

Serie Didáctica Nro. 8

Facultad de Ciencias Forestales

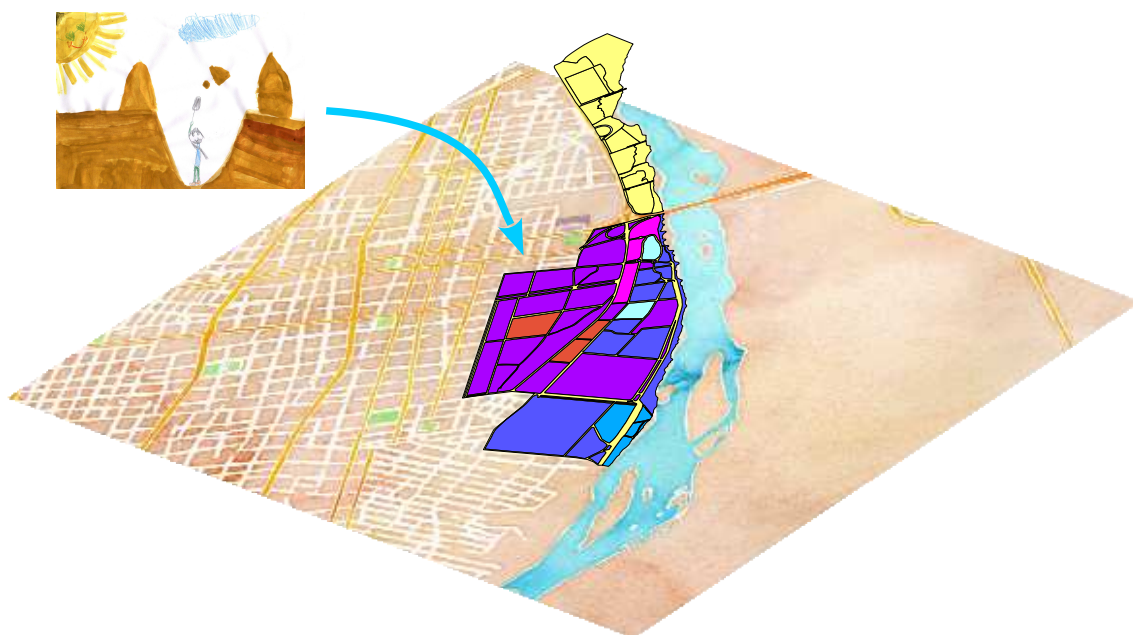
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SANTIAGO DEL ESTERO



CÁTEDRA DE
EDAFOLOGÍA FORESTAL

GUÍA DE EVALUACIÓN ECOLÓGICA DE SUELOS

2° edición



Dr. Guido LORENZ

Marzo de 2016

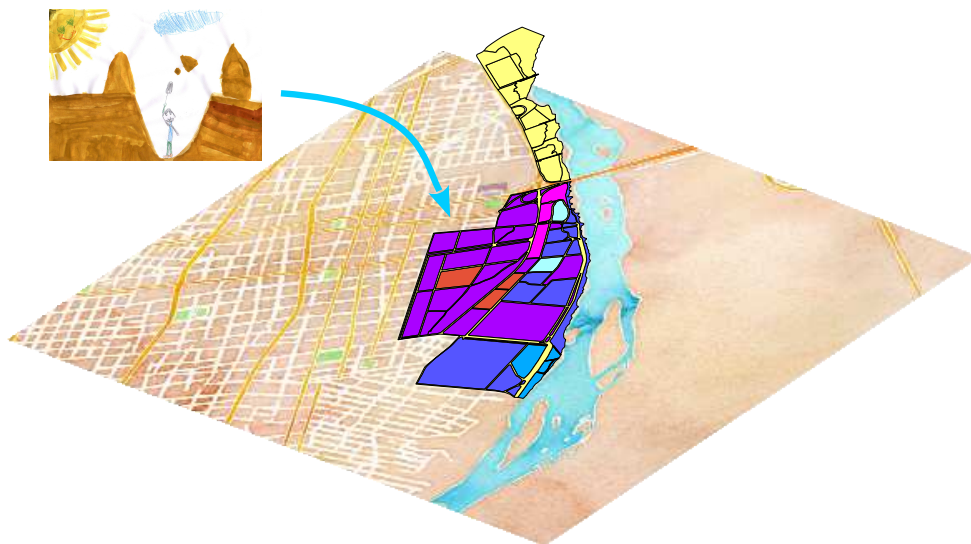
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
Universidad Nacional de Santiago del Estero

SERIE DIDÁCTICA N° 8

CÁTEDRA DE
EDAFOLOGÍA FORESTAL

**GUÍA DE
EVALUACIÓN ECOLÓGICA DE SUELOS**

2° edición



Guido Lorenz

Marzo de 2016

Tapa: dibujo de Virginia Lorenz y capa de información de suelos sobre mapa base de la ciudad de Santiago del Estero

Tipografía con el sistema de documentación L^AT_EX

Impreso en Santiago del Estero, Marzo de 2016

Lorenz, Guido. 2016. Guía de Evaluación Ecológica de Suelos.

N° 8 en la Serie Didáctica de la Facultad de Ciencias Forestales, 2° edición. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina. ISSN: *en trámite*

Autor:

Dr. Guido Lorenz

Profesor de Edafología Forestal

Facultad de Ciencias Forestales

Universidad Nacional de Santiago del Estero

Av. Belgrano (S) 1912

4200 Santiago del Estero

Argentina

e-mail: glorenz@unse.edu.ar

Prólogo

La evaluación funcional de suelos ha experimentado un auge en los últimos veinte años, por un efecto sinérgico entre los ámbitos de ciencia, legislación y planificación.

El reconocimiento del carácter multifuncional de la edafosfera con su importancia para la calidad del ambiente por los marcos legislativos de diversos países llevó a la demanda de metodologías para la evaluación y el monitoreo de suelos y su funcionalidad. Por el otro lado, el esfuerzo de muchas ciudades grandes en generar mapas de funcionalidad de los suelos urbanos, para fines de planeamiento y gestión, dio otro impulso en el desarrollo metodológico.

Acompaña estos enfoques también el sistema de clasificación de suelos “Base Referencial del Recurso Suelo”, que enfatiza el rol del suelo como “piel de la tierra”, incluyendo criterios y descriptores de los suelos con la mirada hacia la gestión ambiental. En este sentido, la introducción del grupo los Tecnosoles, en el año 2006, refleja la creciente consideración e importancia de suelos marcadamente influenciados por materiales introducidos por el humano.

En base a estos avances, la nueva edición de esta *Guía de evaluación ecológica del suelo* amplía el espectro de funciones de suelos a evaluar, así como actualiza los diversos métodos. El texto quiere dar una introducción en la evaluación funcional, detallando los posibles criterios y parámetros a considerar para las funciones parciales. En cuanto a métodos completos, se presentan algunos, sin embargo, más bien se apunta en mostrar que un esquema de evaluación se debe construir en base al contexto ambiental, al enfoque y escala del estudio o proyecto, la base de información, etc., basándose siempre en métodos de base estandarizados.

Con esta idea, se entrega esta nueva versión, dirigida a estudiantes, docentes e profesionales interesados en la temática. La guía se revisa continuamente, así que serán bienvenidas las sugerencias y observaciones a la misma.

Santiago del Estero, marzo de 2016

Guido Lorenz

Prólogo de la primera edición

Esta guía está destinada a estudiantes, docentes y usuarios de suelos, que desean evaluar las funciones del suelo como componente de ecosistemas.

La metodología presentada se basa principalmente en la escuela alemana de evaluación de suelos, representada por mis profesores Dr. Ernst Schlichting[†] y Dr. Karl Stahr, autores de un libro abarcativo sobre descripción, análisis, interpretación y evaluación ecológica de suelos (Schlichting y H. Blume 1966; Schlichting *et al.* 1995). Estos libros y una “guía de práctica” para estudiantes de edafología, del profesor Reinhold Jahn (1992), se usaron como principales fuentes de este texto. Una serie de otros trabajos se consideró para complementar ciertos aspectos de la evaluación. Fueron introducidas adaptaciones, necesarias para compatibilizar algunos métodos con otros sistemas de medición o para considerar condiciones locales.

Un nuevo enfoque incorporado en esta guía, es la creación de connotaciones ecológicas con nombres o adjetivos taxonómicos de suelos, con la idea de fomentar un afianzamiento con la nomenclatura específica y despertar el interés en la génesis del suelo cuyo conocimiento nos facilita tanto su interpretación funcional. Ello ha sido posible gracias a la reciente aparición de la “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo” (ISSS Working Group RB 1998), un sistema moderno de clasificación de suelos que considera criterios que inciden en la funcionalidad de los mismos y que es fácil de aprender debido a su estructura relativamente simple.

Quisiera agradecer en este lugar a la Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero, que me proporcionó el marco para elaborar la guía y la posibilidad de aplicarla en la docencia a nivel de grado y post-grado. Naturalmente merece una mención especial la comunidad educativa, que es el motor que promueve y retroalimenta nuestra actividad docente.

Esta guía se encuentra bajo una revisión y ampliación continua, sugerencias y observaciones al presente trabajo serán bienvenidas.

Santiago del Estero, marzo de 2004

Guido Lorenz

Índice general

1. Introducción	1
1.1. El paisaje	3
1.2. Las funciones de suelos en el ambiente - conceptos y desarrollo histórico .	5
1.3. Principios de la evaluación ecológica	8
1.3.1. Evaluación de funciones individuales	10
1.3.2. Gradación de parámetros y valoración de criterios	10
1.3.3. Profundidad del suelo a considerar en la evaluación	12
2. Parámetros ambientales y edáficos generales para la evaluación funcional	13
2.1. Proximidad al estado natural de paisajes y suelos	13
2.2. Características físicas generales de suelos	17
2.2.1. Textura - clases texturales	17
2.2.2. Densidad aparente y densidad de empaque	18
2.2.2.1. Densidad aparente	18
2.2.2.2. Densidad de empaque	20
2.3. Parámetros para el balance de agua y aire del suelo	21
2.3.1. Sistema poroso del suelo	21
2.3.1.1. Estimación de las fracciones de agua / poros	24
2.3.1.2. Evaluación de las fracciones de agua / poros	27
2.3.2. Infiltración y conducción de agua	27
2.3.2.1. Estimación y evaluación de la conductividad hidráulica del suelo	28
2.3.3. Profundidad de la capa freática	30
2.3.4. Frecuencia de recambio del agua del suelo	30
2.4. Características químicas y físico-químicas de suelos	31
2.4.1. pH del suelo	31
2.4.2. Materia orgánica del suelo	33
2.4.2.1. Concentración de materia orgánica en horizontes del suelo	33
2.4.2.2. Reservas de materia orgánica en el suelo	34
2.4.2.3. Potencial de mineralización de carbono (respiración edá- fica)	35

2.4.3.	Complejo adsorbente	35
2.4.3.1.	Capacidad de intercambio de cationes	36
2.4.3.2.	Capacidad efectiva de intercambio de cationes	38
3.	Evaluación de las funciones biológicas	39
3.1.	Los suelos como base y hábitat de la vida humana	39
3.1.1.	Apreciaciones sobre la calidad del suelo como base de la vida humana, desde la clasificación de suelos <i>WRB</i>	41
3.2.	Los suelos como base de vida y factor de sitio de la vegetación	42
3.2.1.	Espacio de enraizamiento	43
3.2.1.1.	Profundidad límite de enraizamiento	44
3.2.1.2.	Arraigabilidad	45
3.2.1.3.	Nomenclatura taxonómica relacionada con las condiciones de enraizamiento	45
3.2.2.	Balance de aire	46
3.2.3.	Balance de agua - disponibilidad de agua para la vegetación	47
3.2.3.1.	Agua disponible - criterio suelo	48
3.2.3.2.	Agua disponible - criterio clima	50
3.2.3.3.	Los factores locales relieve y capa freática	53
3.2.3.4.	Evaluación integral de la disponibilidad de agua	55
3.2.3.5.	Apreciaciones sobre el balance de agua desde la clasificación taxonómica de suelos	58
3.2.4.	Evaluación del balance de nutrientes	59
3.2.4.1.	Conceptos generales	59
3.2.4.2.	pH del suelo	61
3.2.4.3.	Parámetros relacionados con la materia orgánica del suelo	62
3.2.4.4.	Parámetros relacionados con el complejo adsorbente	63
3.2.4.5.	Evaluación de cantidades disponibles y reservas movilizables de nutrientes	65
3.2.5.	Condiciones adversas / toxicidades	66
3.2.5.1.	Salinidad	67
3.2.5.2.	Sodicidad	69
3.2.5.3.	Otras adversidades	71
3.2.6.	Sinopsis, procesamiento y diferenciación de la evaluación de la función biológica	71
3.2.6.1.	Ajuste de la evaluación de la función biológica del suelo por otros factores de sitio	72
3.3.	Los suelos como hábitat de la vegetación natural	73
4.	Evaluación de las funciones de regulación	75
4.1.	Regulación del balance de agua de paisajes	75

4.1.1.	Infiltración y conducción de agua	76
4.1.2.	Capacidad de retención de agua, captación temporaria de agua . . .	77
4.1.3.	Evaluación de la capacidad de atenuación de drenaje superficial y en profundidad	77
4.1.4.	Evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua - métodos según TUSEC	80
4.1.4.1.	Suelo como componente del ciclo de agua - el aspecto de calidad	80
4.1.4.2.	Suelo como componente del ciclo de agua - el aspecto de cantidad de agua	81
4.2.	Los suelos como sumideros de carbono	82
5.	Función de filtro, buffer y transformador de suelos	85
5.1.	Métodos de evaluación	86
5.1.1.	Capacidad de filtración de sustancias adsorbibles	88
5.1.2.	Evaluación de la capacidad de transformación de sustancias xe- nobióticas	88
5.1.3.	Evaluación de la capacidad de transformación de sustancias orgá- nicas contaminantes - método TUSEC	89
A.	Anexo	91
	Bibliografía	101
	Índice alfabético	107

Índice de figuras

1.1.	Esquema general de descripción, interpretación y evaluación de suelos . . .	2
1.2.	Cadena causal de pedogénesis y pedofunción	3
1.3.	Desarrollo metodológico de la evaluación funcional como producto de la interacción de diferentes ámbitos	7
1.4.	Esquema general de la evaluación funcional de suelos	9
1.5.	Esquema genérico para la evaluación de una sola función, en base a diferentes criterios	10
1.6.	Tipos de relación entre la variación del parámetro y su valoración	11
1.7.	Definición de clases de evaluación en función de la relación parámetro - valoración	12
2.1.	Clases texturales según el sistema estadounidense	18
2.2.	Evaluación de la densidad aparente en función del contenido de arcilla . . .	21
2.3.	Curva de retención de agua y distribución de los tamaños de poros	22
2.4.	Definición de los límites de las fracciones de agua y poros	24
2.5.	Infiltración acumulativa y tasa de infiltración en función del tiempo	28
2.6.	Estimación de la clase de conductividad hidráulica en función de textura y densidad aparente	29
2.7.	Importancia ecológica del pH del suelo	32
3.1.	Función biológica de factor de sitio de la vegetación y criterios de evaluación	42
3.2.	Propuesta de una evaluación diferencial de la función de espacio de vida (o factor de sitio) para vegetación natural, cultivos y forestación	43
3.3.	Disponibilidad de agua para la vegetación, en función de factores locales y generales de sitio	48
3.4.	Regiones hídricas de la Argentina, de acuerdo con diferentes clasificaciones (bio)climáticas	51
3.5.	Árbol de decisión respecto a la importancia de la capa freática para la disponibilidad de agua, de acuerdo con el contexto climático	54
3.6.	Esquema para la evaluación del criterio <i>disponibilidad de agua para la vegetación</i>	55
3.7.	Árbol de decisión para evaluar el agua disponible en función del clima . . .	57

3.8. Esquema de la movilización de elementos a partir del compartimento de reservas	59
3.9. Relación entre pH del suelo y la saturación de bases	64
3.10. Criterios y parámetros para evaluar la función biológica del suelo o del sitio	72
3.11. Árbol de decisión para el ajuste de la función biológica a nivel de sitio, en función de la humedad climática	73
3.12. Ajuste de la función biológica a nivel de sitio (fb.sitio), para zonas (semi)áridas y acceso de la vegetación a una capa freática profunda	73
3.13. Esquema para la evaluación de la función del suelo como hábitat de la vegetación natural	73
4.1. Función de regulación del balance de agua de paisajes - criterios o subfunciones principales	76
5.1. Posibles procesos parciales participando en la función de filtro del suelo .	85
5.2. Características de sustancias, importantes para su consideración en el contexto de la función de filtro de suelos	86
5.3. Factores y parámetros de la función de filtro	86
5.4. Estimación de la capacidad de intercambio catiónico (<i>CIC</i>) y superficie específica (<i>SE</i>) en base a otros parámetros descriptivos del suelo	87
A.1. Definición de los límites de las fracciones de agua de acuerdo con las condiciones de drenaje del suelo	93
A.2. Ficha edáfica sintética para registrar los datos de observación <i>in situ</i> de suelo y ambiente y de la evaluación ecológica del suelo	96

Índice de cuadros

1.1. Las principales funciones de paisaje	4
1.2. Las principales funciones de suelos	5
1.3. Escalas de gradación de parámetros y de valoración de criterios, usadas en la mayoría de las claves de evaluación	11
2.1. Clases de hemerobia del paisaje en relación al tipo de ecosistema o forma de uso de la tierra	15
2.2. Clases de hemerobia del suelo, basados en la modificación antropogénica	16
2.3. Evaluación de la proximidad al estado natural del suelo, basado en el criterio de hemerobia	17
2.4. Evaluación la densidad aparente	19
2.5. Evaluación la densidad de empaque	20
2.6. Rangos de tamaños de poros y su importancia ecológica	21
2.7. Estimación de las fracciones de agua en función de clase textural y densidad aparente	25
2.8. Correcciones medias de porosidad total, capacidad de aire, agua útil y capacidad de campo en función de textura, contenido de materia orgánica y de arcilla	26
2.9. Evaluación de las fracciones de agua, respectivamente poros	27
2.10. Estimación de la conductividad hidráulica de suelos de acuerdo con la densidad aparente y textura	29
2.11. Evaluación de la conductividad hidráulica de suelos	30
2.12. Clases de profundidad de la capa freática	30
2.13. Clases de profundidad de la capa freática, usadas en las guías de descripción de suelos	30
2.14. Rangos de pH de suelos	32
2.15. Estimación del contenido de materia orgánica, basada en el color del suelo	33
2.16. Evaluación del contenido de materia orgánica del suelo	34
2.17. Evaluación de las reservas de materia orgánica del suelo (<i>MOS</i>). Profundidad de referencia 1 m	34
2.18. Evaluación de la tasa de respiración edáfica	35
2.20. Evaluación de la capacidad de intercambio catiónico potencial (<i>CIC_{pot}</i>) .	38

2.21. Factores de corrección, en función del pH, para calcular la capacidad de intercambio efectiva	38
2.22. Evaluación de la capacidad de intercambio catiónica efectiva, cuantificada para el espacio de enraizamiento (ó 1 m de profundidad)	38
3.1. Evaluación del suelo como base de vida para la actividad humana	40
3.2. Evaluación de la profundidad fisiológica de enraizamiento	44
3.3. Evaluación de la profundidad fisiológica de enraizamiento, según TUSEC	44
3.4. Evaluación de la arraigabilidad	45
3.5. Gradación de la capacidad de aire	46
3.6. Evaluación de la capacidad de aire	46
3.7. Evaluación de la cantidad de agua útil en el espacio de enraizamiento)	50
3.8. Regiones hídricas de Argentina, de acuerdo con el índice hídrico de Thornthwaite	52
3.9. Regímenes de humedad del suelo, definidos en la clasificación norteamericana de suelos <i>Soil Taxonomy</i>	53
3.10. Corrección cualitativa de la evaluación de la disponibilidad de agua en función de suelo y clima, por el factor relieve	54
3.11. Índices de agua disponible en función de suelo y clima	56
3.12. Evaluación integral de la disponibilidad de agua para la vegetación, en función de clima, suelo, relieve y capa freática	58
3.13. Caracterización cualitativa de las reservas de nutrientes en suelos de acuerdo con el tipo de roca y grado de meteorización	60
3.14. Evaluación de los rangos de pH de suelos y su evaluación	62
3.15. Estimación de reservas y fracción disponible de N en función de la reserva de MOS y forma de humus	63
3.16. Evaluación de las reservas y fracciones disponibles de N	63
3.17. Evaluación de la saturación de bases	64
3.18. Evaluación del valor <i>S</i> en el espacio de enraizamiento	65
3.19. Evaluación de cantidades de nutrientes disponibles	66
3.20. Evaluación de reservas movilizables de nutrientes	66
3.21. Evaluación de la conductividad eléctrica en la solución del suelo	68
3.22. Ejemplo de la evaluación del suelo como hábitat de la vegetación natural, según los criterios rareza, condición de sitio extremo y grado de naturalidad	74
4.1. Evaluación de la función de regulación del balance de agua en función de la conductividad hidráulica y almacenamiento	79
4.2. Evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua - énfasis en la calidad de agua	81
4.3. Evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua - énfasis en la calidad de agua	82

4.4. Tasas medias de secuestro de carbono orgánico en suelos durante el holoceno	83
5.1. Evaluación de la capacidad general de filtro, buffer y transformador del suelo	87
5.2. Clases de efecto de filtro de horizontes o capas homogéneos para sustancias coloidales e iones en dispersión	88
5.3. Evaluación de la capacidad de filtro, subfunción capacidad de transformación biológica	89
5.4. Evaluación de la capacidad de microorganismos de transformar sustancias orgánicas contaminantes - método TUSEC	90
A.1. Clases de tamaños de partículas, según los sistemas de FAO y USDA	91
A.2. Clave para la estimación de la densidad aparente de suelos minerales	92
A.3. Estimación diferenciada de todas las fracciones de poros en función de clase textural y densidad aparente	94
A.4. Estimación de la conductividad hidráulica en función de clase textural y densidad aparente	95
A.5. Cuadro sinóptico de valores de parámetros y su evaluación, para los diferentes criterios considerados en la función biológica	97

1

Introducción

Los suelos son sistemas abiertos y dinámicos, ubicados en la superficie terrestre, en la intersección de litosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera. Resultan de la interacción de estas cuatro esferas en el tiempo y se caracterizan por una morfología única para cada lugar geográfico, adquirida por los procesos de formación del suelos.

Los suelos forman parte de paisajes, y “hay una co-evolución de suelo y paisaje, y en particular la integración espacial y temporal del suelo, del relieve y la vida” (Gavaud 1977; Ruellan 1985). Siendo sistemas en sí mismo e integrando otros de jerarquía superior, los suelos cumplen funciones esenciales en la ecosfera.

Es por ello que el estudio de suelos generalmente tiene como objetivo principal, comprender los suelos de un paisaje (Schlichting *et al.* 1995). Ello significa, observar las características de los suelos, deducir su formación en función de los factores ambientales (edafo- o pedogénesis) y, finalmente, comprender las funciones que desempeñan en su ambiente (fig. 1.1).

Cabe destacar la fuerte interrelación entre formación (pedogénesis) y funcionalidad de los suelos, a través de las propiedades que generan los procesos de formación (fig. 1.2), lo que enfatiza la importancia del conocimiento de los conceptos de formación de suelos, para llegar a una comprensión completa de los suelos respecto a su evolución y el rol funcional en el paisaje.

