurrido durante cada período glacial, similares a los eventos de Dansgaard-Oeschger de la última glaciación. Muchas regiones disponen ahora de sistemas geocronológicos de referencia muy detallados para el Pleistoceno y especialmente para el Holoceno. En la zona intertropical, los cambios climáticos se han manifestado más en términos de variación de lluvia que en términos de variación de temperatura. Períodos secos han alternado con períodos húmedos, aproximadamente correlacionados con las alternancias entre períodos glaciares y períodos interglaciares en las latitudes medias y altas.

La geocronología del Cuaternario se basa convencionalmente en esta recurrencia de períodos climáticos y se asume que éstos han sido alternativamente de baja y alta actividad morfogenética y de bajo y alto desarrollo pedogenético. Erhart (1956), en su teoría de la bio-rhexistasis, resume esta dicotomía, distinguiendo entre (1) períodos rhexistásicos con condiciones ambientales inestables, más frías y más secas, favorables a intensa morfogénesis, y (2) períodos biostásicos con condiciones ambientales más estables, más calientes y más húmedas, favorables al desarrollo de suelos. El modelo de los ciclos K de Butler (1959) está basado en el mismo principio de la alternancia de fases estables con desarrollo de suelos y fases inestables con predominio de erosión (destrucción de suelos) o sedimentación (fosilización de suelos). Para fines de levantamiento de suelos, se han implementado diversos esquemas geocronológicos simples para recordar la edad relativa de las geoformas y de los suelos asociados, utilizando letras como K (de kiklos), t (de terraza) y Q (de Quaternary), con subíndices numéricos crecientes en función de la edad de las unidades geopedológicas, asimiladas a unidades cronoestratigráficas (Tabla 7.6). Estos esquemas de cronología relativa tienen una resolución espacial limitada, por ejemplo, a una región o un país, pero permiten también correlaciones estratigráficas gruesas en territorios más amplios.

7.5.2 Técnicas de fechado (absoluto)

Lo ideal para determinar la edad de una geoforma o de un suelo es de encontrar y muestrear un tipo de material geomorfológico o pedológico, que permita utilizar alguna de las técnicas de datación absoluta o relativa disponibles, o una combinación de éstas, incluyendo:

- Carbono-14 (suelos orgánicos, carbón vegetal, madera; frecuentemente junto con análisis de polen)
- K/Ar (materiales volcánicos)
- Termoluminiscencia (sedimentos, en particular loess)
- Dendrocronología (anillos de crecimiento en los troncos de árboles)
- Tefrocronología (capas de ceniza volcánica)
- Varvas (capas lacustrinas proglaciares)
- Análisis de eventos históricos y prehistóricos (terremotos, etc.).

Estas técnicas son relativamente costosas y su aplicación en el marco de un levantamiento de suelos es generalmente limitada por razones presupuestarias. Una determinación de carbono-14 cuesta 300-350 euros. Algunas técnicas son aplicables sólo a un determinado tipo de material (p.e. ^{14}C sólo en material conteniendo carbono orgánico). Ciertas técnicas cubren determinados rangos de tiempo (p.e. ^{14}C para períodos más cortos que 50-70 ka; termoluminiscencia hasta 300 ka). Errores de interpretación pueden resultar de contaminación de las muestras o del tiempo de residencia de la materia orgánica (en el caso de ^{14}C).

De lo anterior se deduce que los objetos más comunes en el contexto geomorfológico y pedológico susceptibles de ser datados en términos absolutos son horizontes de suelo y estratos sedimentarios conteniendo materia orgánica. En muchas situaciones, esto limita prácticamente el fechado absoluto a aproximadamente 60.000 años BP, lo que cubre el Holoceno y una pequeña parte del Pleistoceno superior correspondiente a la mitad del último período glacial. Esto subraya la necesidad de disponer de medios indirectos como son los que suministra la pedoestratigrafía.

Tabla 7.6 Esquema de geocronología relativa del Cuaternario (Zinck, 1988).

	Períodos rhexistásticos	Períodos biostásticos
HOLOCENO	-----	Q0
Superior	Q1	
	-----	Q1-2
Medio tardío	Q2	
PLEISTOCENO	-----	Q2-3
Medio temprano	Q3	
	-----	Q3-4
Inferior	Q4	
	-----	Q4-5
PLIO-PLEISTOCENO	Q5	

Comentarios relativos a la Tabla 7.6:

- Los identificadores Q se refieren a la edad relativa inferida del material geomorfológico que sirve de material parental, no directamente a la edad del suelo derivado de este material. En terrenos denudacionales, estructurales y residuales, hay frecuentemente una amplia diferencia entre la edad del substrato geológico y la edad del manto pedológico suprayacente. En muchos casos, el substrato rocoso puede inclusive no ser el material parental de los suelos. Esto ocurre en paisajes de lomerío y de montaña, donde los suelos se forman a menudo a partir de formaciones de vertiente alóctonas que recubren las rocas in situ. Por contraste, en ambientes deposicionales, la iniciación de la formación de suelos coincide generalmente con el fin del período de acumulación de material. Sin embargo, en áreas de sedimentación extensas, la deposición no se detiene abruptamente, ni se detiene en todos los sectores al mismo tiempo. Por esta razón, en planicies aluviales, la deposición de Q1, por ejemplo, puede seguir localmente en Q0 sin interrupción notable.
- Los índices numéricos (Q1, Q2, etc.) indican edad relativa creciente de los materiales parentales. Donde sea necesario, la escala relativa puede extenderse (p.e. Q5, etc.) para designar depósitos que solapan el fin del Plioceno (formaciones Plio-Cuaternarias).
- Cada período puede ser subdividido por medio de subíndices alfabéticos para reflejar diferencias menores de edad (p.e. Q1a más reciente que Q1b).
- Algunas geoformas, como por ejemplo los glaciares coluviales, pueden haberse desarrollado en el transcurso de varios períodos sucesivos. Se puede utilizar un símbolo compuesto para reflejar este tipo de formación diacrónica (p.e. Q1-Q2; Q1-Q1-2).

7.5.3 Geocronología relativa: la contribución de la pedoestratigrafía

7.5.3.1 Definición

La geocronología relativa se basa en establecer relaciones de antecendencia temporal entre diversas geoformas o depósitos en áreas de estudio y establecer correlaciones a diversas escalas espaciales. Este procedimiento es prácticamente una extensión del sistema de estratigrafía utilizado en geología precuaternaria, con aplicación al período del Cuaternario. Los mapas geológicos suministran frecuentemente información poco detallada sobre el Cuaternario (p.e. Qal para coberturas aluviales cuaternarias; Qr para depósitos del Cuaternario reciente), por comparación con la información litológica detallada que ofrecen para el pre-Cuaternario. Esta información es usualmente insuficiente para soportar eficientemente el levantamiento de suelos. En cambio, la información geopedológica que provee el levantamiento de suelos ha demostrado que puede contribuir a mejorar la estratigrafía del Cuaternario.