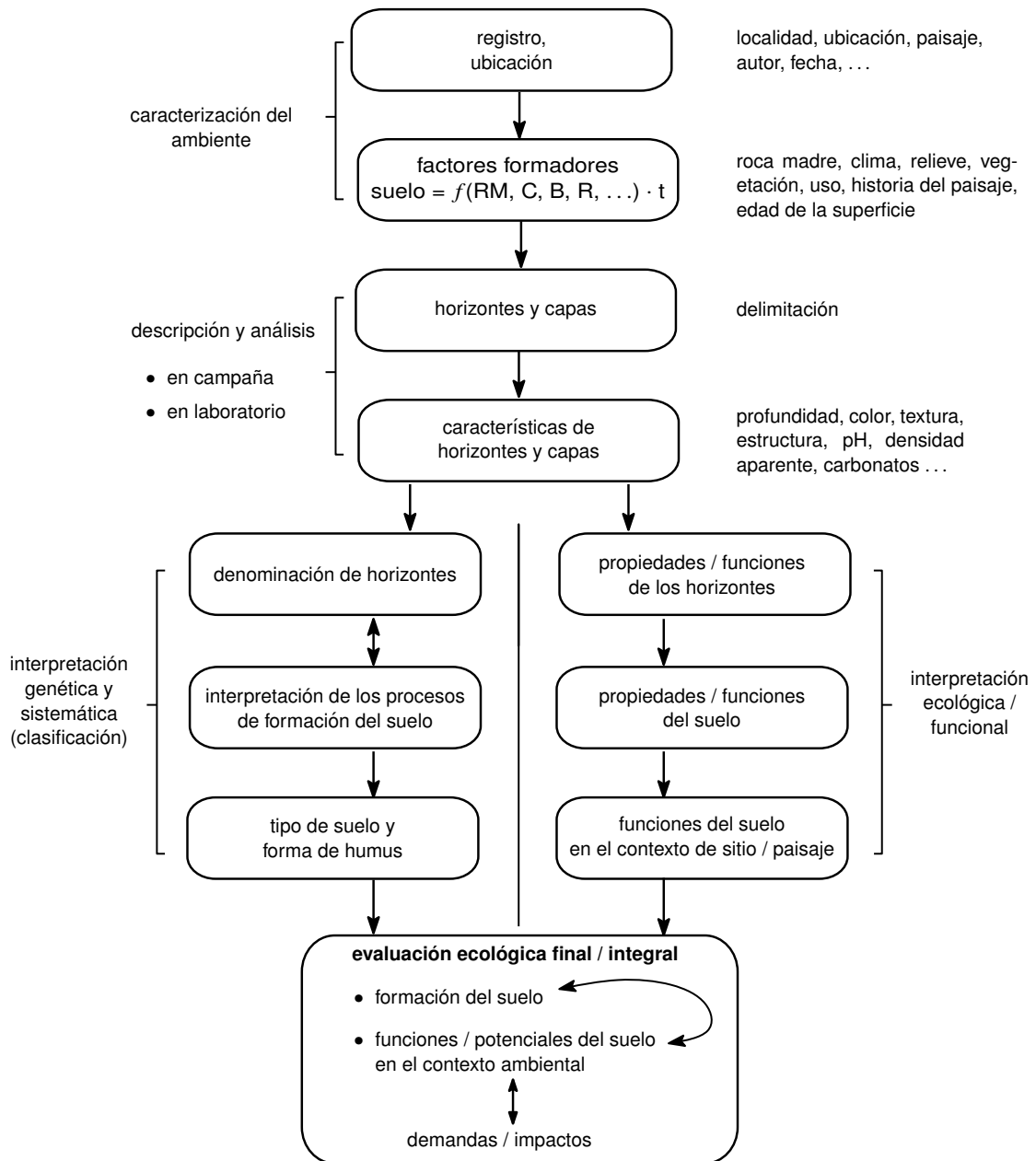


Figura 1.1: Esquema general de descripción, interpretación y evaluación de suelos (adaptado de Schlichting *et al.* 1995; FAO 2006)

Considerando que el humano continuamente evoluciona con y modifica su ambiente, comprender el rol de los suelos como subsistemas de la ecosfera parece indispensable para que esta interacción humano-ambiente pueda ser más armónica. En este sentido, la evaluación ecológica de suelos constituye una herramienta de base para facilitar el diagnóstico y monitoreo de la funcionalidad de la edafosfera, con fines de optimizar el ordenamiento territorial y el uso de la tierra.

Por ello, el objetivo de esta guía es, presentar los aspectos, principios y métodos de la evaluación funcional o ecológica de suelos, con énfasis en la función del suelo como componente de ecosistemas y paisajes.

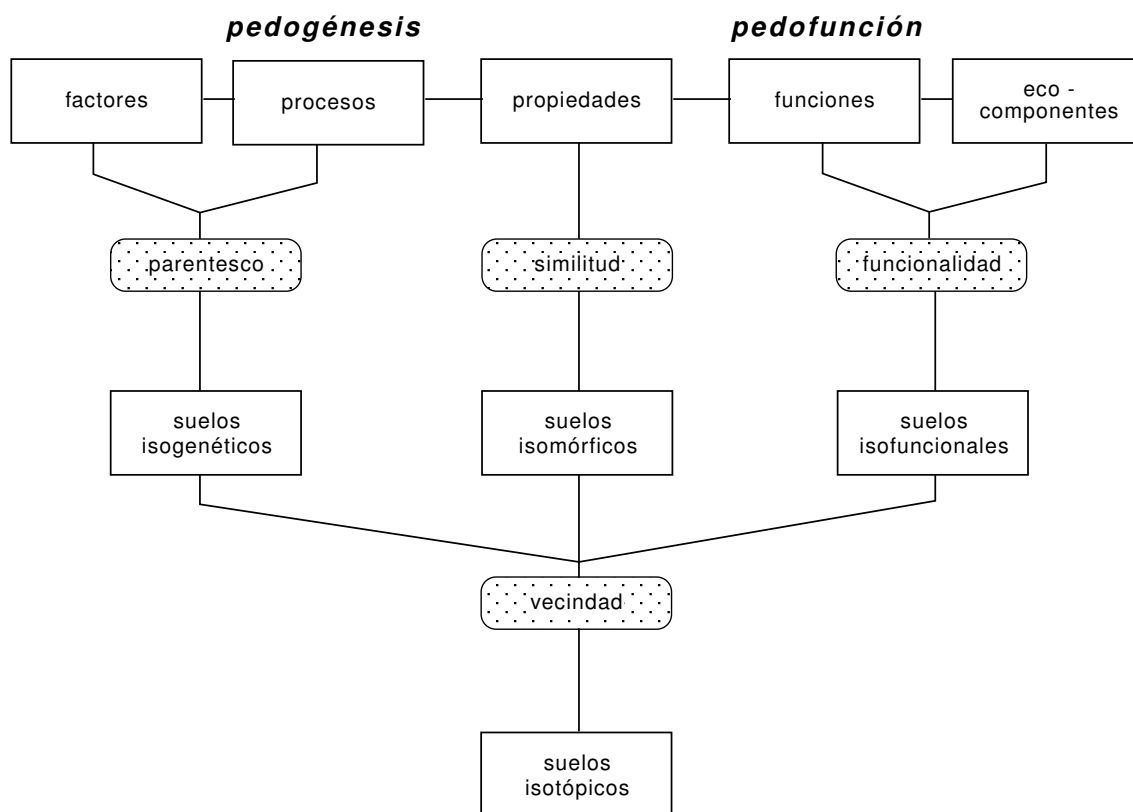


Figura 1.2: Cadena causal de pedogénesis y pedofunción (según Schroeder 1992)

1.1. El paisaje

Como la formación, conformación y funcionamiento de suelos y paisajes están fuertemente interrelacionados, se presentan primero algunas nociones sobre el paisaje, que enmarca siempre los suelos a un nivel jerárquico mayor.

Un paisaje se puede definir, de una forma bastante pragmática, como "... cualquier parte del territorio tal como la percibe la población, cuyo carácter sea el resultado de la acción y la interacción de factores naturales y/o humanos" (Consejo de Europa 2000), sin embargo, como bien afirman Burel y Baudry (2002), "existe independientemente de su percepción". El paisaje se entiende, a la vez, como producto de sistemas naturales, bio-geofísicos y como sistemas mentales, noosféricos (Naveh 2001), y mantiene un carácter dialéctico entre objeto y sujeto, entre realidad ecológica y producto social (Bertrand 1978). Los paisajes pueden reconocerse como entidades materiales y culturales heterogéneas y tangibles del espacio vivo total (Naveh 2001). Se caracterizan por su estructura, sus funciones y sus cambios en el tiempo (Forman y Godron 1986).

La estructura de los paisajes se relaciona con diversas funciones, las cuales se pueden agrupar, según Bastian (1997), en tres grandes clases: funciones (i) de producción, (ii) de regulación y (iii) de espacio de vida, o, de manera muy similar en socioeconómicas, bioecológicas y socioecológicas y culturales (Naveh 2001). A modo de ejemplo (ver cuadro 1.1), se pueden mencionar la producción agropecuaria y forestal como servicios

socioeconómicos, mientras que la conservación de la biodiversidad o la regulación del balance de agua y de otros ciclos de elementos entran en el rubro de las funciones bioecológicas. Valores culturales, belleza escénica, de información o de salud humana entran en la clase de prestaciones socioecológicas y culturales.

Cuadro 1.1: Las principales funciones de paisaje (Bastian 1997)

funciones de producción (socioeconómicas)	funciones de regulación (bioecológicas)	funciones de espacio de vida (socioecológicas y culturales)
<ul style="list-style-type: none"> ■ disponibilidad de recursos renovables <ul style="list-style-type: none"> ● producción de biomasa <ul style="list-style-type: none"> ○ vegetal <ul style="list-style-type: none"> ◇ agricultura; ◇ pastizales; ◇ cultivos especiales; ◇ madera; ○ animal <ul style="list-style-type: none"> ◇ animales salvajes; ◇ pescado; ● regeneración de agua; <ul style="list-style-type: none"> ○ agua superficial; ○ agua freática; ■ disponibilidad de recursos no renovables <ul style="list-style-type: none"> ● materiales primarios minerales; ● combustibles fósiles; 	<ul style="list-style-type: none"> ■ regulación de los ciclos de energía y materia; ● funciones pedológicas; <ul style="list-style-type: none"> ○ protección del suelo de la erosión; ○ protección del suelo de empapamiento; ○ protección del suelo de desecamiento; ○ función de filtro, buffer y transformador; ● funciones hidrológicas; <ul style="list-style-type: none"> ○ regeneración de agua freática; ○ regulación del balance de agua (retención, redistribución); ○ auto-purificación de aguas abiertas; ● funciones meteorológicas (clima, aire) <ul style="list-style-type: none"> ○ regulación del régimen calórico; ○ regulación de la humedad atmosférica; ○ control de los perfiles de viento; ■ regulación y regeneración de poblaciones y biocenosis; <ul style="list-style-type: none"> ● reproducción y regeneración biótica; ● regulación de poblaciones de organismos; ● conservación de especies y formas; ● función de hábitat; 	<ul style="list-style-type: none"> ■ funciones psicológicas; <ul style="list-style-type: none"> ● estéticas; ● éticas (cultura, historia, etc.); ■ funciones informativas; <ul style="list-style-type: none"> ● función para ciencia y educación; ● (bio)indicación del estado ambiental; ■ funciones de ecología humana; <ul style="list-style-type: none"> ● efectos bioclimáticos; ● efectos de filtro y buffer (agua, aire, suelo); ● efectos acústicos; ■ funciones de recreación (complejo de funciones psicológicas y de ecología humana)

En estas definiciones y clasificaciones se manifiesta una fuerte interpretación antropocéntrica de las funciones. Cabe aclarar aquí, que en las últimas décadas, el término y concepto de los llamados *servicios ecosistémicos* ha ganado en difusión y popularidad (Millennium Ecosystem Assessment 2005), el cual interpreta las funciones de paisaje

directamente en relación al bienestar humano. A diferencia, el concepto de función de paisaje, partía históricamente más de la interrelación entre estructura y funcionamiento del paisaje, refiriéndose a los flujos de energía, materia y organismos. Sin embargo, los términos de funciones, potenciales o capacidad de paisajes, que se introdujeron más temprano, representan muchas veces conceptos similares a o hasta idénticos con los de servicios ecosistémicos, según la escuela o la definición que se dio particularmente (Bastian *et al.* 2010).

De un breve análisis del cuadro 1.1 y volviendo a la idea que los suelos son subsistemas de los ambientes terrestres, se desprende, que en casi todas las funciones paisajísticas participan los suelos, de forma directa o indirecta.

1.2. Las funciones de suelos en el ambiente - conceptos y desarrollo histórico

Tradicionalmente, los suelos fueron interpretados respecto a su función para la producción agraria o forestal. Esta visión se cambió en los años 70 del siglo 20, en la escuela alemana, cuando Schlichting introduce, en los trabajos “*Los suelos amortiguan efectos ambientales*” (Schlichting 1972) y “*Las funciones de suelos en la ecosfera*” (Schlichting 1978), las ideas de las múltiples funciones de los suelos en el ambiente. De la misma escuela, Blume, su colaborador, edita un libro sobre la protección de suelos, en el cual parte de las funciones de los suelos, presentando cada una conceptualmente (H. Blume 1990d). Las funciones declaradas, de acuerdo con estos dos primeros científicos, se presentan en cuadro 1.2.

Cuadro 1.2: Las principales funciones de suelos (H. Blume 1990c; H. Blume 1990b; Schlichting 1972; Schlichting 1978; Schlichting 1986)

- la función biológica, de factor de sitio de la vegetación y hábitat de organismos, . . .;
- la función de regulador, especialmente del balance de agua del paisaje;
- la función de ser fuentes de materiales;
- la función de filtro, buffer y transformador;
- la función de archivo de la historia natural y cultural;
- la función de área para actividades antrópicas de construcción, recreación, deposición, . . .;

En los años 90, en la escuela norteamericana, la idea de la funcionalidad se nuclea en el concepto de *calidad de suelos*, presentado en los trabajos de Doran *et al.* (1994) y

Doran y Jones (1996). Adoptado por la Soil Science Society of America (1995), ésta le da un fuerte desarrollo en la investigación y la difusión de conceptos y estrategias de manejo.

Finalmente, la incorporación de la definición del suelo como un sistema multifuncional en el marco legal de países fue un elemento muy importante en el desarrollo de los conceptos y métodos de evaluación de las funciones de suelos.

Después de una primera introducción de los conceptos en el *Soil Protection Act* de una provincia alemana en el año 1991, la legislación nacional de Alemania incorpora las ideas de la funcionalidad de suelos en el *Federal Soil Protection Act of Germany* (Federal Soil Protection Act 1998), con las siguientes definiciones:

... en el sentido de la presente ley, los suelos desempeñan

1. funciones naturales como
 - a) base de vida y hábitat para humanos, animales, plantas y organismos del suelo;
 - b) parte de los ciclos naturales, especialmente de los de agua y nutrientes;
 - c) medio de filtro, buffer y transformador, ...;
2. función de archivo de la historia natural y cultural;
3. funciones de uso como
 - a) fuente de materiales primarios;
 - b) área para colonización y recreación;
 - c) sitio para el uso agrícola y forestal;
 - d) sitio para otros usos económicos y públicos, tránsito, abastecimiento y eliminación de desechos;

Finalmente, el marco legal de Europa adopta estas ideas en la propuesta de la *Estrategia temática para la protección de suelos* (Comisión de las Comunidades Europeas 2006), en la cual proclama:

“La presente Directiva establece un marco para la protección del suelo y la preservación de su capacidad para realizar cualquiera de las siguientes funciones ambientales, económicas, sociales y culturales:

- a) producción de biomasa, incluyendo la agricultura y la silvicultura;
- b) almacenamiento, filtrado y transformación de nutrientes, sustancias y agua;
- c) reserva de la biodiversidad, como hábitats, especies y genes;
- d) entorno físico y cultural para las personas y las actividades humanas;

- e) fuente de materias primas;
- f) reserva de carbono;
- g) archivo del patrimonio geológico y arqueológico.”

Dada que las diferentes reglamentaciones no sólo toman el concepto de multi-funcionalidad, sino expresan la importancia de la misma y la necesidad de su protección, con fines de preservar la calidad ambiental, a partir de allí, se generó la demanda

- de definiciones claras y metodologías para evaluar los diversos aspectos funcionales del suelo;
- de información base sobre el recurso suelo, con fines de evaluar el estado de su capacidad funcional;

El desarrollo metodológico de la evaluación funcional de suelos, a partir de los años '90, se lleva a cabo en forma transdisciplinaria (fig. 1.3). Partiendo de los conceptos generados en la ciencia, es el ámbito de la planificación urbana que empieza a tomar en cuenta el recurso suelo, reconociendo su importancia en la calidad ambiental, dentro de un contexto de crecientes amenazas de la misma. Por tal razón, se registran muchos estudios dedicados al mapeo de suelos y su evaluación funcional en ambientes urbanos (Hochfeld *et al.* 2003; Stroganova *et al.* 1998; Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014), adoptando métodos existentes pero a su vez aportando nuevos criterios o metodologías.

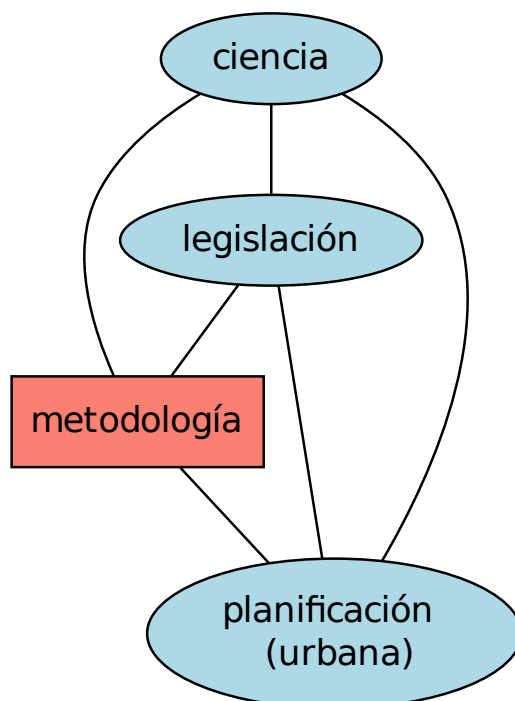


Figura 1.3: Desarrollo metodológico de la evaluación funcional como producto de la interacción de diferentes ámbitos

En esta interacción, se superpone la legislación, con las exigencias mencionadas arriba en cuanto a definiciones y calidad de métodos. La influencia del marco legal se refleja en casi todas los textos y manuales dedicados a la metodología de evaluación funcional de suelos, como Ad-hoc-AG Boden (2003), Ad-hoc-AG Boden (2007), BAM (2001), Gerstenberg *et al.* (2007), Gerstenberg (2013), Hochfeld *et al.* (2003), Lehmann y Stahr (2010) y Lehmann *et al.* (2013), ya que toman como base la clasificación de las funciones edáficas establecida por la *Federal Soil Protection Act of Germany* (Federal Soil Protection Act 1998).

1.3. Principios de la evaluación ecológica

Un aspecto importante en la evaluación funcional de los suelos es la consideración de la multi-funcionalidad, y no de un solo propósito (fig. 1.4). Significa que deben evaluarse las distintas funciones potenciales, para reconocer las potencialidades del suelo, establecer jerarquías de importancia de las mismas y detectar incompatibilidades entre funciones y posibles usos de la tierra proyectados.

En cuanto a las funciones considerados, generalmente se abarcan las llamadas eco-funciones, relacionadas con el funcionamiento bio-físico de suelo y paisaje, y la función de archivo (fig. 1.4). A diferencia, la función de superficie o de área, que a menudo no es compatible con las eco-funciones, no responde a una evaluación propia, sino al conflicto o impacto que produciría respecto las otras funciones.

De acuerdo con fig. 1.4, la evaluación de las diferentes funciones individuales genera, para cada unidad cartográfica del suelo, un vector de valoraciones funcionales (x_1, \dots, x_n), dejando, para el conjunto de las unidades cartográficas de suelos de un área (us_1, \dots, us_m) una matriz de valores cualitativos:

unidad de suelo	funciones					
	X_1	X_2	...	...	...	X_n
us_1	x_{11}	x_{12}	...	...	...	x_{1n}
us_2	x_{21}	x_{22}	...	...	...	x_{2n}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
us_m	x_{m1}	x_{m2}	...	...	...	x_{mn}

En el procesamiento de la valoración multi-funcional, se integran después criterios de importancia o de jerarquía, según el contexto ambiental y los objetivos de una planificación. Finalmente, se derivan productos como las evaluaciones específicas, parciales e integrales, que servirán como base de información y criterios para el ordenamiento territorial.

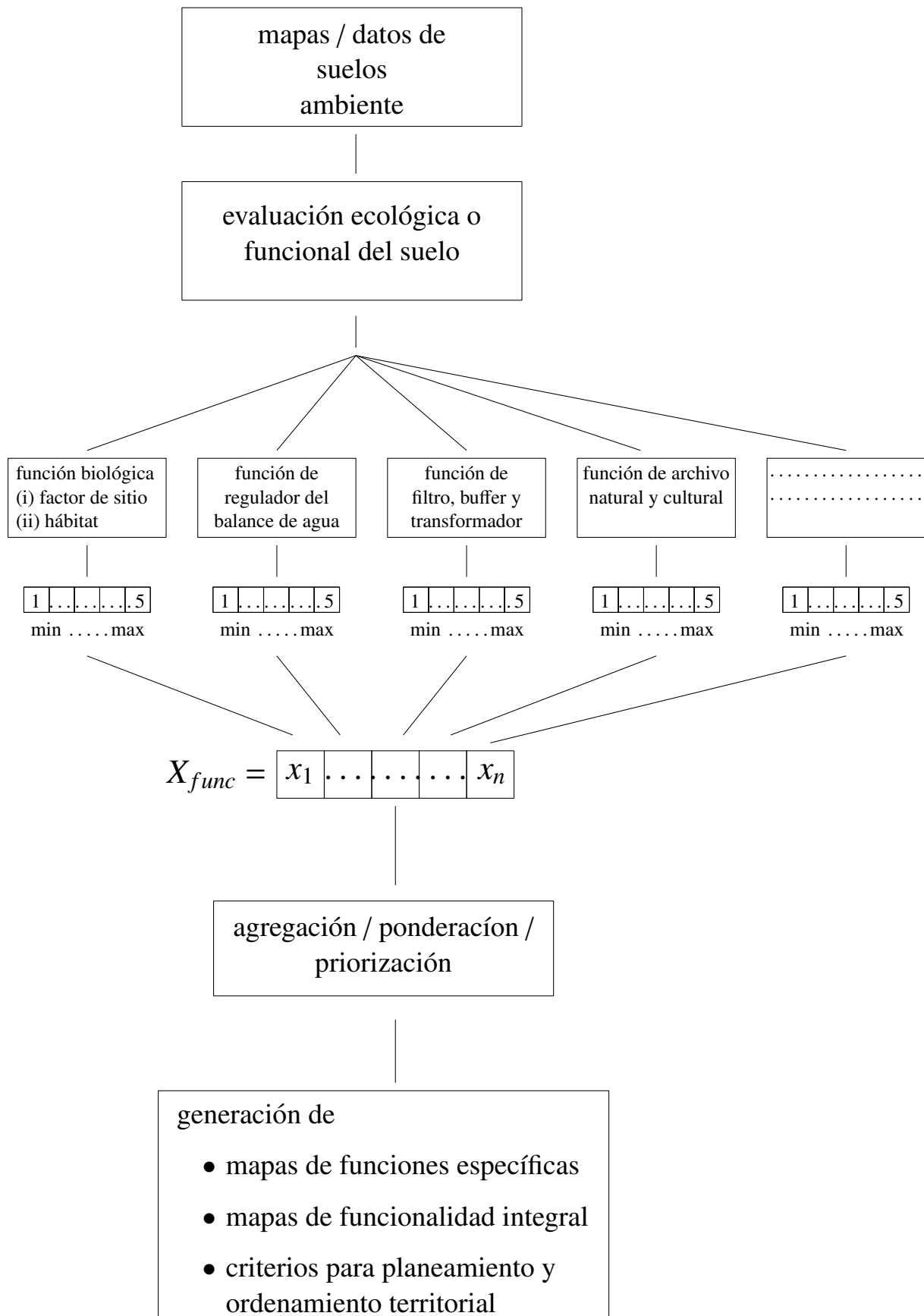


Figura 1.4: Esquema general de la evaluación funcional de suelos, considerando las diferentes clases funcionales

1.3.1. Evaluación de funciones individuales

Respecto a la evaluación de funciones específicas, el procedimiento es el siguiente (fig. 1.5): para una función en cuestión, se define uno o varios criterios (o subfunciones) que son propios de la función en cuestión y de interés en el contexto ambiental. Con fines de valorar estos criterios, se buscan los parámetros edáficos y ambientales que permiten su mejor caracterización. Estas pueden ser de primer orden (o directos), o de segundo orden (o indirectos).

En lo posible, se usan los parámetros directos, sin embargo, a menudo se trata de parámetros específicos o sofisticados respecto a la medición, de tal manera no existen como datos en el banco de información. Es este lugar, donde entran en juego las llamadas funciones de edafo-transferencia, con las cuales se estiman los parámetros primarios a través de otros secundarios. Estas estimaciones son muy interesantes, porque reducen marcadamente el requerimiento de información edáfica a unos pocos parámetros descriptivos y de análisis de rutina.

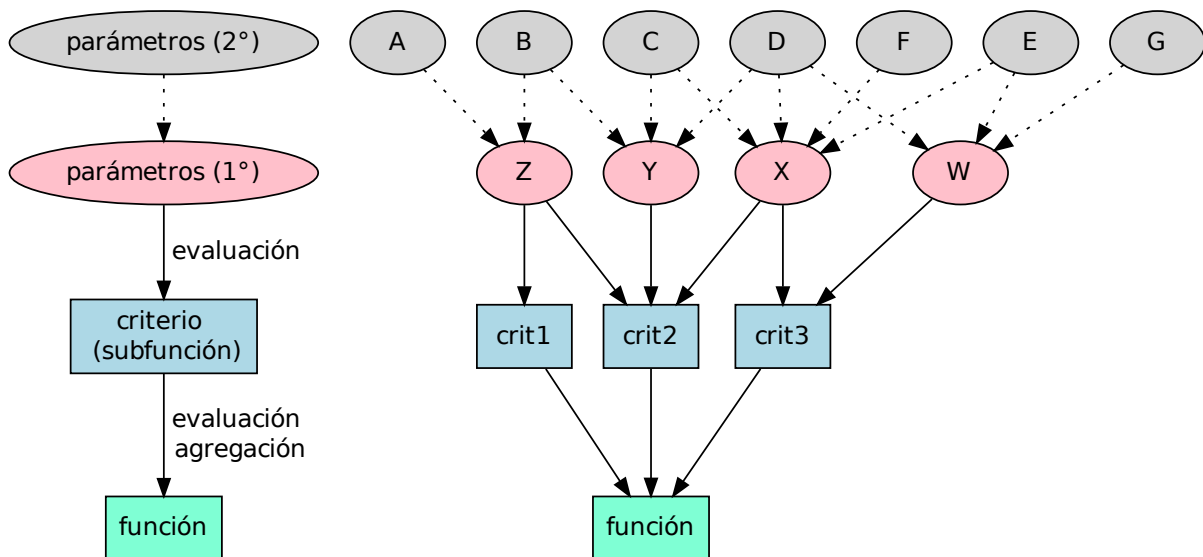


Figura 1.5: Esquema genérico para la evaluación de una sola función, en base a diferentes criterios (o subfunciones), y parámetros directos (o de 1° orden) e indirectos (o de 2° orden)

1.3.2. Gradación de parámetros y valoración de criterios

En la valoración de parámetros, se estableció el esquema de clases cualitativas en un rango de alto a bajo, o cero y uno. Conviene mantener un número impar de clases, de tal manera siempre existe una clase media, con la noción de *regular*.

En la mayoría de los casos, se usa una escala de 5 niveles de gradación, con el valor 1 asignado a “muy bajo”, y el valor 5 a “muy alto”. Sin embargo, hay que diferenciar en una clasificación del parámetro mismo, en la cual se estratifican los valores numéricos en clases (de bajo a alto), y las clases de valoración del criterio, en una escala de “baja”, igual a “desfavorable”, y “alta”, igual a “favorable” (cuadro 1.3).

Cuadro 1.3: Escalas de gradación de parámetros y de valoración de criterios, usadas en la mayoría de las claves de evaluación

gradación de parámetro		evaluación de criterio		
numérica	verbal	numérica	verbal	valoración
1	muy bajo	1	muy bajo	muy desfavorable
2	bajo	2	bajo	⋮
3	regular	3	regular	⋮
4	alto	4	alto	⋮
5	muy alto	5	muy alto	muy favorable

Para ello, se tiene que reconocer el tipo de relación entre la variación del parámetro y su valoración, que puede ser, p.ej. cuánto más alta, mejor, o por ejemplo, puede tener una curva de óptimo (fig. 1.6). Según esta relación, las escalas de valoración tienen que ser ajustadas, como se ve en el ejemplo de fig. 1.7.

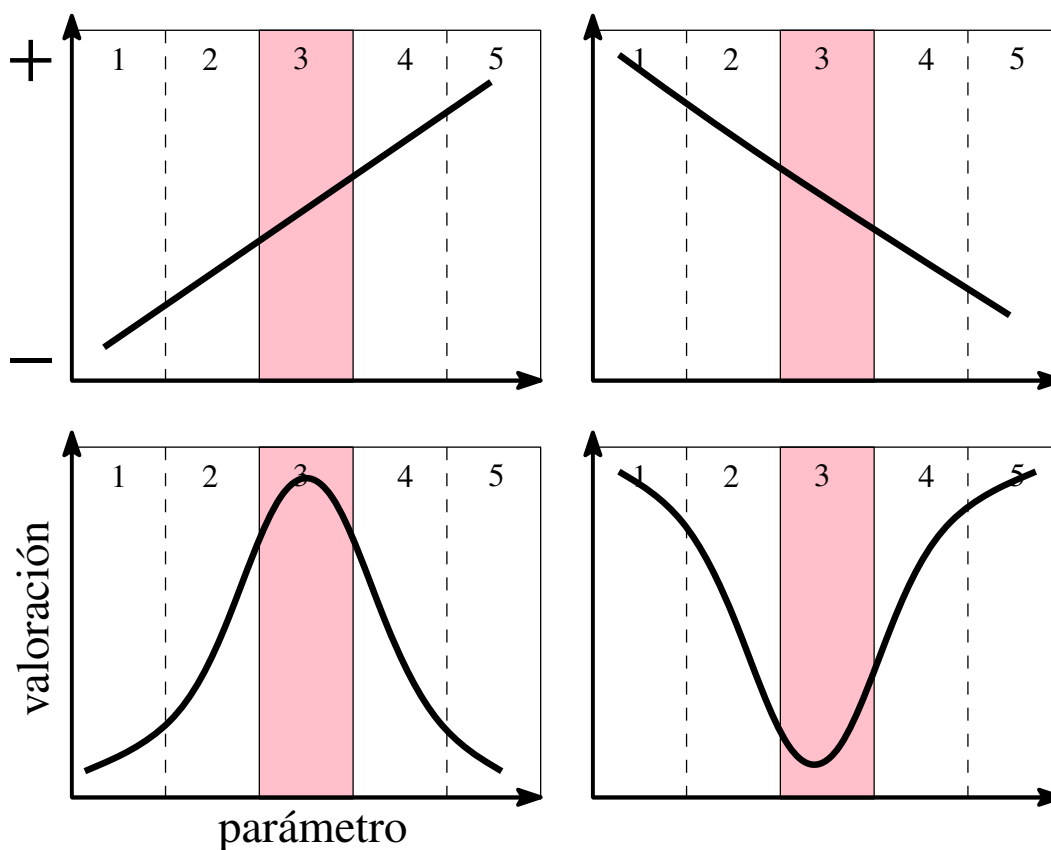


Figura 1.6: Tipos de relación entre la variación del parámetro y su valoración

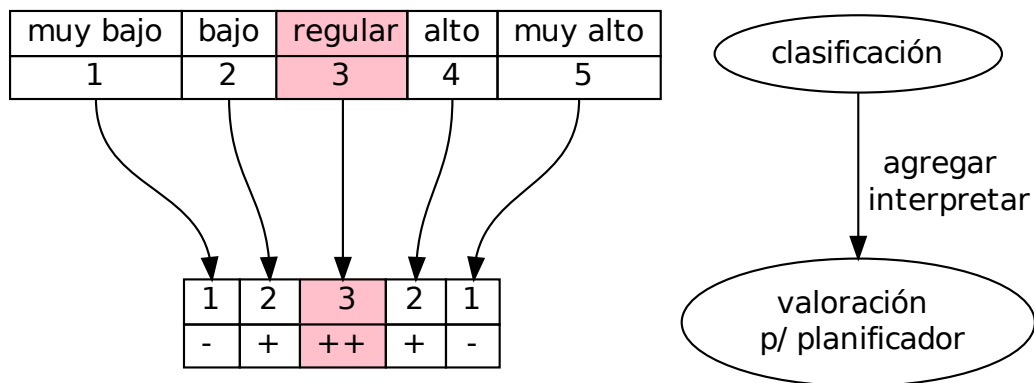


Figura 1.7: Definición de clases de evaluación en función de la relación parámetro - valoración. Ejemplo de una curva de óptimo. Aparte de la reclasificación, en este caso se produce automáticamente una reducción del número clases de valoración

A su vez, se puede proceder a una reducción del número de clases evaluativas, tal como se propone en el Atlas Ambiental de Berlín (Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014), con fines de facilitar la interpretación por parte de planificadores.

1.3.3. Profundidad del suelo a considerar en la evaluación

La profundidad del suelo hasta la cual se evalúan los criterios de las diferentes funciones, varía de acuerdo con la función considerada y el método específico. En términos generales, el primer metro de los suelos es la sección que más interacción posee con las otras esferas, por lo tanto, ante la falta de otros criterios, la profundidad de 1 m como referencia es un buen punto de partida para la evaluación ecológica. Dada la existencia de una gran variedad de criterios a evaluar con un número importante de diferentes métodos, conviene mencionar explícitamente la profundidad de evaluación usada, con una breve fundamentación.

En cuanto a las funciones biológicas, la evaluación de parámetros edáficos la profundidad de referencia se define por el espacio radicular de la vegetación. Por eso, se determina, como primer paso en el procedimiento metodológico, la profundidad fisiológica de enraizamiento. A menudo, pero no siempre, esta profundidad coincide con a la profundidad del *solum* del suelo.

Para las funciones de regulación y de filtro, generalmente se toma en consideración un metro de profundidad, en primera instancia, pero en algunos métodos, se reduce la sección evaluada en función de otros criterios.

2

Parámetros ambientales y edáficos generales para la evaluación funcional

Al considerar que el suelo se encuentra inserto en un cierto contexto de ambiente o paisaje, existe una serie de variables ambientales que son necesarios o complementarias para una interpretación funcional del suelo. Por esta razón, se presentan aquí en primer lugar diversos aspectos y parámetros para su descripción.

En cuanto al suelo, la mayoría de sus propiedades interviene no solamente en una, sino en diferentes funciones del mismo. Tan es así, que a menudo se propone un conjunto mínimo de datos, que es suficiente para caracterizar las funciones principales del suelo (Doran y Parkin 1996). Por ello, se presentan en esta primera sección también diferentes características del suelo, con una breve introducción conceptual y claves genéricas de evaluación. Muchos de estos parámetros y claves se consideran después en los diversos métodos específicos.

2.1. Proximidad al estado natural de paisajes y suelos

La alteración que ha sufrido un paisaje o suelo por las actividades humanas representa un aspecto importante para la evaluación de funciones y cargas del sistema. En este sentido, cuanto mayor el grado de impacto, tanto más distante es el sistema al estado natural.

Como medida de distancia al estado natural de un ecosistema se usa la llamada *hemerobia*, que es “una medida integral de los impactos en los ecosistemas, por todas las intervenciones humanas, sean intencionales o no. El grado de hemerobia es el resultado del impacto en un área particular y de los organismos que viven en ella.” (Sukopp (1976), en Steinhardt *et al.* (1999)). El concepto fue introducido por Jalas (1955), más bien referido a modificaciones respecto a la flora, y posteriormente ampliado por Sukopp (1972), en cuanto al impacto antropogénico general en el ecosistema completo.

De acuerdo con este concepto integral, el grado de hemerobia se ofrece como un valor guía para diversas funciones de regulación (biodiversidad, sistemas, clima), de pro-

ducción (agri- y silvicultura) y de espacio de vida (bienestar, valores estéticos, culturales). A su vez, puede alertar sobre posibles cargas del paisaje, de acuerdo con la intervención sufrida (Lorenz y Izzo 2015).

El concepto de hemerobia es usado a menudo en sistemas de clasificación y monitoreo del ambiente (Hill *et al.* 2002; Kiedrzyński *et al.* 2014; Kim *et al.* 2002; Stein y Walz 2012; Stoll 2007), caracterizando de manera integral el estado del paisaje respecto a su influencia antropogénica. Desde esta aproximación, ya representa un indicador válido que permite ciertas apreciaciones referidas a la modificación del suelo. Sin embargo, más específicos son todavía la ampliación del concepto de hemerobia, incluyendo la modificación de los suelos, como lo muestran H.-P. Blume y Sukopp (1976) (en H. Blume 1990a), y, con una escala más diferenciada para los ambientes urbanos, el *Berlin Environmental Atlas* (Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014).

Se presentan aquí dos esquemas de clasificación, uno que combina la hemerobia del paisaje con el grado de modificación de suelos (cuadro 2.1), y otro más específico para el grado de modificación antropogénica de suelos, adaptado para ambientes urbanos y periurbanos (cuadro 2.2)

Cuadro 2.1: Clases de hemerobia del paisaje en relación al tipo de ecosistema o forma de uso de la tierra (H. Blume 1990a; Stein y Walz 2012)

clase de hemerobia		ecosistema / uso de la tierra	influencia antrópica	modificaciones en el suelo
1	ahemerobia	ambientes naturales, como turberas, tundra, bosques sin intervención;	sin influencia antropogénica alguna	sin modificación
2	oligohemerobia	bosques naturales con mínima intervención, turberas, dunas	extracción de madera, ganadería extensiva, inmisión	modificación del ciclo de MOS, balance de nutrientes
3	mesohemerobia	forestaciones de especies exóticas, frutales extensivos, praderas,	cosecha de madera, extracción de hojarasca	ciclo de MOS, balance de nutrientes, forma de humus;
4	β - euhemerobia	ganadería intensiva, forestaciones intensivas, agricultura	fertilización, aplicación de cal, drenaje, nivelación, laboreo	turbación, aumento de tasas de mineralización, aumento de nutrientes disponibles modificación de pH, cambio de balance de agua y aire
5	α - euhemerobia	cultivos especiales, agricultura intensiva, terrenos c/ riego de aguas servidas	laboreo profundo, drenaje permanente, riego, aplicación de pesticidas	como en caso anterior, más: turbación profunda, reptación, erosión, acumulación de nutrientes, mejora de balance de agua y aire;
6	polihemerobia	superficies parcialmente selladas (camino de ripio, vías de trenes), depósitos de basura, desechos de minería, etc.	biocenosis parcialmente destruida, cobertura con materiales alóctonos, biótopo fuertemente modificado	fosilización parcial, transformación de hojarasca y bioturbación fuertemente reducidas, modificación de todas las características del sitio, arraigabilidad reducida, balance de aire desmejorado;
7	metahemerobia	ecosistemas intoxicados, superficies totalmente selladas	biocenosis totalmente destruida	reducción fuerte de procesos biológicos, dominancia de contaminantes, espacio radicular reducido

Cuadro 2.2: Clases de hemerobia del suelo, basados en la modificación antropogénica; ajustado para ambientes urbanos y periurbanos (adaptado de Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014)

grado de modificación ^a		ecosistema / uso de la tierra	criterio
1	no modificado (ahemerobia)	ambientes naturales, como turberas, tundra, bosques sin intervención;	sin influencia antropogénica alguna
2	muy ligeramente modificado (oligohemerobia)	bosques naturales con mínima intervención, turberas, dunas	modificación mínima del suelo
3	algo modificado (mesohemerobia)	forestaciones	suelo superficial ligeramente modificado;
4	”	parque natural en zona periurbana	suelo superficial moderadamente modificado;
5	moderadamente modificado (euhemerobia)	pastizales, praderas,	suelo superficial con influencia antropogénica
6	”	pastizales, praderas,	suelo superficial con influencia antropogénica
7	”	parques, espacios verdes, cementerios, huertas, camping, área residencial con <30 % de sellado, praderas,	suelo superficial y subsuperficial con influencia antropogénica
8	fuertemente modificado (polihemerobia)	terrenos con riego de aguas servidas	suelo superficial (fuerte) y subsuperficial con influencia antropogénica
9	muy fuertemente modificado (polihemerobia)	parques urbanos (con relleno), huertas en terrenos de relleno o depósitos, baldíos, zonas militares, minería a cielo abierto	suelo con fuerte modificación antropogénica, predominantemente con materiales transportados y depositados
10	extremadamente modificado (metahemerobia)	zonas de deportes, área residencial con sellado entre 30 % a 60 %	suelo con fuerte modificación antropogénica, predominantemente con materiales transportados y depositados
11	”	zona urbana central, áreas de carreteras, ambientes urbanos ^b con sellado > 60 %	suelo con muy fuerte modificación antropogénica, predominantemente con materiales transportados y depositados
12	”	ambientes urbanos con sellado > 90 %	suelos totalmente modificados por deposición, abrasión, compactación

^a1 - 7 suelos cercanos a condiciones naturales; 8 - 12 suelos con marcada influencia antrópica

^bincluye áreas residenciales, comerciales, industriales, carreteras, etc.

Similar a lo propuesto en el *Berlin Environmental Atlas*, se procede en una reclasificación de la hemerobia al criterio de “proximidad al estado natural del suelo”, con una reducción a 5 clases y obteniendo una escala invertida a la original, de desfavorable (1) a favorable (5, cuadro 2.3).

Cuadro 2.3: Evaluación de la proximidad al estado natural del suelo, basado en el criterio de hemerobia

hemerobia ^a (1 - 7)	nivel de modificación ^b (1 -12)	proximidad estado natural - evaluación	
		verbal	numérica
1	1 - 2	muy alta	5
2	3	alta	4
3	4 - 6	regular	3
4 - 5	7 - 9	baja	2
6 - 7	10 - 12	muy baja	1

^asegún cuadro 2.1

^bsegún cuadro 2.2

2.2. Características físicas generales de suelos

2.2.1. Textura - clases texturales

La textura del suelo es una característica que posee muchas connotaciones ecológicas, debido a que se relaciona tanto con propiedades físicas, químicas, mineralógicas y biológicas. Por ello, la clase textural aparece en muchos métodos de evaluación como parámetro a considerar.

Los métodos aquí presentados se basan en las clases texturales definidas por FAO (2009) (fig. 2.1), que son idénticas a las clases usadas en EEUU Soil Survey Division Staff 1993, sin embargo con una diferencia en los límites entre limo y arena (63 μm en lugar de 50 μm) y entre arena media y gruesa (630 μm en lugar de 500 μm), cuadro A.1, pág. 91).

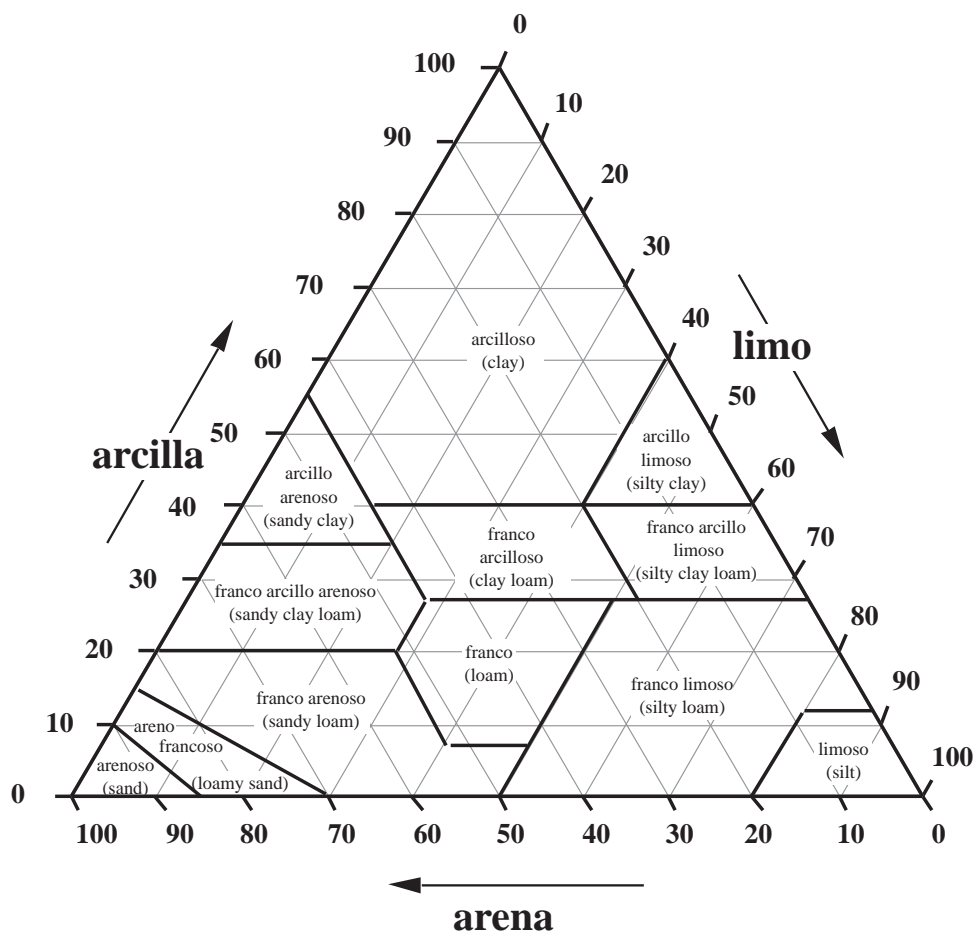


Figura 2.1: Clases texturales según el sistema de FAO (2009); en el texto se usan las siguientes siglas para las clases texturales principales: arcilla (Ac), arcillo limoso (AcL), arcillo arenoso (AcA), franco (F), franco arcillo arenoso (FAcA), franco arcilloso (FAc), franco arcillo limoso (FAcL), franco arenoso (FA), franco limoso (FL), arenoso (A), areno francoso (AF), limoso (L)

2.2.2. Densidad aparente y densidad de empaque

2.2.2.1. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa del suelo referida a su volumen en su ordenación estructural natural, llamado volumen aparente. Es un parámetro físico simple que refleja la estructuración del suelo, proporcionando información sobre la resistencia mecánica, el sistema poroso y aspectos de balance de agua y aire. Si bien se la puede usar para evaluar la penetrabilidad del suelo para raíces vegetales, sin embargo, para este fin se ofrece la llamada “densidad de empaque” como mejor parámetro, que se presentará en la última sección.