La pedoestratigrafía o estratigrafía de suelos consiste en usar ciertas propiedades de suelo y de regolita para estimar la edad relativa de las formaciones de cobertura y de las geoformas en las cuales los suelos se han desarrollado. Esto permite determinar la posición cronoestratigráfica de un material o de una geoforma en un esquema geocronológico de referencia (Zinck & Urriola, 1970; Harden, 1982; Busacca, 1987; NACSN, 2005), con la posibilidad de reconocer generaciones sucesivas de suelos.

Etimológicamente, pedoestratigrafía designa el uso de los suelos o de propiedades de suelo como trazadores estratigráficos con fines de contribuir a establecer la cronología relativa de eventos geológicos, geomorfológicos y pedológicos en un territorio. Sin embargo, de acuerdo a las definiciones suministradas por el Código Estratigráfico Norte-Americano (NACSN, 2005), los conceptos de pedoestratigrafía y estratigrafía de suelos no son estrictamente sinónimos. Según este código, la unidad pedoestratigráfica básica es el geosol, el cual difiere en diversas maneras de la unidad básica de la estratigrafía de suelos, el pedoderm. Una de las diferencias fundamentales es que el geosol es un perfil de meteorización enterrado, mientras que el pedoderm puede corresponder a un suelo enterrado, relictual de superficie, o exhumado. Obviando estas diferencias de definición, lo importante a notar es que los suelos están reconocidos como unidades estratigráficas y, en este sentido, el término de pedoestratigrafía ha sido utilizado en pedología y geomorfología sin cumplir con la definición estricta de geosol. La pedoestratigrafía es un área privilegiada de las relaciones geopedológicas con contribución recíproca de la geomorfología y de la pedología. Un ejemplo ilustrativo de esta estrecha interrelación lo ofrecen las cronosecuencias de terrazas fluviales. La edad relativa de las terrazas determinada en base a su posición en el paisaje, la más baja siendo usualmente la más reciente, correlaciona generalmente con los grados de desarrollo de los suelos e inversamente. Morfoestratigrafía y pedoestratigrafía se complementan mutuamente.

7.5.3.2 Criterios

Una variedad de criterios geomorfológicos y pedológicos ha sido utilizada para establecer esquemas de cronología relativa del Cuaternario en regiones con características ambientales diferentes (mediterráneas, tropicales, etc.). Estos criterios incluyen, entre otros, los siguientes.

- El grado de actividad de las geoformas, distinguiendo entre geoforma activa (p.e. duna en formación), geoforma heredada en estado de sobrevivencia (p.e. pendiente localmente afectada por soliflucción), y geoforma estabilizada (p.e. barra costera colonizada por vegetación).
- El grado de meteorización del material parental en base al color de las formaciones de cobertura y al grado de desintegración de piedras y cantos. En ambiente tropical húmedo, los fragmentos de rocas ígneas y metamórficas en las formaciones detríticas se alteran más rápidamente que la mayoría de las rocas sedimentarias. La cuarcita es la más resistente en todo tipo de clima y constituye generalmente los fragmentos residuales dominantes en las formaciones detríticas del Cuaternario antiguo.
- El grado de desarrollo morfológico de los suelos, inferido a partir de criterios como color, estructura pedogenética, espesor del solum, e índices de lixiviación, entre otros.
 - El color es un buen indicador de la edad relativa de los suelos, en particular en clima tropical húmedo, con aumento gradual de la coloración roja (rubificación) a medida que se meteorizan los minerales ferromagnésicos del material parental. La posibilidad de diferenciar por color se atenúa con el tiempo en suelos muy desarrollados. Suelos rojos pueden también ser recientes, cuando se derivan de materiales retomados por erosión a suelos rojos más antiguos y redepositados en posiciones más bajas en el paisaje.
 - La estructura pedogenética refleja (1) las condiciones del sitio y la naturaleza del material parental que controlan el tipo de estructura, y (2) el tiempo transcurrido que influencia el grado de desarrollo de la estructura (de débil a fuerte). La relación entre grado de desarrollo y tiempo alcanza un umbral en suelos muy desarrollados, empobrecidos en las sustancias que contribuyen a la cohesión del material pedológico (p.e materia orgánica, tipo y cantidad de arcillas, cationes divalentes).
 - El espesor del solum aumenta generalmente con el tiempo de desarrollo pedogenético en condiciones de estabilidad geomorfológica. Como en el caso del desarrollo estructural, el espesor del solum alcanza un umbral con el tiempo a partir del cual los aumentos son insignificantes.
 - Los índices de lixiviación permiten evaluar la intensidad de la traslocación de sustancias solubles o coloidales desde horizontes eluviales a horizontes iluviales subyacentes. Los más comúnmente implementados son los índices de carbonato de calcio y de arcilla. La intensidad de la lixiviación disminuye con el tiempo a medida que los horizontes eluviales se empobrecen, lo que resulta en una estabilización de los índices.
- El estado del complejo de adsorción. En términos generales, el complejo adsorbente del suelo cambia cuantitativamente y cualitativamente con el pasaje del tiempo. Entre los indicadores más sensibles se encuentran la reacción del suelo (pH), la capacidad de intercambio catiónico, y la saturación de bases. Con el transcurso del tiempo, los suelos pierden cationes alcalinos y alcalino-térreos, lo que resulta en una disminución o un cambio de composición (más H y/o Al) del complejo de adsorción y en un aumento de la acidez de la solución del suelo.
- La mineralogía de arcillas cambia con el desarrollo del suelo en función del tiempo, entre otros factores. A las asociaciones de minerales de arcilla originalmente presentes en los horizontes Cr o C, se substituyen otras asociaciones con tiempo creciente. Por lo general, ésto

se manifiesta con el reemplazo o la transformación de minerales de tipo 2:1 (p.e. esmectitas, micas) por minerales de tipo 1:1 (p.e. kanditas).