En el marco de cálculos de balances de agua y elementos, con fines de investigación o evaluación ecológica, la densidad aparente es un parámetro indispensable, porque es necesario para la transformación de valores analíticos referidos a la masa del suelo a

otros referidos al volumen y finalmente a una superficie de referencia. En estos contextos se requiere entonces del valor cuantitativo del parámetro, a través de mediciones o estimaciones.

$$D_{ap} = \frac{m_s}{V_{ap}} \quad (2.1)$$

D_{ap} densidad aparente [kg/dm³]
 m_s masa del suelo [kg]
 V_{ap} volumen aparente [dm³]

La medición de la densidad aparente generalmente se realiza mediante la extracción de una muestra no disturbada de volumen definido (cilindro de metal) y la determinación de la masa seca (105 °C). Si no existen valores medidos de la densidad aparente, se la puede aproximar a través de métodos de campo (ver cuadro A.2, pág. 92, en el anexo).

Los valores medidos o estimados de la densidad aparente se evalúan según cuadro 2.4.

D_{ap} [kg/dm ³]	evaluación		
	verbal	numérica	
<1.2	muy baja	1	Cuadro 2.4: Evaluación la densidad aparente (D_{ap}) de acuerdo con Ad-hoc-AG Boden (2005)
1.2 - 1.4	baja	2	
1.4 - 1.6	regular	3	
1.6 - 1.8	alta	4	
≥ 1.8	muy alta	5	

Aparte de ser un parámetro físico que posee su propio significado respecto a una evaluación funcional, la densidad aparente también permite calcular la porosidad del suelo según las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{V_{po}}{V_{ap}} \times 100 \quad (2.2)$$

$$V_{ap} = V_{po} + V_s \quad (2.3)$$

$$P = 1 - \frac{D_{ap}}{D_r} \quad (2.4)$$

P porosidad [cm³/cm³] ó [% - vol]
 V_{po} volumen de poros [cm³]
 V_{ap} volumen aparente [cm³]
 V_s volumen del suelo [cm³]
 D_{ap} densidad aparente [g/cm³]
 D_r densidad real [g/cm³]

La densidad real se refiere a la densidad de la fase sólida. En caso de que no exista un valor medido de la densidad real, se puede utilizar la del cuarzo: $D_r = 2.65 \text{ g/cm}^3$; sin embargo, la D_r disminuye con un aumento del contenido de materia orgánica (MOS), lo que se puede aproximar mediante la siguiente ecuación empírica (Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung 1980):

$$D_r = 2.65 - 0.0135 \times \%MOS \quad (2.5)$$

La evaluación de la porosidad se presentará en el apartado sobre el sistema poroso del suelo (ver cuadro 2.3, pág. 21).

2.2.2.2. Densidad de empaque

La “densidad de empaque” (D_{emp} , *packaging density*) se usa para circunscribir la resistencia que ejerce el suelo contra la penetración por las raíces vegetales. Depende de la densidad aparente y de la textura del suelo, dado que por el efecto agregante de la arcilla, la dureza que experimenta la raíz en un material de cierta densidad aumenta proporcionalmente con el tenor de arcilla. Es un parámetro que se deriva para fines de la evaluación ecológica, introducido por AG Bodenkunde (1982); hoy se encuentra incorporado también en la *Guía de descripción de suelos* (FAO 2009).

$$D_{emp} = D_{ap} + 0.009 \times arc.pc \quad (2.6)$$

D_{emp}	densidad de empaque [g/cm^3]
D_{ap}	densidad aparente [g/cm^3]
$arc.pc$	proporción de arcilla [% – masa]

La densidad de empaque se evalúa según cuadro 2.5 o, de manera más explícita, disgregando los dos parámetros de influencia, según fig. 2.2.

	D_{emp} [kg/dm^3]	evaluación	
		verbal	numérica
Cuadro 2.5: Evaluación la densidad de empaque (D_{emp}), de acuerdo con Ad-hoc-AG Boden (2005) y FAO (2009)	<1.4	muy baja	1
	1.4 - 1.6	baja	2
	1.6 - 1.8	regular	3
	1.8 - 2.0	alta	4
	≥ 2.0	muy alta	5

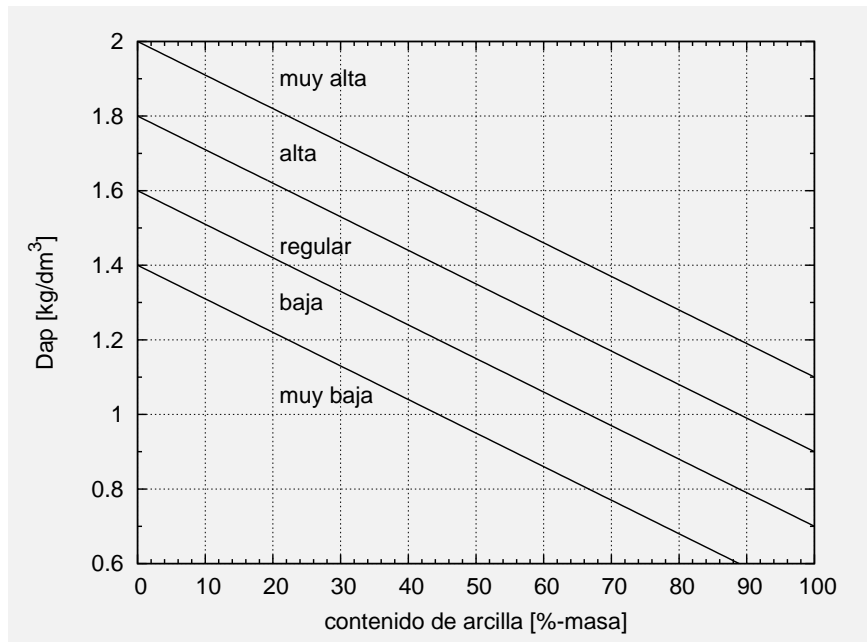


Figura 2.2: Evaluación de la densidad aparente (D_{ap}) en función del contenido de arcilla (\rightarrow densidad de empaque, D_{emp}) (FAO 2009)

2.3. Parámetros para el balance de agua y aire del suelo

2.3.1. Sistema poroso del suelo

El suelo (también sedimentos y algunas rocas) representa un sistema poroso que es caracterizado por tamaño, forma y proporción de los poros. Este sistema poroso es de gran importancia ecológica, porque determina el almacenamiento y movimiento de agua y aire en el suelo y es el espacio físico para el desarrollo de los organismos del suelo y las raíces vegetales (cuadro 2.6).

Cuadro 2.6: Rangos de tamaños de poros y su importancia ecológica

tipo de poros	diámetro de poros [μm]	tensión de agua [pF]	importancia / función
macroporos gruesos (<i>ma.P.g</i>)	>50	0 - 1.8	aireación, drenaje rápido
macroporos finos (<i>ma.P.f</i>)	50 - 10	1.8 - 2.5	drenaje lento, agua disponible, espacio para raíces de plantas y organismos del suelo
mesoporos (<i>me.P</i>)	10 - 0.2	2.5 - 4.2	agua disponible, espacio para microorganismos
microporos (<i>mi.P</i>)	<0.2	>4.2	agua no disponible, espacio no accesible para la biota

Tamaño, proporción y morfología de los poros dependen de la textura del suelo, que proporciona un sistema primario de poros, y de la estructura, que superpone un sistema secundario. El sistema poroso retiene agua, debido a fuerzas capilares y de adsorción, que son tanto más altas cuanto más finos los poros. La fuerza de retención, que corresponde a un estado energético del agua, se llama potencial matricial (o tensión) del agua del suelo. Para expresar el potencial se usa la unidad de presión, en [MPa], [bar] o [cm], correspondiendo esta última unidad a la presión que ejerce una columna de agua de cierta altura en [cm H₂O]. Dado que el potencial matricial corresponde a una succión respecto a la condición de agua libre, adquiere signos negativos (presión negativa o tensión). En la edafología, a menudo se usa el logaritmo decádico del valor absoluto del potencial en [cm] de columna de agua, el llamado valor *pF*, expresado como valor positivo.

De acuerdo con la distribución de los tamaños de poros, se observa una variación del potencial matricial (ψ) en función del contenido de agua (θ) en el suelo (fig. 2.3). Esta relación es conocida como curva de retención de agua, característica del agua del suelo o relación $\psi-\theta$, siendo específica para cada horizonte de un suelo. Debido a la relación entre potencial matricial y diámetro de poros, esta función proporciona a su vez la distribución de los tamaños de poros del suelo (fig. 2.3).

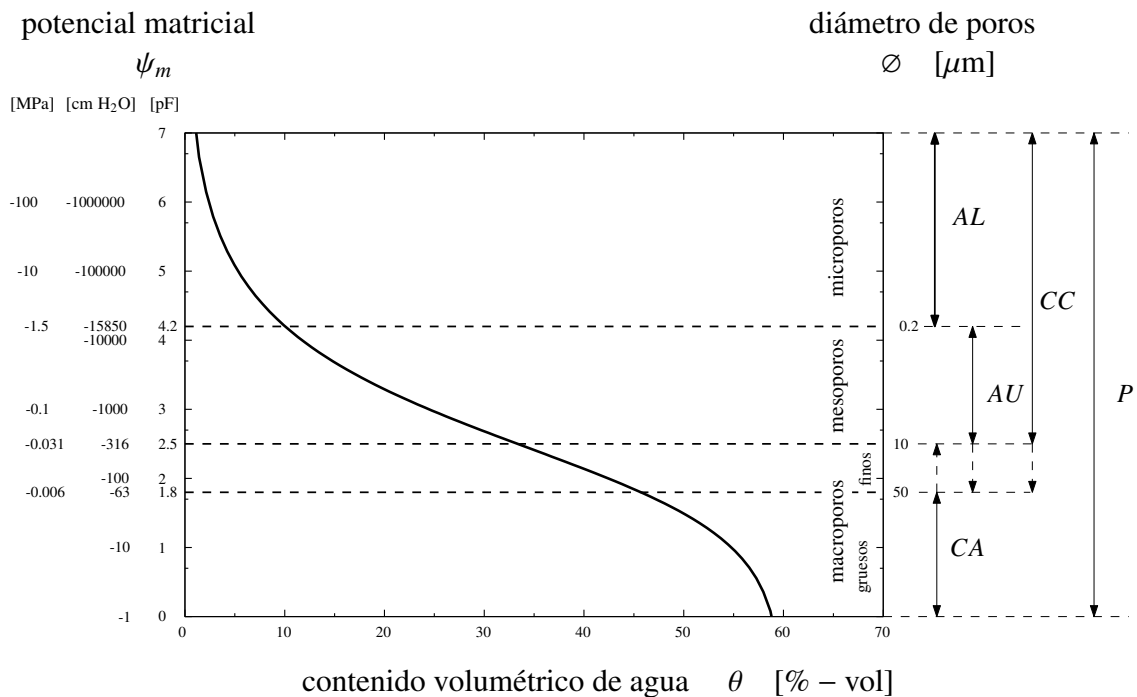


Figura 2.3: Curva de retención de agua y distribución de los tamaños de poros. Fracciones de agua y poros marcados a la derecha

De acuerdo con el potencial de agua (retención), se distinguen diferentes fracciones de agua, que se caracterizan por su movilidad y su disponibilidad para las plantas, y que corresponden a una cierta clase de poros (fig. 2.3):

porosidad (*P*): volumen total de poros; corresponde a la capacidad máxima de agua que cabe en el suelo;

capacidad de campo (CC): la fracción de agua que retiene el suelo contra la gravedad después de haber estado saturado totalmente con agua. Es un estado de equilibrio *in situ*, regulado por el drenaje de los macroporos, que se ajusta entre valores de pF de 1.8 a 2.5, según las condiciones de drenaje y la distancia a la capa freática;

capacidad de aire (CA): fracción de macroporos que se drena rápidamente después de saturar el suelo con agua; corresponde al volumen de aire en la situación de la capacidad de campo; es el volumen de poros para la percolación rápida de agua y la circulación de aire;

agua ligada (AL): fracción no disponible para plantas (por definición), ligada con una succión mayor a pF 4.2 (≈ 1.5 MPa) en los microporos del suelo;

agua útil (AU): es la fracción de agua que retiene el suelo contra la gravedad y que es a su vez disponible para las plantas; es la diferencia entre la capacidad de campo y el agua ligada;

$$P = CA + CC \quad (2.7)$$

$$CC = AU + AL \quad (2.8)$$

$$P = CA + AU + AL \quad (2.9)$$

<i>P</i>	porosidad [% – vol]
<i>CA</i>	capacidad de aire [% – vol]
<i>CC</i>	capacidad de campo [% – vol]
<i>AU</i>	agua útil [% – vol]
<i>AL</i>	agua ligada [% – vol]

Dado que la capacidad de campo (*CC*) representa un estado de equilibrio *in situ*, el potencial que se establece en esta situación depende justamente de las condiciones de drenaje del suelo, ajustándose entre valores de pF 1.8 a pF 2.5. Sin embargo, para fines analíticos y de evaluación de suelos, se define un potencial límite correspondiente, y los criterios para definir este potencial varían entre países. De tal manera, en EEUU, se toma un valor de pF de 2.5, mientras que en Alemania uno de pF 1.8 para la capacidad de campo. Por ello es muy importante considerar, cuál es el valor límite establecido para los datos a disposición, para elegir las claves de evaluación correspondientes. En esta guía, se toma el valor de pF 1.8, correspondiente a un diámetro de poros de $50 \mu\text{m}$, como límite de la capacidad de campo (fig. 2.4).¹

¹En condiciones de buen drenaje, con capa freática profunda, aparte de los macroporos gruesos, los macroporos finos (*ma.P.f*, fig. A.1) se drenan en tiempos relativamente cortos y permite en ellos la circulación de aire, por lo cual la *CC* se ajusta aproximadamente en pF 2.5. A diferencia, en suelos de drenaje algo imperfecto, los macroporos finos drenan muy lentamente y la *CC* se estabiliza en este caso en aproxi-

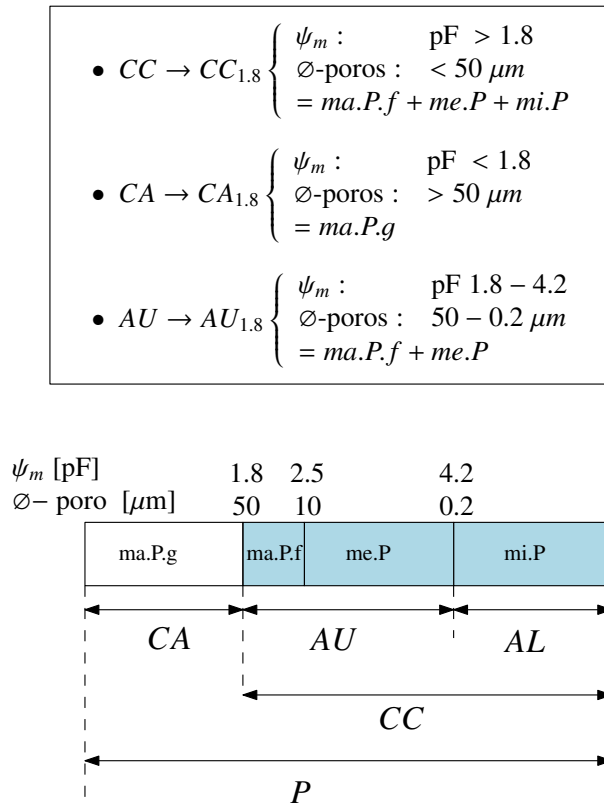


Figura 2.4: Definición de los límites de las fracciones de agua y poros, usadas en las claves de esta guía (*ma.P.g* = macroporos gruesos, *ma.P.f* = macroporos finos, *me.P* = mesoporos, *mi.P* = microporos)

2.3.1.1. Estimación de las fracciones de agua / poros

El volumen de las diferentes fracciones de agua del suelo se pueden estimar (p/ suelos minerales), en caso de que no existan valores medidos, en función de textura y densidad aparente, siendo el último parámetro un descriptor de la estructura (cuadro 2.7). Como la materia orgánica del suelo y la fracción de arcilla influyen marcadamente en el sistema poroso, al ser factores de la estructuración, se corrigen los valores de acuerdo con ellos (cuadro 2.8). Cabe aclarar, que con esta estimación se trata de aproximar la curva de retención de agua a través de los 3 puntos cardinales que limitan las clases de poros (ver fig. 2.3).

madamente pF 1.8. En función de ello, se pueden aplicar diferentes límites de potenciales para definir las fracciones de *CC*, *CA* y *AU* (fig. 2.4, pág. 24), algo que se discute actualmente en los ámbitos de evaluación de suelos. Una propuesta, de acuerdo con (Ad-hoc-AG Boden 2008; DIN 4220 2008), se presenta en el anexo.

Cuadro 2.7: Estimación de las fracciones de agua en función de clase textural (según *WRB* o *USDA*) y densidad aparente (*Dap*): porosidad total (*P*), capacidad de aire (*CA*), agua útil (*AU*), capacidad de campo (*CC*) y agua ligada (*AL*); valores en [% - vol]; (según Ad-hoc-AG Boden 2008, modificado p/ arena)

clase textural	Dap ^a	<i>P</i>				<i>CA</i>				<i>AU</i>				<i>CC</i>				<i>AL</i>			
		1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5
arenoso (A)		56	49	42	37	39	35	32	27	9	10	7	7	17	14	10	10	8	5	3	3
arenoso fino (A.f)		-	50	45	35	-	34	31	23	-	10	9	8	-	16	14	12	-	6	5	4
arenoso medio (A.m)		-	50	42	34	-	36	32	26	-	9	6	5	-	14	10	8	-	5	4	3
arenoso grueso (A.g)		-	50	41	35	-	38	33	29	-	8	5	4	-	12	8	6	-	4	3	2
arenoso francoso (AF)		57	49	43	36	23	24	21	15	19	19	17	17	33	25	22	22	14	6	5	5
franco arenoso (FA)		58	50	42	35	25	19	14	9	22	22	19	17	32	31	28	26	10	10	9	9
< 10 % arcilla (FA.l)		57	50	42	36	26	19	15	11	22	22	20	18	31	31	27	25	9	9	7	7
> 10 % arcilla (FA.ac)		59	50	42	35	25	18	14	8	22	21	17	15	34	32	29	26	12	11	12	11
franco limoso (FL)		58	50	43	38	16	11	7	4	26	23	22	20	42	38	36	34	16	15	14	14
< 12 % arcilla (FL.a)		57	49	43	38	14	11	8	4	31	25	24	23	44	38	36	34	13	13	11	11
> 12 % arcilla (FL.ac)		58	50	43	38	16	11	7	4	25	23	22	20	42	38	36	34	16	15	15	15
limoso (L)		54	49	43	37	12	8	6	2	31	29	26	25	42	41	37	35	11	12	11	10
franco (F)		59	50	43	36	20	14	10	6	23	20	18	15	39	36	33	30	15	17	15	15
franco arcillo arenoso (FAcA)		56	52	43	35	11	10	9	6	25	23	15	12	46	42	34	29	21	19	18	17
franco arcilloso (FAc)		58	50	43	37	10	9	7	4	22	15	13	11	48	41	37	33	26	25	24	22
franco arcillo limoso (FAcL)		61	50	43	38	13	9	6	3	21	17	14	11	48	41	38	34	27	24	24	24
arcillo arenoso (AcA)		57	52	43	36	7	6	4	4	21	18	11	8	50	46	39	32	29	28	28	24
arcillo limoso (AcL)		57	51	44	39	5	5	4	3	19	15	12	9	52	46	41	37	33	31	29	27
arcilloso (Ac)		58	50	45	39	5	4	3	4	20	14	12	12	53	46	42	35	32	32	30	23
< 60 % arcilla (Ac.f)		58	50	44	39	7	5	3	4	19	15	12	12	51	45	41	35	32	31	29	23
> 60 % arcilla (Ac.ac)		62	51	46	40	3	3	2	4	26	13	12	12	59	48	44	36	33	35	32	24

^aDap en 5 clases: 1 = muy baja (<1.2 g/cm³), 2 = baja (1.2 - 1.4 g/cm³), 3 = media (1.4 - 1.6 g/cm³), 4/5 = alta a muy alta (≥ 1.6 g/cm³)

Cuadro 2.8: Correcciones medias de porosidad total (*P*), capacidad de aire (*CA*), agua útil (*AU*) y capacidad de campo (*CC*) en función de textura, contenido de materia orgánica (humus) y de arcilla, para una clase de densidad aparente media (1.4 - 1.6 g/cm³); valores en [% - vol]; (según Ad-hoc-AG Boden 2008)

arcilla		<i>P</i>				<i>CA</i>				<i>AU</i>				<i>CC</i>			
textura	humus ^a	h2	h3	h4	h5	h2	h3	h4	h5	h2	h3	h4	h5	h2	h3	h4	h5
arenoso (A)		3	5	7	9	0	-1	-2	-3	1	3	4	5	3	6	9	12
arenoso francoso (AF)		3	6	9	11	0	0	-1	-2	2	3	4	6	3	6	10	13
franco arenoso (FA)		4	8	12	17	1	2	3	4	2	3	4	5	3	6	9	13
	< 10 % arcilla (FA.l)	4	7	12	17	2	3	4	6	1	2	3	4	2	4	8	11
	> 10 % arcilla (FA.ac)	4	9	14	18	1	2	3	4	2	4	5	7	3	7	11	14
franco limoso (FL)		5	9	15	21	2	4	6	8	2	3	4	5	3	5	9	13
	< 10 % arcilla (FL.a)	4	7	12	18	2	3	5	8	1	2	3	4	2	4	7	10
	> 10 % arcilla (FL.ac)	6	11	17	21	2	4	6	7	2	3	4	6	4	7	11	14
limoso (L)		4	7	13	20	2	3	5	9	1	2	3	4	2	4	8	11
franco (F)		4	8	14	18	1	2	3	4	1	3	5	8	3	6	11	14
franco arcillo arenoso (FAcA)		5	8	16	20	1	2	4	5	2	4	7	9	4	6	12	15
franco arcilloso (Fac)		6	9	18	21	1	2	5	6	3	5	8	10	5	7	13	15
franco arcillo limoso (FAcL)		8	11	16	20	2	3	4	6	2	5	8	10	6	8	12	14
arcillo arenoso (AcA)		7	9	16	19	2	3	4	5	2	5	7	9	5	6	12	14
arcillo limoso (AcL)		6	8	14	21	1	2	3	7	1	4	6	9	5	6	11	14
arcilloso (Ac)		6	8	13	19	1	2	3	7	2	4	6	8	5	6	10	12
	< 60 % arcilla (Ac.f)	6	8	14	20	1	2	3	7	2	4	6	8	5	6	11	13
	> 60 % arcilla (Ac)	6	8	13	19	1	2	4	8	2	4	5	7	5	6	9	11

^ah2 = 1 - 2 %, h3 = 2 - 4 %, h4 = 4 - 8 %, h5 = 8 - 15 %

2.3.1.2. Evaluación de las fracciones de agua / poros

Las diferentes fracciones de agua respectivamente de poros, como valor en proporción de volumen, se evalúan según cuadro 2.9.