El uso simultáneo de varias propiedades pedológicas permite determinar unidades pedoestratigráficas. A este efecto, Harden (1982) estableció un índice cuantitativo para estimar grados de desarrollo pedológico y correlacionar éstos con unidades de suelo datadas. El índice fue originalmente desarrollado en base a una cronosecuencia de suelos en el valle del río Merced, California Central, combinando propiedades descritas en el campo con el espesor de los suelos. Ocho propiedades fueron integradas para formar el índice, incluyendo presencia de películas de arcilla, textura combinada con consistencia en mojado, rubificación en base al hue y croma de los colores, estructura, consistencia en seco, consistencia en húmedo, valor del color, y pH. Otras propiedades descritas en el campo pueden ser agregadas si se estudian más suelos. La ausencia ocasional de algunas propiedades no afecta significativamente el índice. Las propiedades individuales cuantificadas y el índice integrado se examinan y se comparan como funciones de la profundidad y edad de los suelos. El análisis muestra que la mayoría de las propiedades cambia sistemáticamente dentro del marco temporal de los 3 Ma que abarca la cronosecuencia del río Merced. El índice ha sido aplicado a otros sitios con ajustes sucesivos (Busacca, 1987; Harden et al., 1991).

No hay un modelo único de relación tiempo-desarrollo de suelo. Las tasas de desarrollo pedogenético varían de acuerdo al segmento de tiempo considerado y de acuerdo a las condiciones geográficas del área estudiada. Por lo general, las tasas de desarrollo disminuyen con el incremento de tiempo y el incremento de aridez (Zinck, 1988; Harden, 1990).

7.6 Importancia relativa de los atributos geomorfológicos

No todos los atributos revisten igual importancia para identificar y clasificar las geoformas. Por ejemplo, la granulometría del material es más importante y tiene más poder diferenciante y por lo tanto más peso taxonómico que la altura relativa de una geoforma.

Siguiendo un enfoque que Kellogg (1959) aplicó para distinguir entre características de suelo, los atributos de las geoformas pueden ser agrupados en tres clases de acuerdo a su peso para propósitos taxonómicos: atributos diferenciantes, accesorios y accidentales, respectivamente.

7.6.1 Clases de atributos

7.6.1.1 Atributos diferenciantes

Un atributo es diferenciante si permite distinguir un tipo de geoforma de otro a un determinado nivel taxonómico. Por consiguiente, un cambio en el estado del atributo, expresado por un rango de valores, conduce a un cambio en la clasificación de una geoforma. Un atributo que tiene esta propiedad se considera diagnóstico. Un tal atributo, junto con otros atributos diferenciantes, contribuye a la identificación y clasificación de las geoformas.

Ejemplos:

- El buzamiento de las capas geológicas es una característica diagnóstica para reconocer relieves monoclinales y el grado de buzamiento es una característica diferenciante para distinguir clases de relieve monoclinas (ver Fig. 5.4).
- Una faceta de vertiente debe ser cóncava para clasificar como falda de vertiente. En este caso, el perfil topográfico es el atributo diferenciante y “cóncavo” es el estado del atributo.
- El material de una cubeta de decantación tiene normalmente más de 60% de fracción arcillosa. En este caso, la distribución por tamaño de partículas es el atributo diferenciante y el estado del atributo se expresa por 60-100% de arcilla.

7.6.1.2 Atributos accesorios

Un atributo es accesorio si refuerza la capacidad diferenciante de un atributo diagnóstico con el cual tiene algún tipo de correlación (atributo covariante). Por ejemplo, la estructura deposicional de tipo lenticular puede ocurrir en varias facies aluviales, pero es más común (no exclusiva) en depósitos originados por exceso de carga acompañado de fricción mecánica (albardón de orilla, explayamiento). Por sí sola, la presencia de estructura lenticular no es suficiente para reconocer un tipo de geoforma.

7.6.1.3 Atributos accidentales

Un atributo accidental no contribuye a la identificación de un tipo de geoforma, pero suministra información adicional para su descripción y caracterización. Este tipo de atributo puede ser utilizado para crear fases de unidades taxonómicas con fines de mapeo y separación de unidades cartográficas (por ejemplo, por clases de pendiente o por altura relativa).

7.6.2 Pesos de los atributos

7.6.2.1 Atributos morfográficos

Los atributos morfográficos son esencialmente accesorios, algunas veces diferenciantes.

- **Peso accesorio.** Por ejemplo, un albardón de orilla recién formado tiene una morfología característica (forma estrecha, alargada, sinuosa, convexa) que facilita su identificación en imágenes aéreas. Un albardón más viejo, cuyos contornos han sido obliterados con el transcurso del tiempo, es más difícil de reconocer a partir de sus rasgos externos. En el caso de un albardón enterrado por debajo de una cobertura de sedimentos recientes, es posible reconstruir el trazado de los contornos mediante perforaciones. En estos dos últimos casos, la identificación de la geoforma se basa esencialmente en la composición granulométrica del material, con el soporte accesorio de los rasgos morfográficos.
- **Peso diferenciante.** En paisajes de montaña y lomerío, los atributos morfográficos pueden ser diferenciantes. Por ejemplo, en el caso de una colina con vertiente convexo-cóncava, el perfil topográfico característico de cada faceta de vertiente es por sí mismo diferenciante.

7.6.2.2 Atributos morfométricos

Los atributos morfométricos son predominantemente accidentales. Contribuyen a la descripción de las geoformas, pero no a su identificación. Por ejemplo, la diferencia de altitud (altura relativa) entre la superficie culminante de una altiplanicie y los terrenos bajos circundantes (paisajes de valle o planicie) puede ser de 100-150 m (p.e. en las mesas orientales de Venezuela) o de 1000-1500 m (p.e. en el Altiplano Boliviano). En ambos casos, sin embargo, la geoforma cumple con los atributos diagnósticos de altiplanicie al nivel taxonómico de paisaje. En general, los rasgos dimensionales tienen bajo peso taxonómico, pero son importantes en el uso práctico de la información geomorfológica, por ejemplo, con fines de evaluación de impactos ambientales o planificación del uso de las tierras. A tal efecto, pueden implementarse fases de altura relativa, de densidad de drenaje, y de pendiente.

7.6.2.3 Atributos morfogenéticos

Los atributos morfogenéticos son esencialmente diferenciadores, ya sea individualmente o en grupo, especialmente cuando se encuentran reforzados por atributos accesorios. Por ejemplo, la consistencia del material es un atributo diagnóstico para evaluar su susceptibilidad a los movimientos en masa e interpretar el origen de las geoformas que resultan. Las geoformas deposicionales muestran siempre rangos específicos de composición granulométrica, la cual es un atributo altamente diagnóstico en este caso.