Así, la porosidad total y la capacidad de aire son parámetros que se evalúan directamente como fracción volumétrica según este cuadro. A diferencia, en casi todos los métodos de evaluación del balance de agua (disponibilidad, capacidad de regulación, etc.), no se usan las fracciones, sino se calculan capacidades de almacenaje, expresadas en L/m².

Cuadro 2.9: Evaluación de las fracciones de agua, respectivamente poros. Todos los valores en % – vol (Ad-hoc-AG Boden 2005)

<i>P</i>	<i>CA</i> ≥ 50 μm	<i>CC</i> <50 μm	<i>AU</i> 50 - 0.2 μm	<i>AL</i> <0.2 μm	evaluación	
					verbal	numérica
<30	<2	<21	<6	<4	muy baja	1
30 - 38	2 - 5	21 - 30	6- 14	4 - 10	baja	2
38 - 46	5 - 13	30 - 39	14 - 22	10 - 22	regular	3
46 - 54	13 - 26	39 - 48	22 - 30	22 - 34	alta	4
≥ 54	≥ 26	≥ 48	≥ 30	≥ 34	muy alta	5

2.3.2. Infiltración y conducción de agua

La entrada de agua por la superficie del suelo, la infiltración, representa un proceso clave en el ciclo de agua, dado que determina la redistribución en la superficie. El agua que no puede infiltrar queda estancada en la superficie, causando problemas de aireación del suelo, o se elimina como escorrentía superficial, generando la falta de agua en el sitio, procesos de erosión y posibles inundaciones en otras partes del paisaje.

La capacidad de infiltración no es una constante, sino varía en función de la humedad edáfica inicial y el tiempo. Toma valores máximos en el comienzo del proceso, cuando el sistema poroso del suelo se encuentra parcialmente vacío, capaz de almacenar agua, y descende rápidamente en el tiempo, acercándose asintóticamente al valor de la conductividad hidráulica saturada (fig. 2.5). La conductividad hidráulica representa entonces la velocidad mínima de conducción de agua, ofreciéndose por ello, en el contexto de estimar riesgos ambientales, como un estimador conservador de la tasa de infiltración.

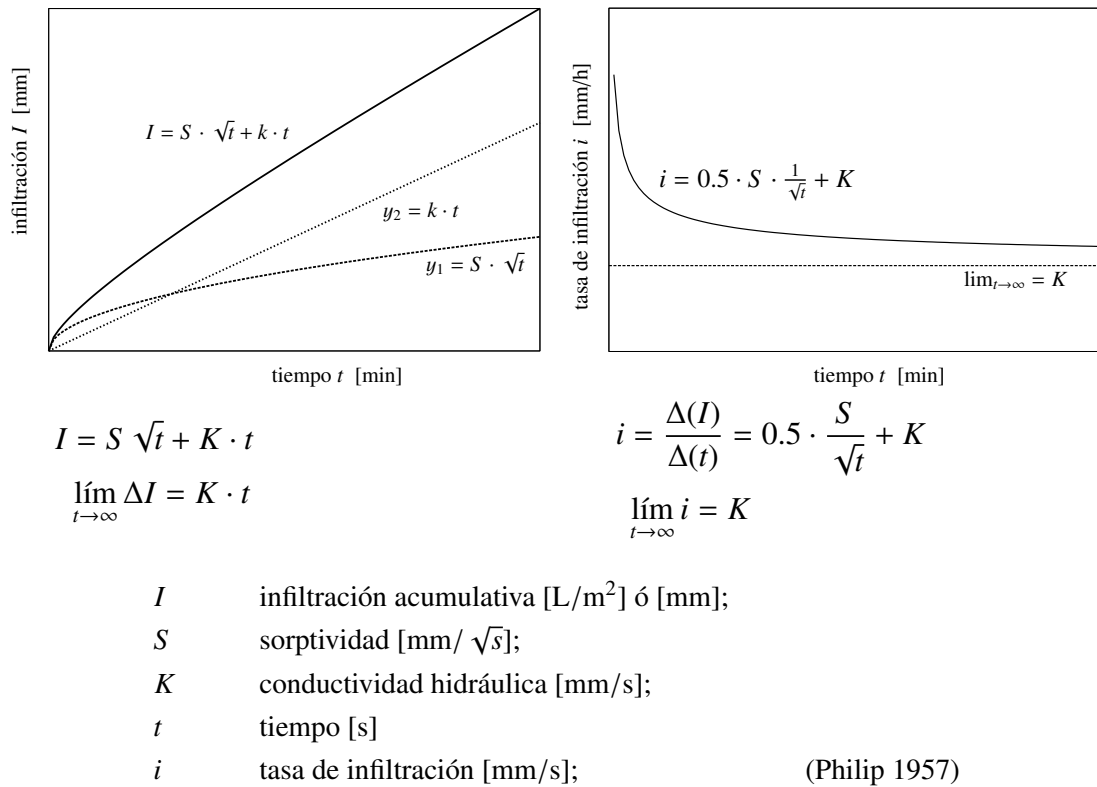


Figura 2.5: Infiltración acumulativa (izquierda) y tasa de infiltración (derecha) en función del tiempo, de acuerdo con el modelo de Philip (1957)

En consecuencia, tanto para el procesos de infiltración como para el de conducción de agua, se usa la conductividad hidráulica saturada (K_s) como parámetro descriptivo. Su estimación es posible a partir de parámetros secundarios de los datos descriptivos de los suelos, la densidad aparente y la textura, que a su vez definen el sistema poroso del suelo, responsable para los procesos de flujo.

2.3.2.1. Estimación y evaluación de la conductividad hidráulica del suelo

La conductividad hidráulica del suelo es un parámetro de mucha incidencia en el balance de agua y aire del suelo. Se requiere, en caso de que no existan valores medidos, una estimación de la misma. Al depender la conductividad hidráulica saturada también de las características del sistema poroso, se la estima, como en el caso de las fracciones de agua, en base a la clase textural y la densidad aparente (cuadros 2.10 y A.4, fig. 2.6) y se evalúa según cuadro 2.11.

Cuadro 2.10: Estimación de la conductividad hidráulica de suelos de acuerdo con la densidad aparente (Dap, ver cuadro 2.4) y textura, (según AG Boden 1996; Schlichting *et al.* 1995, adaptado); ver clases de conductividad en cuadro 2.11

Dap	clase textural ¹							
	grava, g.A, A,	f.A	AF.f, FA.l	A.f	AF.ac, FA	FA.ac	FL.ac	FL.a, FL.l, FAcA, AcA, FAc, Ac
m.baja - baja	6	5	4	5	5-4	5	4	5-4
regular	6	4	3	4	4-3	4-3	3	3
alta - m.alta	5	3	2	3-2	2	2-1	2-1	2-1

¹ definición de clases y subclases: g.A = Arenoso grueso, A = Arenoso, f.A = Arenoso fino, AF.l = Areno Francoso limoso, FA.l = Franco Arenoso limoso, AF.ac = Arenoso Francoso arcilloso, FA.ac = Franco Arenoso arcilloso, FL.a = Franco Limoso arenoso, FL.l = Franco Limoso limoso, FAcA = Franco Arcillo Arenoso, AcA = Arcillo Arenoso, FAc = Franco Arcilloso, Ac = Arcilloso;

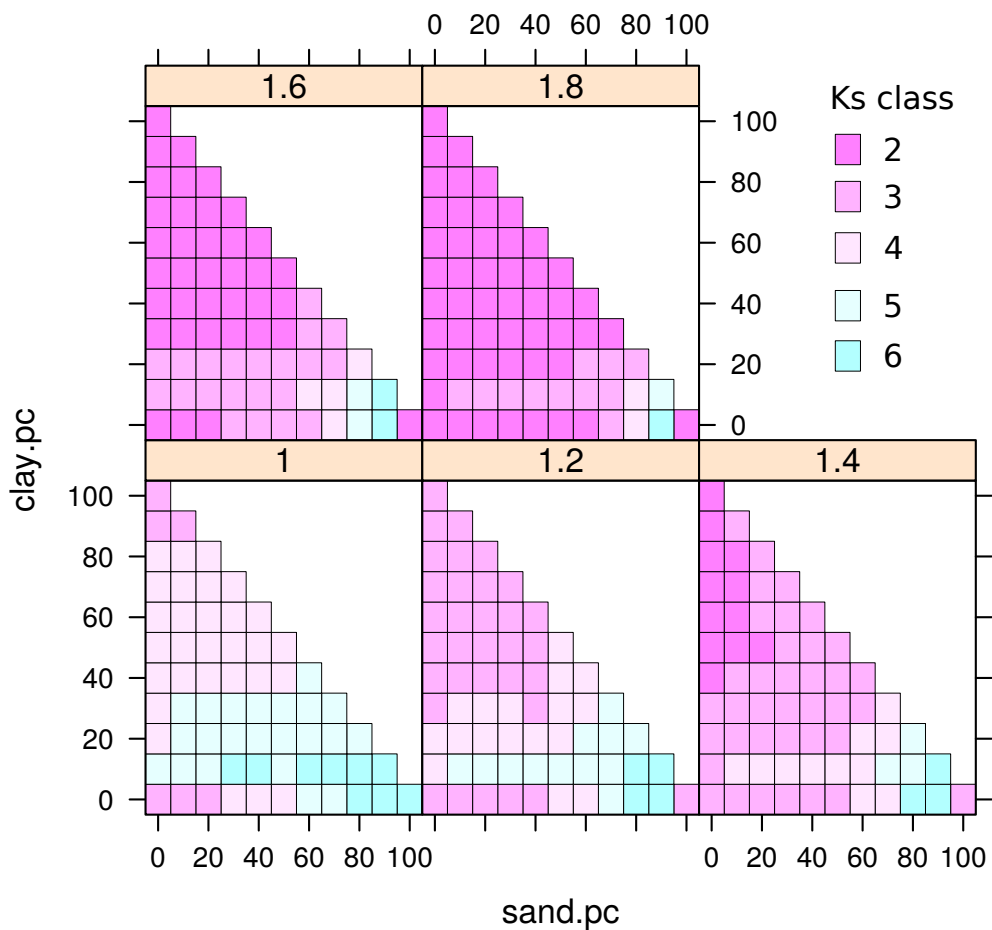


Figura 2.6: Estimación de la clase de conductividad hidráulica (K_s) en función de textura y densidad aparente (valor en el título de cada gráfico). Según valores calculados con del software Rosetta (Schaap *et al.* 2001)

	K_s		evaluación	
	[mm/h]	[cm/d]	verbal	numérica
Cuadro 2.11: Evaluación de la conductividad hidráulica de suelos, (según Ad-hoc-AG Boden 2005)	≤ 0.42	≤ 1	muy baja	1
	0.42 - 4.2	1 - 10	baja	2
	4.2 - 17	10 - 40	regular	3
	17 - 42	40 - 100	alta	4
	42 - 125	100 - 300	muy alta	5
	> 125	> 300	extrem. alta	6

2.3.3. Profundidad de la capa freática

Respecto a la cercanía de la capa freática, se presenta aquí la clave usada en el Atlas Ambiental de Berlín (cuadro 2.12), con la idea de ser aplicada en aspectos de la función de filtro.

	profundidad de capa freática	evaluación	
	[m]	verbal	numérica
Cuadro 2.12: Clases de profundidad de la capa freática (según Gerstenberg 2013)	< 0.5	muy baja	1
	0.5 - 2	baja	2
	2 - 5	regular	3
	5 - 15	alta	4
	≥ 15	muy alta	5

Cabe aclarar, que en los manuales de descripción de suelos, se describe la presencia de una capa freática alta (cuadro 2.13), en una profundidad de 0 a 200 cm, discriminando entre 5 a 7 clases (Ad-hoc-AG Boden 2005; FAO 2009; Soil Survey Division Staff 1993).

	profundidad de capa freática	evaluación	
	[cm]	verbal	numérica
Cuadro 2.13: Clases de profundidad de la capa freática, usadas en las guías de descripción de suelos (FAO 2009; Soil Survey Division Staff 1993)	< 25	muy baja	1
	25 - 50	baja	2
	50 - 100	regular	3
	100 - 150	alta	4
	≥ 150	muy alta	5

2.3.4. Frecuencia de recambio del agua del suelo

Una característica que se usa tanto para la capacidad de regulación del balance de agua como para la función de filtro, es la frecuencia con la cual se renueva el agua retenida en

el suelo, en función del clima (Gerstenberg 2013; Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014).

El parámetro es aplicable únicamente para climas húmedos y se calcula en base al balance hídrico climático y la capacidad de agua útil en el suelo. En caso de que existan mejores aproximaciones del balance hídrico total, a través de mediciones o modelos de simulación, en lugar del balance hídrico climático se usa el valor aproximado del drenaje en profundidad.

$$FRA_s = \frac{BHC}{AU_{1m}} \quad \text{para } BHC > 0$$
$$BHC = P - ET_p$$

FRA_s	frecuencia de recambio del agua del suelo [1/a]
BHC	balance hídrico climático [mm/a]
AU_{1m}	capacidad de agua útil en el suelo, calculada para 1 m de profundidad [mm]
P	precipitación [mm/a];
ET_p	evapotranspiración potencial [mm/a];

La FRA_s permite circunscribir entonces la capacidad del suelo de atenuar el drenaje en profundidad. En caso de que los valores de AU del subsuelo sean similares, se puede aproximar el avance anual del agua en profundidad o el tiempo que el agua requiere en llegar desde la superficie hasta la capa freática. Es una medida del tiempo de permanencia del agua en el suelo (valor inverso), que es un criterio importante para todos los procesos de filtración en el suelo.

Respecto a la escala de evaluación de la FRA_s , no hay una gradación fija; en el Atlas Ambiental de Berlín (Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014), p.ej., se la ajustó de acuerdo con el rango de valores encontrados en el área de estudio.

2.4. Características químicas y físico-químicas de suelos

2.4.1. pH del suelo

El pH del suelo es un parámetro clave, dado que incide en muchos diferentes procesos de importancia pedogenética y ecológica (fig. 2.7). Respecto al balance de elementos, influye en la movilización, disponibilidad y toxicidad de elementos, por lo cual se requiere la consideración de este parámetro. Los rangos de pH de suelos se desprenden en cuadro 2.14, mientras que la evaluación respecto a las funciones biológicas se presentan recién en cuadro 3.14, pág. 62.

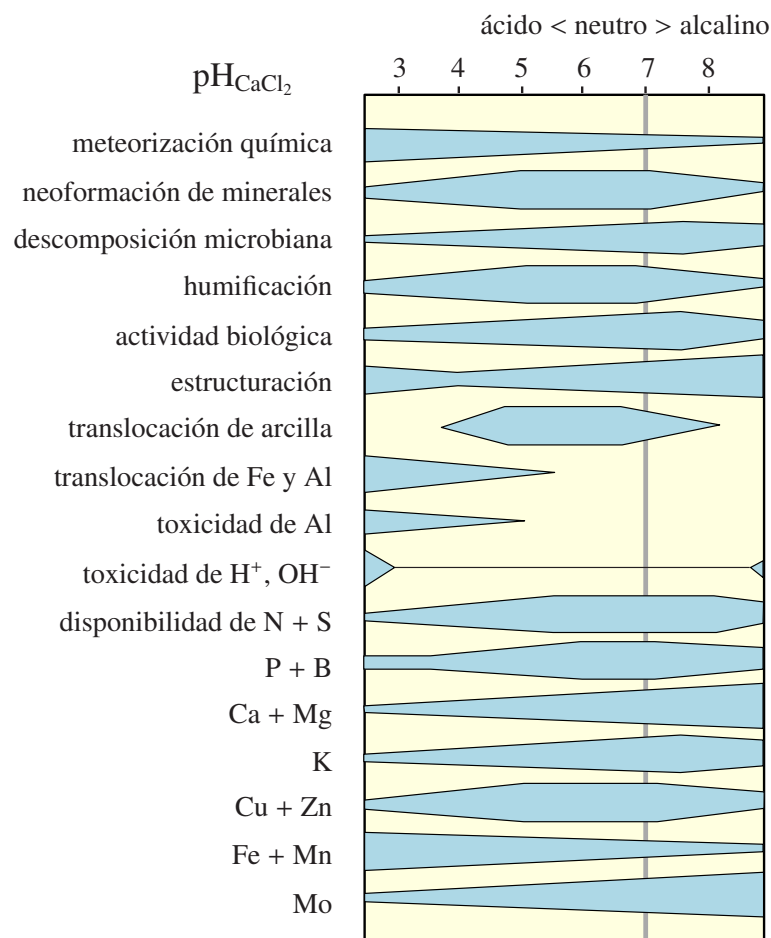


Figura 2.7: Importancia ecológica del pH del suelo (Schroeder 1992)

	$\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$		
	rango de pH	designación	clase
	≥ 10.7	extremadamente básico	b6
	10.0 - <10.7	muy fuertemente básico	b5
	9.3 - <10.0	fuertemente básico	b4
	8.6 - <9.3	básico	b3
	7.9 - <8.6	ligeramente básico	b2
	7.2 - <7.9	muy ligeramente básico	b1
	6.8 - <7.2	neutro	a0
	6.1 - <6.8	muy ligeramente ácido	a1
	5.4 - <6.1	ligeramente ácido	a2
	4.7 - <5.4	ácido	a3
	4.0 - <4.7	fuertemente ácido	a4
	3.3 - <4.0	muy fuertemente ácido	a5
	< 3.3	extremadamente ácido	a6

Cuadro 2.14: Rangos de pH (en CaCl_2) de suelos (Ad-hoc-AG Boden 2005)

2.4.2. Materia orgánica del suelo

La *materia orgánica del suelo (MOS)*, o *humus*², es otro parámetro que incide en características biológicas, físicas y químicas del suelo. Junto con el componente mineral conforma la fase sólida del suelo. En muchas evaluaciones, se incorpora la *MOS*, de forma directa o indirecta.

Todos los valores referidos a materia orgánica del suelo se relacionan directamente con el carbono orgánico (C_{org} , en [%]) del mismo, dado que la proporción de carbono en la materia orgánica promedia un 54 %. En base a ello, se establece la siguiente relación:

$$MOS = C_{org} \times 1.724 \quad (2.10)$$

2.4.2.1. Concentración de materia orgánica en horizontes del suelo

El contenido de materia orgánica del suelo en horizontes A se puede estimar según el tono gris en el color (valor del color Munsell), según cuadro 2.15:

Cuadro 2.15: Estimación del contenido de materia orgánica (concentración en % de masa), basada en el color del suelo de la tabla Munsell (tono gris = valor), diferenciada según la clase textural (adaptado de Schlichting *et al.* (1995), en FAO (2009))

color (tono gris)	valor ^a Munsell	suelo húmedo			suelo seco		
		A ^b	FA, AF, F	FL, L, FAcL, FAc, FAcA, AcA, AcL, Ac	A	FA, AF, F	FL, L, FAcL, FAc, FAcA, AcA, AcL, Ac
		MOS [%]			MOS [%]		
gris claro	7				<0.3	<0.5	<0.6
gris claro	6.5				0.3-0.6	0.5-0.8	0.6-1.2
gris	6				0.6-1	0.8-1.2	1.2-2
gris	5.5			<0.3	1-1.5	1.2-2	2-3
gris	5	<0.3	<0.4	0.3-0.6	1.5-2	2-4	3-4
gris oscuro	4.5	0.3-0.6	0.4-0.6	0.6-0.9	2-3	4-6	4-6
gris oscuro	4	0.6-0.9	0.6-1	0.9-1.5	3-5	6-9	6-9
gris negro	3.5	0.9-1.5	1-2	1.5-3	5-8	9-15	9-15
gris negro	3	1.5-3	2-4	3-5	8-12	>15	>15
negro	2.5	3-6	>4	>5	>12		
negro	2	>6					

^asi croma es de 3.5 a 6, aumentar valor por 0.5; si croma >6, aumentar valor por 1.0

^bclases texturales

²de acuerdo con la escuela europea, "*materia orgánica del suelo*" y "*humus*" se toman como sinónimos en este texto

Cuadro 2.16: Evaluación del contenido de materia orgánica del suelo (<i>MOS</i> , humus) Ad-hoc-AG Boden (2005)	<i>MOS</i> [%]	evaluación	símbolo
	0	libre de humus	h0
	<1	muy escasamente humoso	h1
	1 - 2	escasamente humoso	h2
	2 - 4	humoso	h3
	4 - 8	fuertemente humoso	h4
	8 - 15	muy fuertemente humoso	h5
	15 - 30	extremadamente humoso (<i>anmoor</i> , suelos semiterrestres)	h6
≥ 30	turba	h7	

2.4.2.2. Reservas de materia orgánica en el suelo

La cantidad de materia orgánica del suelo (*MOS*) se calcula por unidad de área hasta la profundidad a considerar (límite de enraizamiento, 1m, *solum*):

$$MOS.cant = MOS.conc \times Dap \times \frac{(100 - vol.piedras)}{100} \times \frac{vol.horiz}{A}$$

$$\sum_{i=1}^n (MOS.cant)_i \quad \text{reserva de } MOS$$

- MOS.cant* cantidad de materia orgánica del suelo [g/m²];
- MOS.conc* concentración de masa de materia orgánica del suelo [g/kg];
- Dap* densidad aparente [kg/dm³];
- vol.piedras* volumen de piedras [% - vol];
- $\frac{vol.horiz}{A}$ volumen de horizonte por unidad de área *A* [dm³/m²];
- i ... n* horizontes *i* a *n* del suelo

Las reservas totales de *MOS* en el suelo, hasta una profundidad de referencia de 1 metro, se pueden evaluar según cuadro 2.17. Cabe aclarar, que esta clave se centra más bien en el rol del suelo como sumidero de carbono y no en la función de la *MOS* para la nutrición.

Cuadro 2.17: Evaluación de las reservas de materia orgánica del suelo (<i>MOS</i>). Profundidad de referencia 1 m (Gerstenberg 2013)	<i>MOS</i> [kg/m ²]	evaluación	
		verbal	numérica
	< 5	muy baja	1
	5 - 10	baja	2
	10 - 20	regular	3
	20 - 100	alta	4
100 - 2000	muy alta	5	

2.4.2.3. Potencial de mineralización de carbono (respiración edáfica)

La respiración edáfica es un parámetro que integra sobre la actividad microbiana y la calidad del sustrato. En primer lugar, puede ser usada para evaluar la función biológica, enfocando aspectos de nutrición vegetal (movilización de nutrientes) o del suelo como hábitat de organismos (sustrato como fuente de C y energía). En segundo lugar, puede ser también un parámetro de evaluación de la función de filtro, porque da un valor guía de la capacidad de transformar sustancias biodegradables.

La evaluación de la respiración edáfica (cuadro 2.18) se refiere a resultados de ensayos de incubación en el laboratorio (ver Lorenz 2005; Schinner 1996), bajo condiciones óptimas de temperatura y humedad (25 °C, 60 % de humedad máxima), de corta duración (24 a 72 horas). Medida en estas condiciones, la respiración edáfica se designa también como potencial de mineralización de carbono.

<i>t.C_{min}</i> [mg CO ₂ – C · kg ⁻¹ · d ⁻¹]		evaluación	
suelo seco	suelo fresco	verbal	numérica
<25	<12	muy baja	1
25 - 125	12 - 20	baja	2
125 - 250	20 - 40	regular	3
250 - 500	40 - 80	alta	4
≥ 500	≥ 80	muy alta	5

Cuadro 2.18: Evaluación de la tasa de respiración edáfica (*t.C_{min}*), medida en ensayos de incubación en laboratorio, bajo condiciones estandarizadas (2 escalas, para uso de suelo previamente seco (Schlichting *et al.* 1995) y para uso de suelo fresco (United States Department of Agriculture 2001; Woods End Research 1997))

2.4.3. Complejo adsorbente

El complejo adsorbente del suelo está conformado por los llamados coloides del mismo, que se caracterizan por una gran superficie específica y una carga eléctrica en la superficie. Estas propiedades le proporcionan la capacidad de adsorber sustancias neutras e iones en su superficie, interactuando de esta manera en el balance de muchos elementos. De acuerdo con los iones o sustancias involucrados en el proceso, el complejo adsorbente posee su importancia para:

la función biológica: ...

- al retener cationes (nutrientes) adsorbidos e intercambiables, de forma disponible para las plantas;
- al regular, como sistema buffer, la acidez del suelo;
- al retener metales pesados o sustancias xenobióticas de forma no biodisponible, protegiendo los organismos contra efectos tóxicos;

la función de filtro: ...

- al adsorber iones con efecto tóxico (metales pesados, ...) y sustancias xenobióticas, evitando el pasaje a la cadena trófica u otros compartimentos, como agua y aire;
- al regular, como sistema buffer, procesos de acidificación o alcalinización del suelo;

Dentro de los coloides dominan aquellos con carga negativa (sustancias húmicas, minerales de arcilla), por lo cual la mayoría de los parámetros se refiere a la adsorción de cationes. Los cationes adsorbidos pueden ser intercambiados por cantidades equivalentes de otros cationes, de acuerdo con el tipo y la concentración de iones en la solución del suelo y en el adsorbente.

El intercambio de cationes se caracteriza por un aspecto cuantitativo, relacionado con la capacidad de carga y la superficie activa para los procesos de adsorción, y un aspecto cualitativo, que se refiere a la composición catiónica de los cationes adsorbidos.

$$\text{complejo adsorbente} \left\{ \begin{array}{l} \text{aspecto cuantitativo} \quad \Leftarrow \quad CIC, CIC_{ef}, SE \\ \text{aspecto cualitativo} \quad \Leftarrow \quad S, SB, H, PSI \end{array} \right.$$

<i>CIC</i>	capacidad de intercambio catiónico [cmol_c/kg] ^a ;
<i>CIC_{ef}</i>	<i>CIC</i> efectiva (al pH real del suelo) [cmol_c/kg];
<i>SE</i>	superficie específica [m^2/g];
<i>S</i>	valor S (suma de cationes básicos intercambiables) [cmol_c/kg];
<i>SB</i>	saturación de bases [%];
<i>H</i>	valor H (suma de cationes ácidos intercambiables) [cmol_c/kg];
<i>PSI</i>	porcentaje de sodio intercambiable [%];

^a cmol_c → subíndice c de carga

2.4.3.1. Capacidad de intercambio de cationes

La capacidad de intercambio catiónico del suelo es determinada por la cantidad y calidad de los materiales coloidales del suelo, es decir, los minerales de arcilla y la materia orgánica. Ambos componentes se destacan por su gran superficie específica, calidad que favorece la adsorción de sustancias en general, y una carga negativa, que provoca específicamente la atracción de cationes.

Se designa como capacidad de intercambio catiónico potencial como aquella que se mide en un medio neutro a alcalino (condición estandarizada en el método analítico), mientras que la capacidad determinada en el pH real del suelo se llama capacidad de intercambio catiónico efectiva (ver abajo). Si no específicamente aclarado, cuando se habla de capacidad de intercambio catiónico, se refiere al valor potencial.

$$CIC = f \left\{ \begin{array}{l} \text{minerales de arcilla: tipo, proporción} \\ \text{humus: forma, proporción} \end{array} \right.$$

La *CIC* atribuida por la fase mineral se permite estimar a través de la clase textural y la mineralogía (cuadro 2.19). En caso de que no existan datos analíticos del último parámetro, se pueden deducir los minerales de arcilla predominantes en base a la roca madre y la evolución del suelo.

La materia orgánica posee valores máximos de *CIC*, que oscilan entre 200 a 300 cmol_c/kg . Para fines de estimación, se usa un valor de 200 cmol_c/kg , de tal manera, por cada 1 % de humus, la *CIC* aumenta por 2 cmol_c/kg .

Cuadro 2.19: Capacidad de intercambio catiónico, superficie específica y densidad de carga de intercambiadores del suelo (según Scheffer y Schachtschabel 1989)

intercambiador	superficie específica [m^2/g]	capacidad de intercambio catiónico [$\mu\text{mol}_c/\text{g}$]	densidad de carga media [$\mu\text{mol}_c/\text{m}^2$]
caolinita y haloisita	10 - 150	30 - 150	2.0
illita	50 - 200	200 - 500	3.0
vermiculita	600 - 700	1500 - 2000	2.5
esmeclita	600 - 800	700 - 1300	1.4
clorita	-	100 - 400	-
alofano e imogolita	700 - 1100	100 - 500	0.3
sustancias húmicas	800 - 1000	1800 - 3000	-
goetita y hematita	50 - 150	-	-
ferrihidrita	300 - 500	-	-

La *CIC* potencial total del suelo se calcula/estima según :

$$CIC_{pot} = CIC_{p.arc} \times arc.frac + CIC_{p.mos} \times MOS.frac$$

- CIC_{pot} *CIC* potencial del suelo [mmol_c/kg];
- $CIC_{p.arc}$ *CIC* potencial de los minerales de arcilla [mmol_c/kg];
- $arc.frac$ arcilla, fracción de masa [g/g];
- $CIC_{p.mos}$ *CIC* potencial de la materia orgánica del suelo [mmol_c/kg];
- $MOS.frac$ materia orgánica, fracción de masa [g/g];

Los valores de *CIC*, ya sean obtenidos por análisis o estimados, se evalúan de acuerdo con cuadro 2.20.

	CIC_{pot} [cmol ₊ /kg]	evaluación	
		verbal	numérica
Cuadro 2.20: Evaluación de la capacidad de intercambio catiónico potencial (CIC_{pot}), para cada horizonte (Ad-hoc-AG Boden 2005)	< 4	muy baja	1
	4 - 8	baja	2
	8 - 12	regular	3
	12 - 20	alta	4
	20 - 30	muy alta	5
	≥ 30	extr. alta	6

2.4.3.2. Capacidad efectiva de intercambio de cationes

La capacidad efectiva de intercambio de cationes (CIC_{ef}) del suelo es la capacidad de intercambio que posee en el pH real del mismo. Es igual o inferior a la capacidad potencial de intercambio catiónico.

Para el componente mineral, la capacidad efectiva coincide prácticamente con la potencial (salvo para alofanos). A diferencia, la CIC_{ef} del humus merma marcadamente con la acidez, por lo que se aplica un factor de corrección, en función del pH (cuadro 2.21).

	pH _{CaCl₂}	factor de corrección
Cuadro 2.21: Factores de corrección, en función del pH, para calcular la capacidad de intercambio efectiva CIC_{ef} , a partir de la capacidad de intercambio catiónico potencial (CIC_{pot}) (Ad-hoc-AG Boden 2005)	≥ 7.5	1.0
	7.5 - 6.5	0.8
	6.5 - 5.5	0.6
	5.5 - 4.5	0.4
	4.5 - 3.5	0.25
	< 3.5	0.15

La capacidad de intercambio catiónico efectiva, cuantificada para el espacio de enraizamiento (ó 1 m de profundidad), en mol_c/m², se evalúa según cuadro 2.22.

	CIC_{ef} [mol _c /m ²]	evaluación	
		verbal	numérica
Cuadro 2.22: Evaluación de la capacidad de intercambio catiónica efectiva (CIC_{ef}), cuantificada para el espacio de enraizamiento (ó 1 m de profundidad) (Lehmann <i>et al.</i> 2013)	≤ 25	muy baja	1
	25 - 50	baja	2
	50 - 100	regular	3
	100 - 200	alta	4
	> 200	muy alta	5

3

Evaluación de las funciones biológicas: base de vida y hábitat para humanos, animales, plantas y organismos del suelo

Si bien la conceptualización del rol del suelo como espacio de vida es abarcadora, metodológicamente no se cubren todavía todos los aspectos parciales. Históricamente, la evaluación del suelo respecto a la vegetación respectivamente a la producción biológica ha sido el enfoque más importante, por lo que existe un gran número de métodos que atienden esta función. En el otro extremo, respecto a la flora y fauna del suelo, hay todavía pocas propuestas, encontrándose en desarrollo (ver en Ad-hoc-AG Boden 2007).

En este capítulo se presentan criterios, parámetros y métodos para evaluar las siguientes funciones individuales de los suelos como

- ... base de vida del humano;
- ... base de vida y factor de sitio de la vegetación, incluyendo la función de producción biológica;
- ... base / hábitat de la vegetación natural;

3.1. Los suelos como base y hábitat de la vida humana

Hasta el momento de esta edición, hay pocos métodos disponibles que traten de evaluar este aspecto. Se describe aquí el método propuesto por TUSEC (Lehmann *et al.* 2013).

La función de espacio de vida para humanos se iguala, en este momento, con el criterio de que el suelo no represente ningún riesgo de salud. Este riesgo se refiere a contaminantes del suelo, que significan una amenaza directa o indirecta para la salud humana. Bajo este criterio, el suelo se evalúa según el grado de la contaminación, a partir de fuentes difusas o puntuales.

En el procedimiento de evaluación, se indaga sobre la presencia / indicios de contaminación, siendo supeditada la apreciación de la gravedad de la contaminación de acuerdo con los marcos legales nacionales o internacionales existentes. Se distinguen

- a) **contaminación a partir de fuentes difusas**, refiriéndose a procesos o actividades que generan inmisiones en vastas superficies, (de más de 1 km², compenetrando hasta 1 m en el suelo); y
- b) **contaminación a partir de fuentes puntuales**, detectada mediante ambientes o artefactos contaminados o la existencia de actividades de producción o de aplicación de sustancias peligrosas, con el riesgo de ingresar al suelo.

A continuación, se presenta la clave de evaluación, de acuerdo con Lehmann *et al.* (2013):

Cuadro 3.1: Evaluación del suelo como base de vida para la actividad humana - método TUSEC (Lehmann *et al.* 2013)

paso A	
clasificación de la contaminación, basada en evidencia específica	evaluación
sin evidencia de contaminación a partir de fuentes difusas o puntuales y sin necesidad de otros estudios, de acuerdo con la legislación pertinente	5
con evidencia de contaminación a partir de fuentes difusas, de una sola fuente, pero sin evidencia de contaminación de fuentes puntuales y sin necesidad de otros estudios, de acuerdo con la legislación pertinente	4
con evidencia de contaminación a partir de fuentes difusas, de más de una fuente, pero sin evidencia de contaminación de fuentes puntuales y sin necesidad de otros estudios, de acuerdo con la legislación pertinente	3
con evidencia de contaminación a partir de fuentes puntuales y si hay datos analíticos disponibles y si se requiere de más estudios de acuerdo con la legislación pertinente seguir con paso B , sino con esta clave	
con evidencia de contaminación a partir de fuentes puntuales	1
paso B	
clasificación de la contaminación basada en datos analíticos	evaluación
con evidencia de contaminación, pero que no requiere de intervención o remediación, de acuerdo con la legislación pertinente	2
con evidencia de contaminación, requiriendo de intervención o remediación, de acuerdo con la legislación pertinente	1

3.1.1. Apreciaciones sobre la calidad del suelo como base de la vida humana, desde la clasificación de suelos *WRB*

Uno de los principios de la Base Referencial del Recurso Suelo es de aplicar una clasificación y nomenclatura de suelos que permita su evaluación y gestión respecto a un ordenamiento territorial que considere tanto la producción de recursos como la calidad del ambiente.

Así, con la introducción de la clase de suelos *Technosols*, conjuntamente con los ya existentes *Anthrosols*, incluso ya en el principio de la clave de clasificación, se da mucha énfasis en identificar suelos que poseen una clara incidencia del humano:

“La segunda diferencia principal en la *WRB* es reconocer la actividad humana como un factor formador de suelos, de ahí la posición de los Antrosoles y Tecnoles después de los Histroles, también parece lógico que sigan los recientemente introducidos Tecnoles cerca del principio de la Clave, por las siguientes razones:

- se puede separar suelos que no deberían tocarse (suelos tóxicos que deberían ser manipulados por expertos);
- se obtiene un grupo homogéneo de suelos en materiales extraños;
- los políticos y tomadores de decisiones que consulten la Clave van a encontrar inmediatamente estos suelos problemáticos.” (IUSS Grupo de Trabajo *WRB* 2007)

Basado en ello, cuando se discriminan *Technosols* en un mapa de suelos o un reconocimiento particular, hay que prestar atención en cuanto a la aptitud del suelo en relación al humano.

3.2. Los suelos como base de vida y factor de sitio de la vegetación

La función biológica del suelo como factor de sitio de la vegetación puede ser considerada como la más antigua, ya que el humano siempre la ha considerado, directa o indirectamente, en su relación con el medio. Esta historia también es una causa del gran número de criterios y métodos que existen para la valoración de esta función.

La evaluación parte de los requerimientos que tiene la vegetación respecto al suelo, que se toman como criterios o subfunciones (fig. 3.1). Para cada uno de ellos existe a su vez un gran número de parámetros edáficos y ambientales que se puedan usar para su evaluación. En el siguiente texto, se procede en ofrecer diversos parámetros para cada uno de los criterios, base para desarrollar después una metodología que combina los diferentes aspectos.

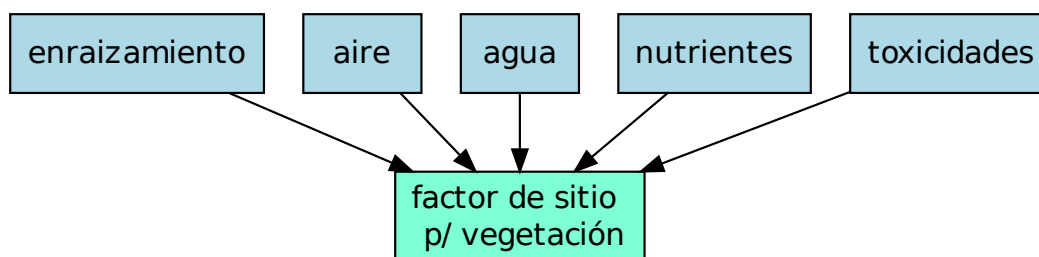


Figura 3.1: Función biológica de factor de sitio de la vegetación y criterios de evaluación

A diferencia a otras propuestas (Ad-hoc-AG Boden 2007; Lehmann *et al.* 2013), que presentan diferentes métodos para ambientes naturales por un lado y para la función de producción biológica por el otro, aquí se parte con una sola metodología, ofreciendo, según los resultados parciales, bifurcaciones para separar los ambientes extremos o raros por un lado del resto de los sitios (ver fig. 3.2). Este enfoque metodológico incluye entonces tanto vegetación natural (ambientes naturales) como cultivos y forestaciones (ambientes de producción agropecuaria y forestal), tratando de diferenciar específicamente los llamados sitios o ambientes extremos, a partir de los mismos resultados de la evaluación. De esta manera, se incluyen también los criterios presentados en apartado 3.3, donde se ve la función de sitio para la vegetación natural como propia línea metodológica.

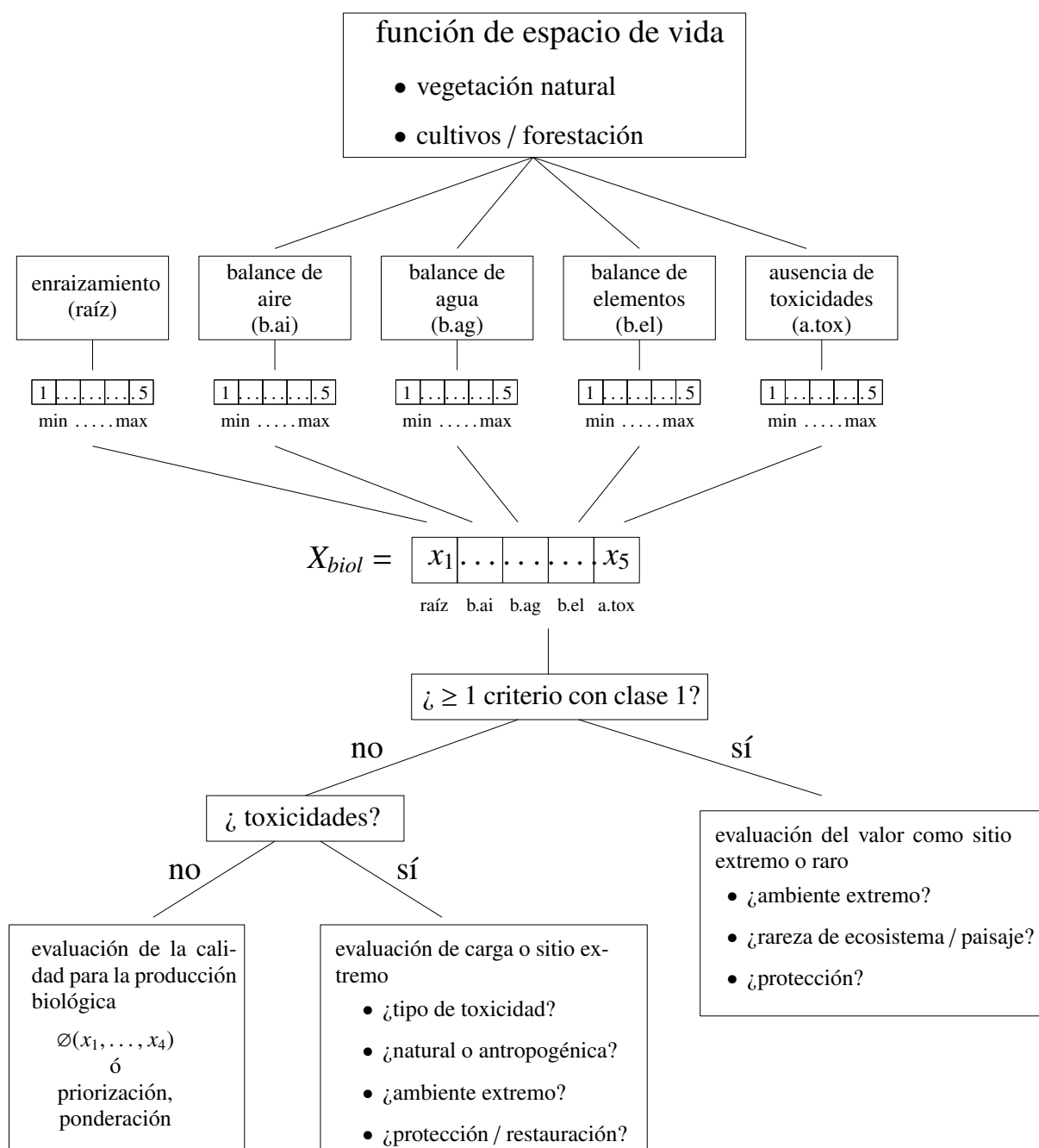


Figura 3.2: Propuesta de una evaluación diferencial de la función de espacio de vida (o factor de sitio) para vegetación natural, cultivos y forestación

Tanto los registros de la descripción de suelo y ambiente *in situ*, como una gran parte de los resultados de la evaluación ecológica, se pueden colocar en forma sintética en una ficha edáfica correspondiente (fig. A.2, anexo pág. 96).

3.2.1. Espacio de enraizamiento

Para la evaluación de la calidad de sitio del suelo, hay que definir primero la profundidad y las condiciones de enraizamiento, porque todas las estimaciones respecto a la disponibilidad de agua, aire y nutrientes se refieren al espacio radicular explorado por la vegetación.

3.2.1.1. Profundidad límite de enraizamiento

Se entiende por límite de enraizamiento la profundidad hasta donde se pueden desarrollar las raíces en función de las condiciones mecánicas y fisiológicas del suelo.

Como limitaciones mecánicas se denominan:

- roca maciza o pedregosidad alta (>70 %);
- capas endurecidas de carbonatos u otras sustancias;
- condiciones desfavorables de agregación;

La profundidad fisiológica de enraizamiento describe hasta dónde las raíces pueden penetrar el suelo efectivamente, considerando criterios fisiológicos, como:

- un cambio abrupto en las propiedades químicas, como pH, contenido de carbonatos, contenido de nutrientes, . . . ;
- condiciones reductoras;
- horizonte con escasa capacidad de aire o agua;

La profundidad límite de enraizamiento se define finalmente por el límite fisiológico, al ser de igual o menor profundidad que el mecánico, y se evalúa de acuerdo con cuadro 3.2 o 3.3 (según contexto, tipo de vegetación, etc.).

	profundidad	evaluación	
	[cm]	verbal	numérica
	0	nula	0
	<15	muy somera	1
	15 - 30	somera	2
	30 - 70	regular	3
	70 - 120	profunda	4
	120 - 200	muy profunda	5
	≥ 200	extr. profunda	6

Cuadro 3.2: Evaluación de la profundidad fisiológica de enraizamiento (Ad-hoc-AG Boden 2005)

	profundidad	evaluación	
	[cm]	verbal	numérica
	≤ 30	muy baja	1
	30 -50	baja	2
	50 - 75	regular	3
	75 - 100	alta	4
	> 100	muy alta	5

Cuadro 3.3: Evaluación de la profundidad fisiológica de enraizamiento, según TUSEC (Lehmann *et al.* 2013)

3.2.1.2. Arraigabilidad

La arraigabilidad describe la posibilidad de las raíces vegetales de desenvolverse en el volumen potencial de enraizamiento. La arraigabilidad puede ser restringida por alta pedregosidad, densidad aparente alta, escasa proporción de macroporos y propiedades desfavorables de estructuración. De tal manera, estructura laminar, prismática y bloques angulares gruesos influyen negativamente en la arraigabilidad. En cambio, horizontes blandos, de estructura migajosa y libres de piedras son bien arraigables.

La evaluación se realiza según cuadro 3.4, generalmente tomando el resultado para fundamentar y diferenciar la definición del espacio de enraizamiento (ver arriba).