7.6.2.4 Atributos morfocronológicos

Los atributos morfocronológicos son mayormente diferenciadores, porque la edad relativa de una geoforma es parte integral de su identidad. El hecho de que un albardón de orilla se haya formado durante el Holoceno (Q0) o durante el Pleistoceno medio (Q2) probablemente no tiene gran efecto en su configuración, a pesar de que el diseño de los contornos puede haber sido obliterado con el transcurso del tiempo. Sin embargo, la posición cronoestratigráfica de la geoforma es diferenciadora, porque determina un marco temporal en el cual se desarrollan los procesos morfogenéticos y el cual controla la evolución de los suelos y de sus propiedades.

7.6.3 Jerarquización de los atributos

No se utilizan todos los atributos a cada nivel categórico del sistema de clasificación de las geoformas. La Tabla 7.7 muestra un ensayo de jerarquización diferencial de los atributos geomorfológicos de acuerdo a su peso diagnóstico. Este aspecto reviste una importancia creciente para el tratamiento automatizado de la información geomorfológica. A continuación, se presentan los criterios que han servido de guía para la jerarquización en términos de cantidad de atributos, su naturaleza, su función, y su implementación a los niveles superiores e inferiores del sistema, respectivamente (Tabla 7.8).

7.6.3.1 Niveles superiores

- Número limitado de atributos.

- Atributos preferiblemente descriptivos, basados en características externas de la geoforma (atributos morfográficos y morfométricos).
- Función de generalización y agregación de la información.
- Información sobre los atributos se obtiene mayormente por interpretación de fotos aéreas, imágenes satelitarias, y modelos digitales de elevación.

7.6.3.2 Niveles inferiores

- Número mayor de atributos, resultando de la adición de información.
- Atributos preferiblemente genéticos, basados en las características internas de la geoforma (atributos morfogenéticos y morfocronológicos).
- Función de particularizar (diferenciar) y detallar.
- Se requieren más información de campo y datos de laboratorio.

Tabla 7.7 Ensayo de jerarquización de los atributos geomorfológicos (Zinck, 1988).

Atributos	Paisaje	Relieve	Litología	F. terreno
<i>Morfométricos</i>				
Altura relativa	+	+	-	o
Densidad de drenaje	+	+	-	-
Pendiente	+	+	-	+
<i>Morfográficos</i>				
Forma topográfica	+	o	-	-
Perfil topográfico	-	+	-	+
Exposición	-	+	-	+
Configuración	-	+	-	+
Diseño de los contornos	-	+	-	+
Patrón de drenaje	+	+	-	-
Condiciones circundantes	+	+	+	+
<i>Morfogenéticos</i>				
Granulometría	-	o	+	+
Estructura	-	-	+	+
Consistencia	-	-	+	+
Mineralogía	-	-	+	+
Morfoscopia	-	-	+	+
<i>Morfocronológicos</i>				
Grado de meteorización	-	-	+	+
Grado de desarrollo pedológico	-	-	o	+
Indíces de lixiviación	-	-	o	+
Estado del complejo adsorbente	-	-	o	+
Mineralogía de arcillas	-	-	+	+

+: atributo muy importante

o: atributo moderadamente importante

-: atributo menos importante

Tabla 7.8 Relaciones entre atributos geomorfológicos de acuerdo a las categorías del sistema.

Atributos	Cantidad	Naturaleza	Función	Implementación
Niveles superiores	Pocos	Descriptivos Caracterización externa	Generalizar Agregar	Interpretación de fotos, imágenes y MDE
↓	↓	↓	↓	↓
Niveles inferiores	Muchos	Genéticos Caracterización interna	Pormenorizar Especificar	Campo y laboratorio

CONCLUSION

Geopedología es un enfoque para el levantamiento de suelos, que combina criterios geomorfológicos y pedológicos para determinar las unidades del mapa de suelos. La geomorfología provee los contornos de las unidades de mapeo (“conteniente”), mientras que la pedología provee los componentes de suelo de las unidades de mapeo (“el contenido”). Por lo tanto, las unidades del mapa geopedológico son algo más que unidades de suelo en el sentido convencional del término, ya que las mismas contienen también información sobre el contexto geomorfológico en que se encuentran y se han formado los suelos. En este sentido, la unidad geopedológica es un equivalente aproximativo de la unidad de paisaje pedológico o pedopaisaje (*soilscape*), pero con la indicación expresa que la geomorfología se usa para definir el paisaje. Esto queda usualmente reflejado en la leyenda del mapa, que muestra las geoformas como entradas y sus respectivos pedotaxa como descriptores.

En el enfoque geopedológico, geomorfología y pedología se benefician mutuamente de diversas maneras tales como las siguientes, entre otras:

- La geomorfología provee un marco genético que contribuye a entender la formación de suelos, cubriendo tres de los cinco factores de la ecuación de Jenny con influencia directa: naturaleza del material parental (material transportado, material de alteración, regolita), edad y topografía. La biota es indirectamente influenciada por el contexto geomorfológico.
- La geomorfología provee un marco cartográfico para el mapeo de suelos, que ayuda a entender los patrones de distribución y la geografía de suelos. El mapa geopedológico muestra el suelo en el paisaje.
- El uso de criterios geomorfológicos contribuye a la racionalidad del levantamiento de suelos, disminuyendo el sesgo personal del levantador. La necesidad de experticia previa para asegurar la calidad del levantamiento de suelos se encuentra compensada por una sólida formación en geomorfología.
- La geomorfología contribuye a la construcción de la leyenda de suelos como factor guía. La estructura jerárquica de la leyenda refleja la estructura del paisaje geomorfológico con los pedotaxa que contiene.
- La cobertura o manto de suelos suministra el marco pedoestratigráfico en base al grado de desarrollo de los suelos, que permite corroborar la morfoestratigrafía (por ejemplo, sistemas de terrazas).
- La cobertura de suelos mediante sus propiedades (mecánicas, físicas, químicas, mineralógicas, biológicas) suministra datos que contribuyen a evaluar la vulnerabilidad del paisaje geopedológico y a estimar el balance morfogénico actual (erosión-sedimentación).