Cuadro 3.4: Evaluación de la arraigabilidad (Jahn 1992)

evaluación ¹		restricciones
numérica	verbal	
5	muy buena	sin restricciones, densidad aparente baja
4	buena	pedregosidad escasa y densidad aparente moderada
3	regular	estructura desfavorable (prismática, bloques angulares gruesos) o pedregosidad intermedia, densidad aparente alta
2	escasa	múltiples o fuertes limitaciones
1	nula	limita la profundidad de enraizamiento

¹ evaluación cualitativa para cada horizonte

3.2.1.3. Nomenclatura taxonómica relacionada con las condiciones de enraizamiento

Algunos nombres de suelos y un gran número de adjetivos usados en la clasificación de suelos (IUSS Grupo de Trabajo WRB 2007; IUSS Working Group WRB 2014), nos permiten deducir restricciones en el espacio de enraizamiento:

impedimentos mecánicos: se desprenden para los grupos de suelos *Leptosols* (→ suelos someros debido a roca maciza cerca de la superficie) y *Vertisols* (→ suelos de alto contenido de arcilla expandible, con una dinámica estructural que produce ruptura de raíces), y para suelos con los adjetivos, p.ej. esquelético, vértico (ver Vertisol), pétrico (→ capa endurecida), petricálcico, lítico, gélico (→ presencia de hielo), léptico (→ somero debido a roca subyacente) ...;

impedimentos fisiológicos: indican adjetivos como sódico, sálico (→ elevada proporción de sodio intercambiable, alto tenor de sales), tóxico (→ problemas de toxicidad por iones diferentes a Al, Fe, Na, Ca, Mg), alúmico (→ alta proporción de Al en complejo adsorbente), reductivo (→ medio reductor, en suelos antropogénicos), stágnico (→ agua estancada), ...;

3.2.2. Balance de aire

Balance de agua y aire del suelo se encuentran estrechamente relacionados entre sí, debido a que agua y aire comparten el espacio poroso del suelo.

Una buena aireación del suelo es importante para permitir la actividad biológica (aeróbica) del suelo, es decir de raíces vegetales, microorganismos y la fauna del suelo. El balance de aire depende por un lado del volumen poros llenos de aire y por otro lado de las condiciones de transporte de aire (principalmente difusión).

Con fines de evaluar la aireación, se valora la llamada capacidad de aire (CA), correspondiente al volumen de poros con un diámetro $>50 \mu\text{m}$ (macroporos gruesos), es decir poros de un drenaje rápido. Este volumen se establece en la situación de equilibrio de drenaje (capacidad de campo, ver arriba), representando el volumen mínimo promedio de aire en suelos bien drenados.

Los valores de CA , si no se encuentran disponibles como datos analíticos, se estiman en base a clase textural y densidad aparente, según presentado en sección 2.3.1.1, pág. 24. En cuanto a la evaluación de la capacidad de aire, se ofrece la escala Ad-hoc-AG Boden (2005), que representa más bien una gradación en base a la distribución estadística (cuadro 3.5), mientras que la clave de TUSEC (cuadro 3.6) se orienta más bien en la necesidad de plantas superiores para su desarrollo.

	CA	evaluación	
	[%-vol]	verbal	numérica
	≤ 2	muy baja	1
	2 - 5	baja	2
	5 - 13	regular	3
	13 - 26	alta	4
	> 26	muy alta	5

Cuadro 3.5: Gradación de la capacidad de aire (CA , poros con $\phi >50\mu\text{m}$), (Ad-hoc-AG Boden 2005)

	CA	$\sum_0^{1m} CA$	evaluación	
	[%-vol]	[L/m ²]	verbal	numérica
	≤ 4	≤ 40	muy baja	1
	4 - 7	40 - 70	baja	2
	7 - 10	70 - 100	regular	3
	10 - 12	100 - 120	alta	4
	> 12	> 120	muy alta	5

Cuadro 3.6: Evaluación de la capacidad de aire (CA , poros con $\phi >50\mu\text{m}$), (Lehmann *et al.* 2013)

Aparte de la capacidad de aire, hay una serie de observaciones que nos permiten complementar la caracterización del balance de aire. Muchas de ellas están, como ya mencionado, relacionadas con el balance de agua. Criterios a tomar en cuenta son:

- ubicación en el terreno y condiciones generales de drenaje del suelo;
- presencia de rasgos de hidromorfismo (marmolado, olor a H₂S, formas semi-terrestres de humus, ...);
- presencia de barreras de difusión, como costras superficiales, piso de arado;
- frecuencia y duración de fases de anegamiento;
- nivel y fluctuación de la napa freática;
- la permeabilidad hidráulica del suelo;
- el régimen de humedad de suelos de tipo ácuico (*aquic*) (Soil Survey Staff 2014);
- nombres del grupo taxonómico del suelo: tipos de suelos y elementos forma-

tivos de nombres que pueden indicar problemas de aireación (IUSS Working Group WRB 2014):

grupos taxonómicos: *Histosol*, *Gleysol*, *Stagnosol*, *Planosol*, *Fluvisol*; grupos con una influencia del factor agua muy específica (más detalle en apartado 3.2.3.5, pág. 58);

elementos formativos de nombres:

stágnico (→ agua estancada), gléyico (→ influencia de napa freática), tiónico (→ procesos de oxido-reducción de azufre), hístico (→ formas hidromórficas de humus), reductico (→ reducción en suelos antropogénicos), (en inglés: *stagnic*, *gleyic*, *thionic*, *histic*, *reductic*);

3.2.3. Balance de agua - disponibilidad de agua para la vegetación

La disponibilidad de agua para la vegetación en un sitio depende de diversos factores ambientales, que actúan a diferentes escalas. A un nivel general, es el clima que define las condiciones generales para el crecimiento y desarrollo de la biota, lo que se expresa en asociaciones biológicas típicas de una zona (biomas, ecosistemas, zonas bioclimáticas). A escala de paisaje, es el relieve que modifica ciertas condiciones climáticas y la redistribución de agua a lo largo de una catena. Finalmente, a nivel local, actúan los suelos con su capacidad de retener y conducir agua, y eventualmente se agrega el factor de una capa freática, que pueda tener un aporte significativo de agua (fig. 3.3).

Desde el enfoque de evaluar el suelo solo como factor de sitio, se pueden considerar únicamente parámetros edáficos y otros aspectos locales, como relieve y capa freática. Sin embargo, para evaluar el sitio en una forma integral, es indispensable tomar en cuenta las condiciones climáticas. Su consideración se puede realizar a nivel de balance de agua (fig. 3.3), o como condicionante para toda la función biológica. Ambas opciones se presentan y discuten en esta guía, como opciones metodológicas (ver apartado 3.2.6.1, pág. 72).

En los siguientes apartados, se presentan primero parámetros y métodos para cada uno de los criterios planteados, para terminar en propuestas de evaluaciones integrales, que incluyen clima, suelo y factores locales.

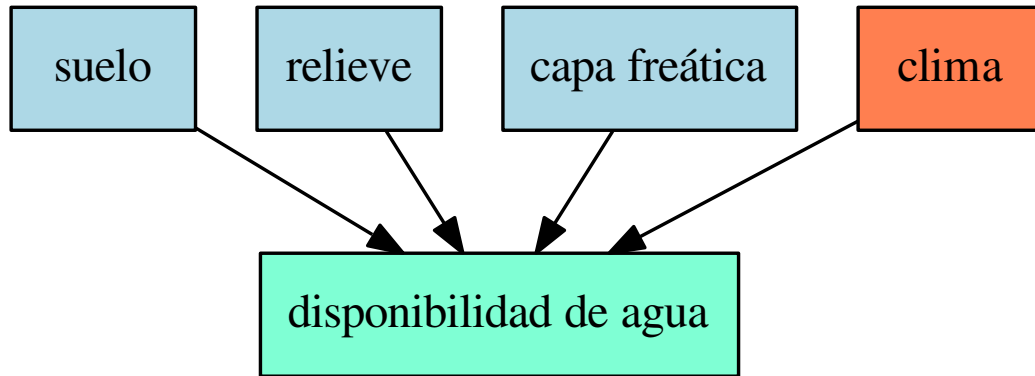


Figura 3.3: Disponibilidad de agua para la vegetación, en función de factores locales (suelo, relieve, capa freática) y generales (clima) de sitio

3.2.3.1. Agua disponible - criterio suelo

Se evalúa la capacidad de agua útil del suelo, en [L/m²]:

- el agua útil (*AU*) designa aquella fracción de agua retenida en el suelo contra la gravedad y que es disponible para las plantas; corresponde a la fracción de mesoporos y macroporos finos (\varnothing 0.2 - 50 μ m, límites de potencial mátrico: pF 1.8 - 4.2);
- profundidad de evaluación (según el contexto o metodología elegida):
 - a) 1 metro (1 m) de profundidad; ó
 - b) profundidad de enraizamiento (max. 1.4 m);

La cantidad de agua útil, hasta la profundidad de consideración (ver arriba), se calcula de la siguiente manera:

- a) A partir de los valores de *AU* en [%-vol] para cada horizonte (analizados o derivados de clase textural y densidad aparente, ver apartado 2.3.1.1, pág. 24), se calcula la cantidad de *AU* en [L/m²] o [mm], al multiplicarlos con el volumen del horizonte por unidad de área (correspondiente al espesor del mismo en [mm]):

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2 = 1 \text{ dm}^3/\text{m}^2 = 1 \text{ L/m}^2):$$

$$\begin{aligned}
 AU &= \frac{AU_{pc}}{100} \times \frac{vol.horiz}{A} \\
 &= \frac{AU_{pc}}{100} \times esp.horiz
 \end{aligned}$$

considerar que: $\frac{vol.horiz}{A} \equiv esp.horiz$

AU	agua útil [L/m ²] ó [mm]
AU_{pc}	agua útil [% – vol]
$\frac{vol.horiz}{A}$	volumen de horizonte sobre superficie de referencia [L/m ²]
$esp.horiz$	espesor de horizonte [mm]

- b) Finalmente, los valores hay que corregir por el volumen que ocupan materiales más gruesos que arena (cantos o esqueleto del suelo), dado que no participan en la retención de agua:

$$AU = \frac{AU_{pc}}{100} \times esp.horiz \times \frac{(100 - vol.piedras)}{100}$$

- c) Los valores de los horizontes se suman hasta la profundidad de consideración, según:

$$AU_{1...n} = \sum_{i=1}^n AU_i$$

- d) el total ($AU_{1...n}$) se evalúa según cuadro 3.7.¹

¹En las guías de evaluación existentes (Ad-hoc-AG Boden 2005; Schlichting *et al.* 1995), se considera el balance de agua en función de estos tres factores, y a nivel de suelo, se asigna una disponibilidad de agua directamente proporcional con la fracción de agua útil. Sin embargo, Walter y Breckle (1991) demuestran, que este concepto no es válido para zonas (semi)áridas, donde una capacidad de agua útil alta del suelo puede ser ecológicamente desventajosa: en suelos de alta capacidad de retención de agua, ésta se almacenará, después de una lluvia, sólo en los primeros estratos superficiales, en lugar de percolar a profundidad. Ello significa, que en el tiempo posterior, se produce una evaporación relativamente alta a expensas de una transpiración productiva. Otro factor es el menor lavado de sales hacia afuera del espacio de enraizamiento. En estas condiciones climáticas, suelos de textura más gruesa, con una capacidad de retención de agua regular a baja, ofrecerán una mayor protección de agua y un mejor lavado de sales, representarían entonces mejores sitios en comparación con suelos de textura fina.

Respecto a la capacidad de extracción de agua por la planta, también hay que diferenciar entre las zonas húmedas, donde los vegetales poseen un punto de marchitez correspondiente aproximadamente al valor de 15 bar (1.5 MPa, pF 4.2) y las zonas (semi)áridas, donde se encuentran muchas especies adaptadas que logran producir potenciales hídricas en sus células que superan los 70 bar (7 MPa, pF 4.8) (Mitlöhner 1990; Walter y Breckle 1991).

Estos aspectos no se consideran directamente en los esquemas de evaluación presentados aquí. Sin embargo, en el caso de que se trate de la evaluación de suelos en ambientes semiáridos, habría que diferenciar la evaluación cualitativamente, poniendo a consideración las facetas mencionadas arriba, con argumentos verbales, cualitativos.

	AU [l/m ²]	evaluación		
		verbal	num[1]	num[2]
Cuadro 3.7: Evaluación de la cantidad de agua útil en el espacio de enraizamiento (AU, hasta max 1.4 m de profundidad), de acuerdo con Ad-hoc-AG Boden (2005) (1) y Lehmann <i>et al.</i> (2013) (2)	≤ 50	muy baja	1	1
	50 - 90	baja	2	2
	90 - 140	regular	3	3
	140 - 200	alta	4	4
	200 - 270	muy alta	5	} 5
	> 270	extrem. alta	6	

3.2.3.2. Agua disponible - criterio clima

La disponibilidad de agua en un sitio determinado depende en primer lugar de las condiciones climáticas.

En este apartado, se intenta considerar la influencia dominante de la humedad climática respecto a la disponibilidad de agua para la vegetación. Se muestran diferentes claves semi-cuantitativas o cualitativas, para la clasificación de la humedad climática solamente, o en cierta relación con el suelo (clima del suelo). Se presentan la clasificación de la humedad climática según Thornthwaite (1948) y el concepto del régimen de humedad del suelo, de acuerdo con *Keys to Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff 2014). Sin embargo, hay una gran variedad de otras clasificaciones climáticas que se pueden aplicar.

Índice de humedad climática de Thornthwaite Thornthwaite (1948) define los siguientes índices hídricos en base a la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ET_p) (MOPT 1992):

- índice de humedad (I_h) para un período húmedo, en el que la precipitación de un mes determinado (P , en [mm]) excede la necesidad de agua, expresada como evapotranspiración potencial (ET_p , en [mm]);

$$I_h = \frac{(P - ET_p)}{ET_p} \times 100 \quad \text{para } P > ET_p \quad (3.1)$$

- índice de aridez (I_a), aplicable cuando la precipitación, en un mes dado, es inferior a la evapotranspiración potencial:

$$I_a = \frac{(ET_p - P)}{ET_p} \times 100 \quad \text{para } P < ET_p \quad (3.2)$$

Teniendo en cuenta la heterogeneidad de la precipitación en las distintas épocas del año y, en consecuencia, la influencia desigual de los índices de aridez y humedad, Thornthwaite define un índice hídrico anual (I_m), que se obtiene en función del exceso y déficit de agua de todos los meses, según:

$$I_m = \frac{\sum I_h - 0.6 \sum I_a}{12} \quad (3.3)$$

El índice hídrico ponderado (I_m) permite caracterizar diferentes ecorregiones (fig. 3.4), que se caracterizan detalladamente en cuadro 3.8.

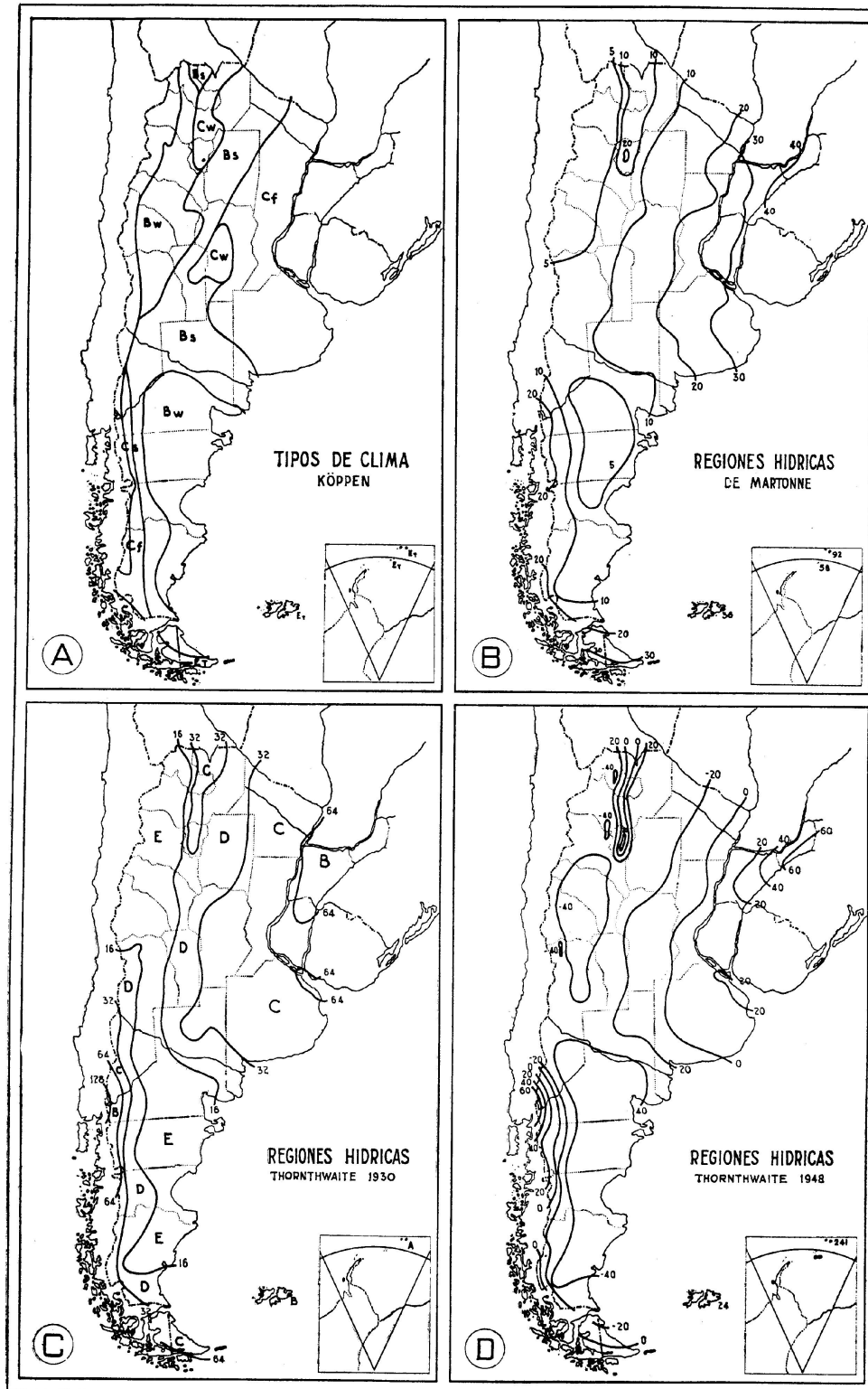


Figura 3.4: Regiones hídricas de la Argentina, de acuerdo con diferentes clasificaciones (bio)climáticas (Burgos y Vidal 1951)

Cuadro 3.8: Regiones hídricas de Argentina, de acuerdo con el índice hídrico (I_m) según Thornthwaite (1948); clave de 9 clases y una reducida a cinco clases (AD_{cl})

Símbolo	Designación	Vegetación	Índice hídrico I_m			AD_{cl}	
						[1...9]	[1...5]
E	árido	desierto	-60	-	-40	1	1
D	semiárido	estepa	-40	-	-20	2	} 3
C1	seco subhúmedo	pastos bajos	-20	-	0	3	
C2	subhúmedo	pradera de pastos altos	0	-	20	4	} 3
B1	húmedo I	bosque	20	-	40	5	
B2	húmedo II	bosque	40	-	60	6	} 4
B3	húmedo III	bosque	60	-	80	7	
B4	húmedo IV	bosque	80	-	100	8	} 5
A	perhúmedo	selva	> 100			9	

Régimen de humedad del suelo El concepto del clima del suelo, disgregado en el régimen de humedad y de temperatura, fue introducido por el sistema de clasificación *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff 1999). Dado que la designación del régimen de humedad se plasma como sílaba formativa en el nombre del suelo, mapas de suelos elaborados bajo este sistema taxonómico proporcionan esta información ecológicamente muy importante sobre las condiciones de humedad del suelo.

En cuadro 3.9 se desprenden los diferentes regímenes, que se definen en base de duración acumulativa y/o continua de diferentes estados de humedad. Como tales se distinguen

(i) **suelo húmedo**

- a. saturado con agua
- b. $\psi < 1500$ kPa (pF 4.2)

(ii) **suelo seco** $\psi \geq 1500$ kPa (pF 4.2)

Los diferentes regímenes permiten deducir tres situaciones pedogenéticamente y ecológicamente relevantes,

- a) suelos sin O_2 , anaeróbicos;
- b) suelos con lixiviación;
- c) suelos sin lixiviación;

situaciones que determinan tipo y actividad biológica, el balance de elementos y las vías de transformación de los componentes minerales y orgánicos del suelo.

Cuadro 3.9: Regímenes de humedad del suelo, definidos en la clasificación norteamericana de suelos *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff 1999)

régimen de humedad	raíz del nombre	connotación
ácuico	l. <i>aqua</i> - agua	saturado con agua, sin O ₂
arídico o tórrico	l. <i>aridus</i> - seco l. <i>torridus</i> - seco + caliente	bajo clima árido / semiárido, humedad limitante
údico	l. <i>udus</i> - húmedo	bajo climas húmedos, c/ distribución favorable de lluvia
ústico	l. <i>ustus</i> - quemado	humedad limitante, pero presente en verano
xérico	l. <i>xeros</i> - seco	humedad limitante, pero presente en invierno (clima mediterráneo)

3.2.3.3. Los factores locales relieve y capa freática

A nivel de paisaje y sitio, los factores locales relieve y capa freática pueden modificar la disponibilidad de agua de tal manera, que se reducen las limitaciones generales del clima. La consideración de estos factores es entonces importante para los climas secos o estaciones secas.

Se presentan aquí métodos cualitativos, que ajustan las clases evaluativas de disponibilidad de agua, de acuerdo con el contexto dado.

El relieve modifica el balance de agua de un sitio en función de su posición y exposición. Para una descripción más completa del balance de agua, se consideran los aportes y pérdidas de agua en función del relieve, de forma cualitativa.

La posición fisiográfica y la forma del terreno definen por gran parte pérdidas o aportes por escurrimiento superficial y subsuperficial. A su vez, la exposición de una pendiente modifica la evapotranspiración, en función de la radicación y el viento.

La consideración del relieve se realiza de modo cualitativo, modificando la clase de agua disponible a nivel de suelo (AU , cuadro 3.7, pág. 50) o de suelo y clima ($AD_{s,cl}$, cuadro 3.11, pág. 56), entre 0 a ± 2 clases, de acuerdo con cuadro 3.10 (según Schlichting *et al.* 1995, adaptado), pero manteniéndose dentro de la correspondiente escala.

Cuadro 3.10: Corrección cualitativa de la evaluación de la disponibilidad de agua en función de suelo y clima (AU o $AD_{s,cl}$)^a, por el factor relieve ($corr.R$ [-2...0...+2])

posición típica en el relieve	condición resultante del relieve o exposición	corrección $corr.R$
planicie alta	ni aporte ni pérdida evapotranspiración normal	± 0
ladera media	aporte y pérdida por escorrentía equilibrados evapotranspiración normal	± 0
ladera baja, depresión, ladera sombreada	aporte neto de agua por escorrentía super y subsuperficial, evapotranspiración reducida	+1(+2)
ladera alta, cumbre, ladera soleada	pérdida neta por escorrentía super y subsuperficial, evapotranspiración elevada	-1(-2)

^arango de $AU = [1 \dots 5]$ y $AD_{s,cl} = [1 \dots 5]$ ó $[1 \dots 10]$

La capa freática, cercana a la superficie, o más bien profunda, pero accesible para cierto tipo de vegetación, mejora la disponibilidad de agua en general. La importancia de la capa freática, de acuerdo con las condiciones climáticas y la profundidad de la capa, se ve en fig. 3.5.