REFERENCIAS

- Arnold, R. (1968). Apuntes de agrología (documento inédito). Barquisimeto, Venezuela: Ministerio de Obras Publicas (MOP).
- Arnold, R., & Schargel, R. (1978). Importance of geographic soil variability at scales of about 1: 25,000. Venezuelan examples In M. Drosdoff, R. B. Daniels & J. J. Nicholaides III (Eds.), *Diversity of soils in the tropics*. ASA Special Publication 34, 45-66.
- ASP. (1960). *Manual of photographic interpretation*. Washington DC: American Society of Photogrammetry.
- Barrera-Bassols, N., Zinck, J. A., & Van Ranst, E. (2006). Local soil classification and comparison of indigenous and technical soil maps in a Mesoamerican community using spatial analysis. *Geoderma*, 135, 140-162.
- Barrera-Bassols, N., Zinck, J. A., & Van Ranst, E. (2009). Participatory soil survey: experience in working with a Mesoamerican indigenous community. *Soil Use & Management*, 25, 43-56.
- Bertrand, G. (1968). Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. *Rev. Géogr. Pyrénées et S.O.*, 39(3), 249-272.
- Birkeland, P. W. (1974). *Pedology, weathering and geomorphological research*. New York: Oxford University Press.
- Birkeland, P. W. (1990). Soil-geomorphic research - a selective overview. *Geomorphology* 3, 207-224.
- Birkeland, P. W. (1999). *Soils and geomorphology*. 3rd ed. New York: Oxford University Press.
- Bocco, G., Velázquez, A., Mendoza, M. E., Torres, M. A., & Torres, A. (1996). Informe final, subproyecto regionalización ecológica, proyecto de actualización del ordenamiento ecológico general del territorio del país. México: INE-SEMARNAP.
- Boettinger, J. L., Howell, D. W., Moore, A. C., Hartemink, A. E., & Kienast-Brown, S. (Eds.). (2010). *Digital soil mapping: bridging research, environmental application, and operation*. Progress in Soil Science 2. New York: Springer.
- Boulaine, J. (1975). *Géographie des sols*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Bregt, A. K., Bouma, J., & Jellineck, M. (1987). Comparison of thematic maps derived from a soil map and from kriging of point data. *Geoderma* 39, 281-291.
- Buol, S. W., Hole, F. D., McCracken, R. J., & Southard, R. J. (1997). *Soil genesis and classification*. 4th ed. Ames, IA: Iowa State University Press.
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press.
- Burrough, P. A., van Gaans, P. F. M., & MacMillan, R. A. (2000). High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets and Systems* 113, 37-52.
- Busacca, A. J. (1987). Pedogenesis of a chronosequence in the Sacramento Valley, California, USA. I. Application of a soil development index. *Geoderma* 41, 123-148.
- Butler, B. E. (1959). Periodic phenomena in landscapes as a basis for soil studies. Soil Publ. 14. Australia: CSIRO.
- Campy, M., & Macaire, J. J. (1989). *Géologie des formations superficielles. Géodynamique, faciès, utilisation*. Paris: Masson.
- Carson, M. A., & Kirkby, M. J. (1972). *Hillslope form and process*. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- Catt, J. A. (1986). *Soils and quaternary geology*. Oxford: Clarendon Press.
- CNRS. (1972). *Cartographie géomorphologique*. Travaux de la R.C.P. 77. Mémoires et Documents Vol.12. Paris: Editions du Centre National de la Recherche Scientifique.
- Conacher, A. J., & Dalrymple, J. B. (1977). The nine-unit landscape model: an approach to pedogeomorphic research. *Geoderma* 18, 1-154.
- Daniels, R. B., Gamble, E. E., & Cady, J. G. (1971). The relation between geomorphology and soil morphology and genesis *Adv. Agron.* 23, 51-88.
- Daniels, R. B., & Hammer, R. D. (1992). *Soil geomorphology*. New York: John Wiley.
- Davis, W. M. (1899). The geographical cycle. The genetic classification of land-forms. *The Geographical Journal (Wiley-Blackwell)*, 481-504.
- de Bruin, S., Wielemaker, W. G., & Molenaar, M. (1999). Formalisation of soil-landscape knowledge through interactive hierarchical disaggregation. *Geoderma*, 91, 151-172.
- Derruau, M. (1965). *Précis de géomorphologie*. Paris: Masson.
- Derruau, M. (1966). *Geomorfología*. Barcelona: Ediciones Ariel.
- Dobos, E., & Hengl, T. (2009). Soil mapping applications. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33, 461-479. Amsterdam: Elsevier.

- Dobos, E., Micheli, E., Baumgardner, M. F., Biehl, L., & Helt, T. (2000). Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. *Geoderma* 97(3-4), 367-391.
- Effland, A. B. W., & Effland, W. R. (1992). Soil geomorphology studies in the U.S. Soil Survey Program. *Agricultural History* 66(2), 189-212.
- Elizalde, G. (2009). *Ensayo de clasificación sistemática de categorías de paisajes. Primera aproximación*. Edición revisada 2009. Maracay, Venezuela.
- Elizalde, G., & Jaimes, E. (1989). Propuesta de un modelo pedogeomorfológico. *Revista Geográfica Venezolana* XXX, 5-36.
- EPICA. (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429 (6992), 623-628.
- Erhart, H. (1956). *La genèse des sols en tant que phénomène géologique*. Paris: Masson.
- Evans, I. S., Hengl, T., & Gorsevski, P. (2009). Applications in geomorphology. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33, 497-525. Amsterdam: Elsevier.
- Fairbridge, R. W. (Ed.). (1997). *Encyclopedia of geomorphology*. New York: Springer.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos. Cuarta ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Farshad, A. (2010). Geopedology. An introduction to soil survey, with emphasis on profile description (CD-ROM). Enschede, The Netherlands: Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente.
- Finke, P. A. (2012). On digital soil assessment with models and the Pedometrics agenda. *Geoderma*, 171–172(Entering the Digital Era: Special Issue of Pedometrics 2009, Beijing), 3-15.
- Forman, R. T. T., & Godron, M. (1986). *Landscape ecology*. New York: John Wiley.
- Fridland, V. M. (1965). Makeup of the soil cover. *Sov. Soil Sci.*, 4, 343-354.
- Fridland, V. M. (1974). Structure of the soil mantle. *Geoderma* 12, 35-41.
- Fridland, V. M. (1976). *Pattern of the soil cover*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations.
- Gallant, J. C., & Hutchinson, M. F. (2008). Digital terrain analysis. In N. J. McKenzie, M. J. Grundy, R. Webster & A. J. Ringrose-Voase (Eds.), *Guidelines for surveying soil and land resources*. 2nd ed. Australian Soil and Land Survey Handbook Series Vol 2, 75-91. Melbourne: CSIRO.
- Gallant, J. C., & Wilson, J. P. (2000). Primary topographic attributes. In J. P. Wilson & J. C. Gallant (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications*, 51-85. New York: John Wiley & Sons.
- Garner, H. F. (1974). *The origin of landscapes. A synthesis of geomorphology*. New York: Oxford University Press.
- Gerrard, A. J. (1981). *Soils and landforms, an integration of geomorphology and pedology*. London: Allen & Unwin.
- Gerrard, A. J. (1992). *Soil geomorphology: an integration of pedology and geomorphology*. New York: Chapman & Hall.
- Gerrard, A. J. (1993). Soil geomorphology - Present dilemmas and future challenges. *Geomorphology* 7(1-3), 61-84.
- Goosen, D. (1968) Interpretación de fotos aéreas y su importancia en levantamiento de suelos. *Boletín de Suelos* 6. Roma: FAO
- Goudie, A. S. (Ed.). (2004). *Encyclopedia of geomorphology*. Vol. 2. London: Routledge.
- Grunwald, S. (Ed.). (2006). *Environmental soil-landscape modeling: geographic information technologies and pedometrics*. Boca Raton FL: CRC/Taylor & Francis.
- Haase, G., & Richter, H. (1983). Current trends in landscape research. *Geo Journal (Wiesbaden)* 7(2), 107-120.
- Haigh, M. J. (1987) The holon: hierarchy theory and landscape research. *Catena Supplement* 10, 181-192. Cremlingen: CATENA Verlag.
- Hall, G. F. (1983). Pedology and geomorphology In L. P. Wilding, N. E. Smeck & G. F. Hall (Eds.), *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions*, 117-140. Amsterdam: Elsevier.
- Hall, G. F., & Olson, C. G. (1991). Predicting variability of soils from landscape models. In M. J. Mausbach & L. P. Wilding (Eds.), *Spatial variabilities of soils and landforms*. SSSA Special Publication 28, 9-24.
- Hansakdi, E. (1998). *Soil pattern analysis and the effect of soil variability on land use in the Upper Pasak area, Petchabun, Thailand*. Unpublished MSc thesis, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Harden, J. W. (1982). A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in Central California. *Geoderma*, 28(1), 1-28.
- Harden, J. W. (1990). Soil development on stable landforms and implications for landscape studies. *Geomorphology*, 3, 391-398.
- Harden, J. W., Taylor, E. M., & Hill, C. (1991). Rates of soil development from four soil chronosequences in the southern Great Basin. *Quat. Res.*, 35, 383-399.

- Hartemink, A. E., & McBratney, A. (2008). A soil science renaissance. *Geoderma* 148, 123-129.
- Hengl, T. (2003). *Pedometric mapping. Bridging the gaps between conventional and pedometric approaches*. ITC Dissertation 101. Enschede, The Netherlands.
- Hengl, T., & MacMillan, R. A. (2009). Geomorphometry: a key to landscape mapping and modelling. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33, 433-460. Amsterdam: Elsevier.
- Hengl, T., & Reuter, H. I. (Eds.). (2009). *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33. Amsterdam: Elsevier.
- Hole, F. D., & Campbell, J. B. (1985). *Soil landscape analysis*. Totowa, NJ: Rowman & Allanheld.
- Hole, F. D., & Hironaka, M. (1960). An experiment in ordination of some soil profiles. *Soil Science Society of America Proceedings* 24(4), 309-312.
- Hudson, B. D. (1992). The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56, 836-841.
- Huggett, R. J. (2011). *Fundamentals of geomorphology*. London: Routledge.
- Hutchinson, M. F., & Gallant, J. C. (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In J. P. Wilson & J. C. Gallant (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications*, 29-50. New York: John Wiley & Sons.
- Ibáñez, J. J., Zinck, J. A., & Jiménez-Ballesta, R. (1995). Soil survey: old and new challenges. In J. A. Zinck (Ed.), *Soil survey: perspectives and strategies for the 21st century*. FAO World Soil Resources Report 80, 7-14. Rome: FAO-ITC.
- Irwin, B. J., Ventura, S. J., & Slater, B. K. (1997). Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma* 77, 137-154.
- IUSS. (2007). *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Report 103. Rome: IUSS Working Group WRB / FAO.
- Iwahashi, J., & Pike, R. J. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology* 86(3-4), 409-440.
- Jenny, H. (1941). *Factors of soil formation*. New York: McGraw-Hill.
- Jenny, H. (1980). *The soil resource. Origin and behaviour*. Ecological Studies 37. New York: Springer Verlag.
- Johnson, D. L., Keller, E. A., & Rockwell, T. K. (1990). Dynamic pedogenesis: new views on some key soil concepts, and a model for interpreting Quaternary soils. *Quat. Res.*, 33, 306-319.
- Jungerius, P. D. (1985b). Soils and geomorphology. In P. D. Jungerius (Ed.), *Soils and geomorphology*. Catena Supplement 6, 1-18. Cremlingen: CATENA Verlag.
- Jungerius, P. D. (Ed.). (1985a). *Soils and geomorphology*. Catena Supplement 6. Cremlingen: CATENA Verlag.
- Kellogg, C. E. (1959). *Soil classification and correlation in the soil survey*. Washington DC: USDA, Soil Conservation Service.
- Kerry, R., & Oliver, M. A. (2011). Soil geomorphology: Identifying relations between the scale of spatial variation and soil processes using the variogram. *Geomorphology*, 130, 40-54.
- Kilian, J. (1974). Etude du milieu physique en vue de son aménagement. Conceptions de travail. Méthodes cartographiques. *L' Agronomie Tropicale* XXIX(2-3), 141-153.
- Knuepfer, P. L. K., & McFadden, L. D. (1990). Soils and landscape evolution. Proceedings of the 21st Binghamton Symposium on Geomorphology. *Geomorphology*, 3(3-4), 197-578.
- Lagacherie, P., McBratney, A. B., & Voltz, M. (Eds.). (2007). *Digital soil mapping: an introductory perspective*. Developments in Soil Science 31. Amsterdam: Elsevier.
- Legros, J.-P. (1996). *Cartographies des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Lueder, D. R. (1959). *Aerial photographic interpretation: principles and applications*. New York: McGraw-Hill.
- Lugo-Hubp, J. (Ed.). (1989). *Diccionario geomorfológico*. Cd. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- MacMillan, R. A., & Pettapiece, W. W. (1997). Soil landscape models: automated landscape characterization and generation of soil-landscape models. Research Report No. 1E.1997.
- MacMillan, R. A., Pettapiece, W. W., Nolan, S. C., & Goddard, T. W. (2000). A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 113, 81-109.
- MacMillan, R. A., & Shary, P. A. (2009). Landforms and landform elements in geomorphometry. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33, 227-254. Amsterdam: Elsevier.

- Mahaney, W. C. (Ed.). (1978). *Quaternary soils*. Norwich UK: Geo Abstracts.
- McBratney, A. B., de Gruijter, J. J., & Brus, D. J. (1992). Spatial prediction and mapping of continuous soil classes. *Geoderma*, 54, 39-64.
- McBratney, A. B., Mendonça Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52.
- McFadden, L. D., & Knuepfer, P. L. K. (1990). Soil geomorphology: the linkage of pedology and surficial processes. *Geomorphology*, 3, 197-205.
- Meijerink, A. (1988). Data acquisition and data capture through terrain mapping units. *ITC Journal 1988*(1), 23-44.
- Metternicht, G., & Zinck, J. A. (1997). Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces. *Intl. J. Remote Sensing*, 18(12), 2571-2586.
- Meybeck, M., Green, P., & Vorosmarty, C. J. (2001). A new typology for mountains and other relief classes: an application to global continental water resources and population distribution. *Mount. Res. Dev.*, 21, 34-45.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review* 63(2), 81-97.
- Miller, G. A. (2003). The cognitive revolution: a historical perspective. *Trends in Cognitive Sciences* 7(3), 141-144.
- Millot, G. (1964). *Géologie des argiles. Altérations, sédimentologie, géochimie*. Paris: Masson.
- Minár, J., & Evans, I. S. (2008). Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology*, 95, 236-259.
- Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. New York: John Wiley & Sons.
- Moonjun, R., Farshad, A., Shrestha, D. P., & Vaiphasa, C. (2010). Artificial neural network and decision tree in predictive soil mapping of Hoi Num Rin sub-watershed, Thailand. In J. L. Boettinger, D. W. Howell, A. C. Moore, A. E. Hartemink & S. Kienast-Brown (Eds.), *Digital soil mapping: bridging research, environmental application, and operation*, 151-163. New York: Springer.
- NACSN. (2005). North American Stratigraphic Code (North American Commission on Stratigraphic Nomenclature). *AAPG Bulletin* 89(11), 1547-1591.
- Naveh, Z., & Lieberman, A. S. (1984). *Landscape ecology. Theory and application*. Munich, Germany: Springer Verlag.
- Nelson, A., & Reuter, H. (2012). Soil projects. Landform classification from EU Joint Research Center, Institute for Environment and Sustainability. <http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/projects/landform/>
- Olaya, V. (2009). Basic land-surface parameters. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33, 141-169. Amsterdam: Elsevier.
- Olson, C. G. (1989). Soil geomorphic research and the importance of paleosol stratigraphy to Quaternary investigations, midwestern USA. *Catena Supplement* 16, 129-142. Cremlingen: CATENA Verlag.
- Olson, C. G. (1997). Systematic soil-geomorphic investigations: contributions of R.V. Ruhe to pedologic interpretation. *Adv. Geoecol.*, 29, 415-438.
- Penck, A., & Brückner, E. (1909). *Die Alpen im Eiszeitalter*. Leipzig: Tauchnitz, C.H.
- Pennock, D. J., Zebarth, B. J., & De Jong, E. (1987). Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma*, 40, 297-315.
- Pérez-Materán, J. (1967). Informe de levantamiento de suelos, río Santo Domingo, Venezuela. Caracas, Venezuela: Ministerio de Obras Públicas.
- Pike, R. J. (1995). Geomorphometry: progress, practice, and prospect. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband* 101, 221-238.
- Pike, R. J., & Dikau, R. (Eds.). (1995). *Advances in geomorphometry. Proceedings of the Walter F. Wood memorial symposium*. Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband 101.
- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: a brief guide. In T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: concepts, software, applications*. Developments in Soil Science 33, 3-30. Amsterdam: Elsevier.
- Pouquet, J. (1966). *Initiation géopédologique. Les sols et la géographie*. Paris: SEDES.
- Retallack, G. J. (1990). *Soils of the past*. Boston, MA: Unwin Hyman.
- Richards, K. S., Arnett, R. R., & Ellis, S. (Eds.). (1985). *Geomorphology and soils*. London: Allen & Unwin.
- Rivière, A. (1952). Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Indices caractéristiques et interprétation géologique. Notion du faciès granulométrique. *Bul. Soc. Géol. de France*, 6è Série(II), 156-167.
- Rossiter, D. G. (2004). Digital soil resource inventories: status and prospects. *Soil Use & Management*, 20, 296-301.
- Rougerie, G., & Beroutchachvili, N. (1991). *Géosystèmes et paysages. Bilan et méthodes*. Paris: Armand Colin.
- Ruhe, R. V. (1956). Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Sci.*, 82, 441-455.

- Ruhe, R. V. (1960). Elements of the soil landscape. *Trans. 7th Intl. Congr. Soil Sci. (Madison, WI)*, 4, 165-170.
- Ruhe, R. V. (1975). *Geomorphology. Geomorphic processes and surficial geology*. Boston: Houghton Mifflin.
- Saldaña, A., Ibáñez, J. J., & Zinck, J. A. (2011). Soilscape analysis at different scales using pattern indices in the Jarama-Henares interfluvium and Henares River valley, Central Spain. *Geomorphology*, 135, 284-294.
- Saldaña, A., Stein, A., & Zinck, J. A. (1998). Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares valley (Spain). *Catena*, 33, 139-153.
- Sánchez, P. A., & al. (2009). Digital soil map of the world. *Science*, 325, 680-681.
- Schaetzl, R., & Anderson, S. (2005). *Soils: genesis and geomorphology*. New York: Cambridge University Press.
- Schlichting, E. (1970). Bodensystematik und Bodensoziologie. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 127(1), 1-9.
- Sharif, M., & Zinck, J. A. (1996). Terrain morphology modelling. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXI, Part B3, 792-797.
- Simonson, R. W. (1959). Outline of a generalized theory of soil genesis. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 23, 152-156.
- Skidmore, A. K., Watford, F., Luckananurug, P., & Ryan, P. J. (1996). An operational GIS expert system for mapping forest soils. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(5), 501-511.
- Small, R. J. (1970). *The study of landforms. A textbook of geomorphology*. London: Cambridge University Press.
- Soil Survey Staff. (1960). *Soil classification: a comprehensive system. 7th Approximation*. Washington DC: US Government Printing Office.
- Soil Survey Staff. (1967). *Supplement to soil classification system (7th Approximation)*. Washington DC: Soil Conservation Service.
- Soil Survey Staff. (1975). *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. USDA Agriculture Handbook 436. Washington: US Gov Printing Office.
- Soil Survey Staff. (1993). *Soil survey manual*. US Department of Agriculture Handbook 18. Washington DC: US Gov Printing Office.
- Soil Survey Staff. (1999). *Soil Taxonomy*. US Department of Agriculture Handbook 436. Washington DC: US Gov Printing Office.
- Sokal, R. R., & Sneath, P. H. A. (1963). *Principles of numerical taxonomy*. San Francisco: Freeman.
- Thornbury, W. D. (1966). *Principios de geomorfología*. Buenos Aires: Editorial Kapelusz.
- Thwaites, R. N. (2007). Development of soil geomorphology as a sub-discipline of soil science. Retrieved from www. Nov. 19, 2007.
- Tricart, J. (1962). *L'épiderme de la terre. Esquisse d'une géomorphologie appliquée*. Paris: Masson.
- Tricart, J. (1965a). *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Paris: Masson.
- Tricart, J. (1965b). Morphogenèse et pédogenèse. I. Approche méthodologique: géomorphologie et pédologie. *Science du Sol A*, 69-85.
- Tricart, J. (1968). *Précis de géomorphologie. Tome1: Géomorphologie structurale*. Paris: SEDES.
- Tricart, J. (1972). *La terre, planète vivante*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Tricart, J. (1977). *Précis de géomorphologie. Tome 2: Géomorphologie dynamique générale*. Paris: SEDES-CDU.
- Tricart, J. (1994). *Ecogéographie des espaces ruraux*. Paris: Nathan.
- Tricart, J., & Cailleux, A. (1962). *Le modelé glaciaire et nival*. Paris: SEDES.
- Tricart, J., & Cailleux, A. (1965). *Le modelé des régions chaudes. Forêts et savanes*. Paris: SEDES.
- Tricart, J., & Cailleux, A. (1967). *Le modelé des régions périglaciaires*. Paris: SEDES.
- Tricart, J., & Cailleux, A. (1969). *Le modelé des régions sèches*. Paris: SEDES.
- Tricart, J., & Kilian, J. (1979). *L'éco-géographie et l'aménagement du milieu naturel*. Paris: Editions Maspéro.
- Urban, D. L., O'Neill, R. V., & Shugart Jr., H. H. (1987). Landscape ecology. A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *BioScience*, 37(2), 119-127.
- USDA. (1971). *Guide for interpreting engineering uses of soils*. Washington DC: USDA Soil Conservation Service.
- Van Zuidam, R. A. (1985). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphological mapping*. Enschede, The Netherlands: ITC.
- Ventura, S. J., & Irvin, B. J. (2000). Automated landform classification methods for soil-landscape studies. In J. P. Wilson & J. C. Gallant (Eds.), *Terrain analysis: principles and applications*, 267-294. New York: John Wiley & Sons.
- Verstappen, H. T. (1983). *Applied geomorphology; geomorphological survey for environmental development*. Amsterdam: Elsevier.
- Verstappen, H. T., & Van Zuidam, R. A. (1975). *ITC system of geomorphological survey*. Enschede, The Netherlands: ITC.
- Viers, G. (1967). *Eléments de géomorphologie*. Paris: Nathan.

- Visser, W. A. (Ed.). (1980). *Geological nomenclature*. Royal Geological and Mining Society of the Netherlands. Utrecht: Bohn, Scheltema & Holkema.
- Way, D. S. (1973). *Terrain analysis. A guide to site selection using aerial photographic interpretation*. Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson & Ross.
- Wielemaker, W. G., de Bruin, S., Epema, G. F., & Veldkamp, A. (2001). Significance and application of the multi-hierarchical landsystem in soil mapping. *Catena*, 43, 15-34.
- Wilding, L. P., & Drees, L. R. (1983). Spatial variability and pedology. In L. P. Wilding, N. E. Smeck & G. F. Hall (Eds.), *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions*, 83-116. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Wilding, L. P., Smeck, N. E., & Hall, G. F. (Eds.). (1983). *Pedogenesis and soil taxonomy. I. Concepts and interactions*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- Winter, S. M. (2007). Soil geomorphology of the Copper River Basin, Alaska, USA. Retrieved from www Nov. 19, 2007.
- Wood, A. (1942). The development of hillside slopes. *Geol. Ass. Proc.*, 53, 128-138.
- Wooldridge, S. W. (1949). Geomorphology and soil science. *J. Soil Sci.*, 1, 31-34.
- Wysocki, D. A., Schoeneberger, P. J., & LaGarry, H. E. (2000). Geomorphology of soil landscapes. In M. E. Sumner (Ed.), *Handbook of soil science*, E5-E39. Boca Raton FL: CRC Press.
- Zinck, J. A. (1970). Aplicación de la geomorfología al levantamiento de suelos en zonas aluviales. Barcelona, Venezuela: Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- Zinck, J. A. (1972). *Ensayo de clasificación numérica de algunos suelos del Valle Guarapiche, Estado Monagas, Venezuela*. Paper presented at the IV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo (resumen), Maracay, Venezuela.
- Zinck, J. A. (1974). Definición del ambiente geomorfológico con fines de descripción de suelos. Cagua, Venezuela: Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- Zinck, J. A. (1977). Ensayo sistémico de organización del levantamiento de suelos. Maracay, Venezuela: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR).
- Zinck, J. A. (1980). *Valles de Venezuela*. Caracas: Lagoven. Petróleos de Venezuela SA.
- Zinck, J. A. (1988). Physiography and soils. Lecture notes. Enschede, The Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Zinck, J. A. (1990). Soil survey: epistemology of a vital discipline. *ITC Journal*, 1990(4), 335-351.
- Zinck, J. A., & Urriola, P. L. (1970). Origen y evolución de la Formación Mesa. Un enfoque edafológico. Barcelona, Venezuela: Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- Zinck, J. A., & Urriola, P. L. (1971). Estudio edafológico Valle Guarapiche, Estado Monagas. Barcelona, Venezuela: Ministerio de Obras Públicas (MOP).
- Zinck, J. A., & Valenzuela, C. R. (1990). Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal*, 1990(3), 270-294.
- Zonneveld, J. I. S. (1979). Land evaluation and land(landscape) science. Enschede, The Netherlands: ITC.
- Zonneveld, J. I. S. (1989). The land unit - A fundamental concept in landscape ecology, and its applications. *Landscape Ecology*, 3(2), 67-86.