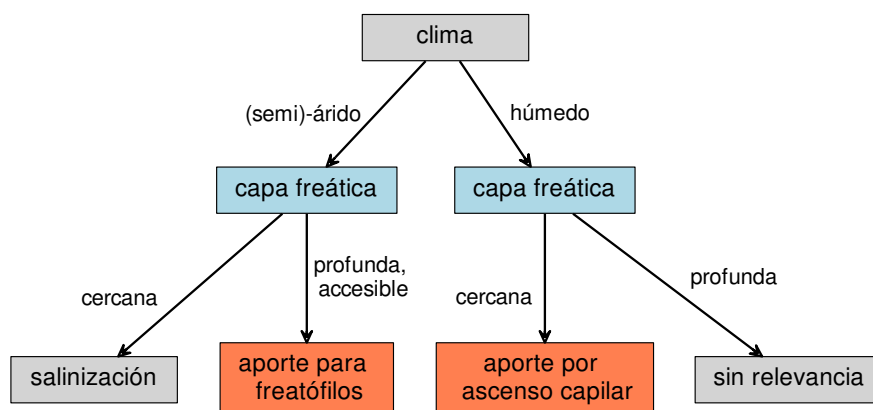


Figura 3.5: Árbol de decisión respecto a la importancia de la capa freática y su profundidad para la disponibilidad de agua, de acuerdo con el contexto climático

Para el caso de los climas áridos y semiáridos, una capa freática cercana a la superficie provoca la salinización, por la acumulación de sales a través del ascenso capilar. Sin embargo, la presencia de una capa freática profunda, pero accesible para una vegetación freatófila, mejora marcadamente el balance de agua para este tipo de vegetación (fig. 3.5).

Se propone, para estos casos, una corrección cualitativa de la clase de disponibilidad de agua, por una clase, siempre cuando la capa freática se encuentre entre una distancia de 4 a 15 metros de la superficie. Esta corrección se aplicará únicamente para especies freatófilas.

A diferencia, para los climas húmedos, una capa freática cercana produce un aporte general de agua, debido al ascenso capilar hacia el espacio radicular. La tasa de ascenso depende de la distancia de la capa freática al espacio radicular y la textura del suelo, y se encuentra disponible en las guías de mapeo de suelos (Ad-hoc-AG Boden 2005). En este caso, el aporte adicional de agua (ascenso capilar AC) puede ser cuantificado de la siguiente manera:

$$AC [mm] = tasa.ascenso [mm/d] \times tiempo [d] \quad (3.4)$$

El valor se suma a la capacidad de agua útil (AU), o se realiza una corrección cualitativa en los otros indicadores de disponibilidad de agua.

3.2.3.4. Evaluación integral de la disponibilidad de agua

A continuación, se presentan diferentes propuestas para combinar las evaluaciones parciales de los criterios individuales. En fig. 3.6, se resumen los criterios y parámetros considerados para la evaluación de la disponibilidad de agua.

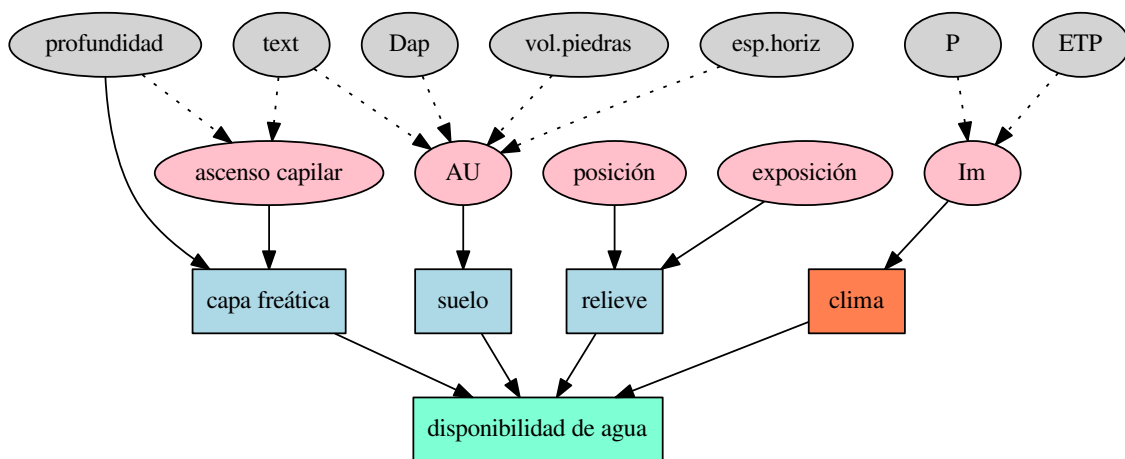


Figura 3.6: Esquema para la evaluación del criterio *disponibilidad de agua para la vegetación*

Evaluación de agua disponible en función de clima y suelo. Como propuestas tentativas, que pretende caracterizar el agua disponible para la vegetación en función de ambos

factores, clima y suelo ($AD_{s.cl}$), se presenta el esquema de evaluación en cuadro 3.11. Es de carácter provisorio, y se ruega usarlo de modo de prueba, para su verificación y ajuste.

De acuerdo con los valores propuestos, se recomienda trabajar con la escala continua de 1 a 10, siempre cuando se trata de comparar sitios a una escala local o regional, mientras que se requiere eventualmente de la reclasificación en cinco clases, para homologar escalas de clasificación.

Cuadro 3.11: Índices de agua disponible en función de suelo y clima ($AD_{s.cl}$), en una escala continua de 1 - 10 y reclasificado en 5 clases - propuesta tentativa

Símbolo	clima		suelo (AU)				
	Designación	I_m^a	<i>muy bajo</i> <i>muy alto</i>				
			1	2	3	4	5
E	árido	] -60; -40]	1	1	1	1	1
D	semiárido	] -40; -20]	2	2.2	2.4	2.4	2.4
C1	seco subhúmedo	] -20; 0]	3	3.3	3.6	3.9	4.2
C2	subhúmedo	] 0; 20]	4	4.3	4.6	4.9	5.2
B1	húmedo I	] 20; 40]	5	5.3	5.6	5.9	6.2
B2	húmedo II	] 40; 60]	6	6.3	6.6	6.9	7.2
B3	húmedo III	] 60; 80]	7	7.3	7.6	7.9	8.2
B4	húmedo IV	] 80; 100]	8	8.3	8.6	8.9	9.2
A	perhúmedo	] 100; ...]	9	9	9	10	10

Reducción de 10 a 5 clases:

$AD_{s.cl}$	evaluación $AD_{s.cl}$	
	verbal	numérica
< 2.5	muy baja	1
2.5 - 4.5	baja	2
4.5 - 6.5	regular	3
6.5 - 8.5	alta	4
≥ 8.5	muy alta	5

^aÍndice hídrico según Thornthwaite (1948)

Como una alternativa más simple, basada en el régimen de humedad del suelo y usando el índice de humedad de Thornthwaite para subdividir los ambientes (semi)áridos, se propone el esquema cualitativo en fig. 3.7 para evaluar la disponibilidad de agua para la vegetación.

Evaluación integral de agua disponible, integrando correcciones por factores locales.

En la última sección de este tema, se procede en el ajuste de disponibilidad de agua en función de clima y suelo, por los factores relieve y capa freática. La representación de la

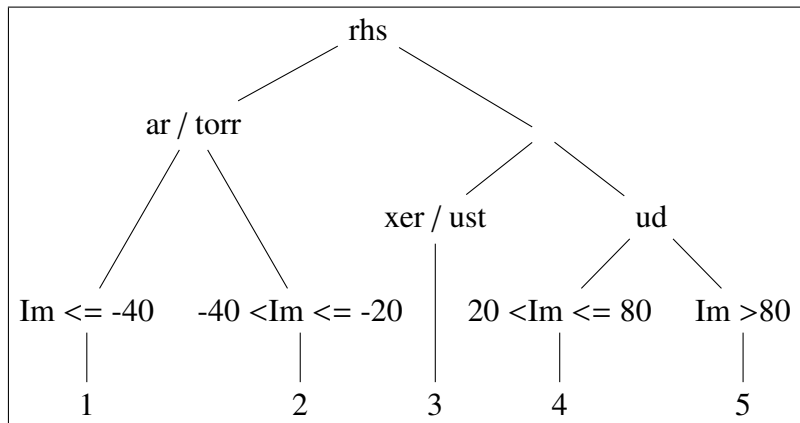


Figura 3.7: Árbol de decisión para evaluar el agua disponible en función del clima, basado en el régimen de humedad del suelo (rhs) y el índice de humedad climática de Thornthwaite

evaluación se da en dos diferentes formas: (i) como un vector que explicita todavía todas las valoraciones parciales, y (ii) como índice único.

Como mencionado en el principio de esta sección, la evaluación del balance de agua respecto a la disponibilidad para la vegetación es sumamente compleja. De tal manera, resulta difícil sintetizar la disponibilidad en un solo valor numérico evaluativo.

La presentación en forma de vector de valoraciones parciales permite una mayor diferenciación de los resultados y permite elaborar y ajustar un esquema de valoración, de acuerdo con el contexto y la escala espacial del estudio:

$$AD = \left\{ \begin{array}{c|c|c|c} \text{clima} & \text{suelo} & \text{relieve} & \text{capa freática} \\ \hline I_m \text{ ó } AD_{cl} & \text{clase } AU & corr.R & corr.CF \\ \hline [1 \dots 9 (5)] & [1 \dots 5] & [-2 \dots 0 \dots + 2] & [0 \dots + 2] \end{array} \right.$$

ó fusionando el efecto de suelo y clima en un sólo valor ($AD_{s.cl}$):

$$AD = \left\{ \begin{array}{c|c|c} \text{clima + suelo} & \text{relieve} & \text{capa freática} \\ \hline AD_{s.cl} & corr.R & corr.CF \\ \hline [1 \dots 10 (5)] & [-2 \dots 0 \dots + 2] & [0 \dots + 2] \end{array} \right.$$

Este esquema siempre es recomendable, cuando se requiere mantener un mayor detalle en la evaluación funcional.

Finalmente, se presenta aquí la generación de un índice único (AD) que refleja la disponibilidad de agua. Para tal fin, se corrige el valor obtenido en base a los factores clima y suelo ($AD_{s.cl}$, cuadro 3.11, pág. 56, en base al relieve ($corr.R$) y la capa freática ($corr.CF$).² Cabe aclarar, al tratar de abarcar toda la variación de humedad climática, se

²se puede considerar también la opción, usar escalas de 1 a 10 para $AD_{s.cl}$, corregir por factores locales,

pierde capacidad de diferenciación para el índice final.

$$AD = AD_{s.cl} + corr.R + corr.CF \quad AD = [1 \dots 10]$$

$$\Downarrow$$

$$AD[1 \dots 10] \Rightarrow [1 \dots 5]$$

El valor final, de agua disponible (AD), como índice único, integrando sobre todos los valores, se evalúa según cuadro 3.12).

	evaluación AD	
	numérica	verbal
Cuadro 3.12: Evaluación integral de la disponibilidad de agua para la vegetación (AD), en función de clima, suelo, relieve y capa freática	1	muy baja
	2	baja
	3	regular
	4	alta
	5	muy alta

3.2.3.5. Apreciaciones sobre el balance de agua desde la clasificación taxonómica de suelos

Siendo el clima un factor predominante en la formación de suelos, en muchas clases taxonómicas del suelo se reflejan ciertas condiciones sobre el balance de agua. Se muestran algunos ejemplos:

- suelos, en los cuales el agua predomina como factor de formación sobre otros: *Histosol* (\rightarrow suelos orgánicos, típicamente por saturación con agua, falta de oxígeno), *Gleysol* (\rightarrow napa freática alta), *Stagnosol* (\rightarrow agua estancada), *Planosol* (\rightarrow reducción fuerte por agua estancada) y *Fluvisol* (\rightarrow influencia del río);
- los elementos formativos stágnico, gléyico, tiónico, hístico, redúctico, designan subunidades de suelos, donde el drenaje es desfavorable, de tal manera resultando en problemas de aireación (ver arriba);

y recién después reducir las clases de evaluación a una escala de 1 a 5

3.2.4. Evaluación del balance de nutrientes

3.2.4.1. Conceptos generales

La oferta de elementos, tanto nutritivos como tóxicos, en un suelo es una función de las reservas y su movilización a corto o mediano plazo (fig. 3.8):

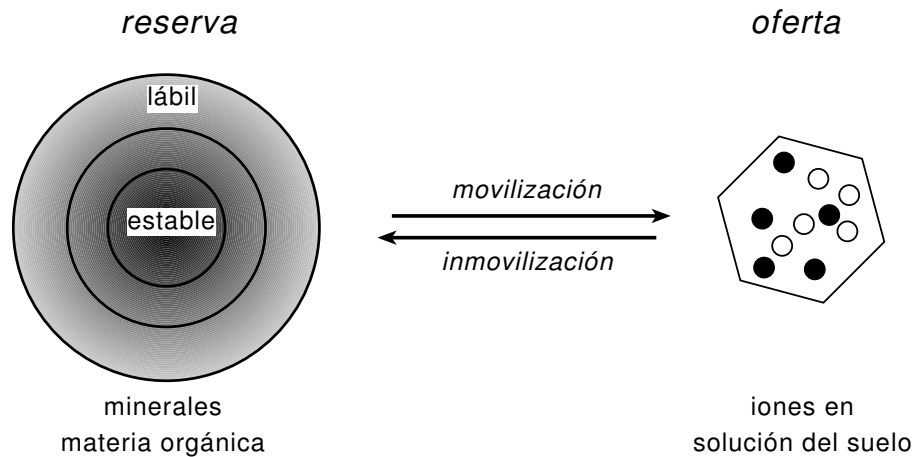


Figura 3.8: Esquema de la movilización de elementos a partir del compartimento de reservas. Los elementos en la solución del suelo representan la oferta respectivamente la fracción inmediatamente disponible

Las reservas de nutrientes dependen de la composición mineralógica y la materia orgánica del suelo (*MOS*). Principalmente aumentan con la presencia de minerales meteorizables y con la cantidad de humus en el suelo. Las reservas resultan del contenido original en la roca madre y las pérdidas o acumulaciones durante la evolución del suelo. Las reservas más importantes para (i) los macronutrientes Ca, Mg, K y P se encuentran en los carbonatos de Ca y Mg, los feldespatos (K, Ca), apatita (P) y micas o illitas (K) y (ii) para Fe y otros microelementos (Mn, Cu, Co) en los minerales ferromagnesianos (rocas oscuras). Tanto para los elementos P y S como para los microelementos, puede haber grandes reservas en la materia orgánica del suelo. Por ende, casi el total del N ($\geq 95\%$) se encuentra en forma orgánica, es decir en la *MOS*.

En la movilización de nutrientes se distinguen (i) la liberación de elementos de las reservas minerales por procesos de meteorización, (ii) procesos de intercambio en la superficie de adsorbentes y (iii) la liberación de reservas en la materia orgánica por la mineralización microbiana. La movilización de los nutrientes es entonces una función de las condiciones de meteorización (clima, clima del suelo, balance de agua, tipo de minerales), de las características químicas actuales del suelo (pH, humedad, tipo de adsorbentes, mineralogía) y bioquímicas y biológicas (contenido de materia orgánica, tipo de humus, actividad microbiana, potencial redox).

Una aproximación para estimar el balance de nutrientes en el suelo se obtiene mediante los parámetros: mineralogía de la roca madre, grado de meteorización, contenido

de carbonatos, pH, capacidad de intercambio de cationes, contenido de materia orgánica y forma de humus. Una primera evaluación cualitativa de las reservas de nutrientes movilizables se obtiene de cuadro 3.13, que toma en cuenta la roca madre y el grado de meteorización.

Cuadro 3.13: Caracterización cualitativa de las reservas de nutrientes en suelos de acuerdo con el tipo de roca y grado de meteorización (adaptado de Schlichting *et al.* 1995)

	<i>Grado de meteorización física y química</i>			
	<i>alto</i>	<i>medio</i>	<i>débil a moderado</i>	<i>no a escaso</i>
<i>suelos terrestres</i> (ejemplos)	Podzol, Lixisol, Acrisol	Dystric Cambisol, Podzol-Cambisol	Eutric Cambisol, Cherno-, Phaeo- y Kastanozem, Luvisol	Leptosol, Regosol
<i>tipo de roca</i>	<i>reserva de nutrientes</i>			
arena, arenisca, cuarcita	muy baja (1)	baja (2)	baja (2)	muy baja (1)
marga arenosa, lutita, granito	baja (2)	baja (2)	media (3)	baja (2)
marga, loess, caliza, lodo, sedimentos fluviales francosos	baja (2)	media (3)	alta (4)	media (3)
arcilla, marga arcillosa, pizarra, filita	media (3)	alta (4)	muy alta (5)	alta (4)
gabro, basalto	media (3)	extr. alta (6)	extr. alta (6)	muy alta (5)

Cálculo de cantidades de nutrientes en el espacio de enraizamiento En los balances de nutrientes, se calculan cantidades de elementos por unidad de área, hasta una profundidad de referencia (p.ej. límite de enraizamiento).

1. cálculo de la cantidad de nutriente en un horizonte, a partir de un dato analítico de la concentración del nutriente por masa, la densidad aparente y el volumen del horizonte por unidad de área, corregido por la proporción de piedras en el horizonte:

$$nutri.cant = nutri.conc \times D_{ap} \times \frac{vol.horiz}{A} \times \frac{(100 - vol.piedras)}{100} \quad (3.5)$$

<i>nutri.cant</i>	cantidad de nutriente [g/m ²]
<i>nutri.conc</i>	concentración del nutriente [g/kg]
<i>D_{ap}</i>	densidad aparente [kg/dm ³]
<i>vol.horiz</i>	volumen de horizonte [dm ³]
<i>A</i>	unidad de área [m ²]
<i>vol.piedras</i>	proporción de piedras [% - vol]

observe: volumen del horizonte por área [dm³/m²] = espesor de horizonte [mm]

2. para obtener la cantidad del nutriente en el suelo, los valores de los horizontes 1 a n , dentro de la profundidad de consideración, se suman según

$$nutri.cant_{suelo} = \sum_{i=1}^n (nutri.cant)_i \quad (3.6)$$

Ponderación de las cantidades según horizonte Con la idea de diferenciar el grado de enraizamiento y el aprovechamiento de los nutrientes en función de la profundidad, en los esquemas de evaluación el aspecto nutricional del suelo como factor de sitio se propone la ponderación de las cantidades de nutrientes, de acuerdo con tipo y profundidad de los horizontes (Schlichting *et al.* 1995). Se supone una disponibilidad decreciente con la profundidad, por eso, se calcula una suma ponderada, usando los siguientes factores de ponderación:

horizontes A y O enteros o profundidad hasta 30 cm: factor 1
otros horizontes o profundidad >30 cm: factor 0.5

El uso de estos u otros factores de ponderación hay que evaluar en el contexto específico de la aplicación del método, agregando una fundamentación y documentación transparente.

En función de los criterios adaptados para la evaluación del suelo como factor de sitio, la ponderación puede ser obviada, en caso de que el espacio radicular reciba una evaluación propia.

3.2.4.2. pH del suelo

La importancia pedogenética y ecológica del pH fue resumida en (fig. 2.7, pág. 32). Respecto al balance de elementos, el pH influye en la movilización, disponibilidad y toxicidad de elementos, por lo cual se puede considerar el pH como un valor guía para aspectos de nutrición y afecciones por toxicidad.

En este sentido, se propone una evaluación del pH para la biota, en cuadro 3.14.

Cuadro 3.14: Evaluación de los rangos de pH (en CaCl₂) de suelos respecto a su condición general para la vegetación

pH _{CaCl₂}			
rango de pH	designación	clase	eval ^a
≥ 10.7	extremadamente básico	b6	1
10.0 - <10.7	muy fuertemente básico	b5	1
9.3 - <10.0	fuertemente básico	b4	1
8.6 - <9.3	básico	b3	1
7.9 - <8.6	ligeramente básico	b2	2
7.2 - <7.9	muy ligeramente básico	b1	3
6.8 - <7.2	neutro	a0	4
6.1 - <6.8	muy ligeramente ácido	a1	5
5.4 - <6.1	ligeramente ácido	a2	4
4.7 - <5.4	ácido	a3	3
4.0 - <4.7	fuertemente ácido	a4	2
3.3 - <4.0	muy fuertemente ácido	a5	1
< 3.3	extremadamente ácido	a6	1

^apropuesta de evaluación en función de condiciones para microorganismos, disponibilidad de nutrientes, toxicidad de elementos, etc.:

1 - muy desfavorable, 2 = desfavorable, con limitaciones, 3 - regular, 4 - favorable, 5 - muy favorable

3.2.4.3. Parámetros relacionados con la materia orgánica del suelo

La materia orgánica del suelo (*MOS*) participa en procesos y características físicas, químicas y biológicas. Por ello, es generalmente un parámetro de apoyo que se encuentra en la evaluación de las tres diferentes clases de funciones.

En el caso del rol del suelo como factor de sitio de la vegetación o hábitat de organismos, son los siguientes criterios que se consideran en las evaluaciones funcionales:

- reservorio de macro- y micronutrientes;
- movilización de elementos a partir de la *MOS*;
- sustrato (fuente de C y energía) para organismos del suelo;
- componente del complejo adsorbente;
- agente agregación;

De tal manera, los aspectos y métodos presentados en el apartado 2.4.2, pág. (33) encuentran su consideración en este lugar. A continuación, se presentan algunos parámetros más específicos para la nutrición.

Reservas de nitrógeno orgánico y fracción disponible La estimación de diferentes fracciones de nitrógeno en el suelo es siempre de interés para el factor nutrición, debido a su rol dominante como macronutriente de mayor demanda.

En caso de que no existan valores analíticos de N_t , las reservas del mismo pueden ser estimadas en función de las reservas de materia orgánica y la forma de humus según cuadro 3.15. La fracción disponible de N (N_d) se aproxima mediante el contenido de *MOS* y la forma de humus (cuadro 3.15).

Cuadro 3.15: Estimación de reservas (N_t) y fracción disponible (N_d) de N en función de la reserva de *MOS* y forma de humus; relaciones C/N supuestas: mull=10, moder=20, mor=33; tasas de mineralización anual: mull=0.5 %, moder=0.32 %, mor=0.2 %; según Jahn (1992)

forma de humus	reserva de N (N_t)		N disponible (N_d)		
mull	<i>MOS</i>	$\times 0.050$	<i>MOS</i>	$\times 0.25 \times 10^{-3}$	$N_t \times 5.0 \times 10^{-3}$
moder		$\times 0.025$		$\times 0.08 \times 10^{-3}$	$\times 3.2 \times 10^{-3}$
mor		$\times 0.015$		$\times 0.03 \times 10^{-3}$	$\times 2.0 \times 10^{-3}$

N_t [kg/ha]	N_d [kg/ha]	evaluación	
		verbal	numérica
<1000	<5	muy baja	1
1000 - 2500	5 - 10	baja	2
2500 - 5000	10 - 20	regular	3
5000 - 10000	20 - 40	alta	4
10000 - 20000	≥ 40	muy alta	5
≥ 20000	—	extr. alta	6

Cuadro 3.16: Evaluación de las reservas (N_t) y fracciones disponibles (N_d) de N, según Jahn (1992) y Schlichting *et al.* (1995)

3.2.4.4. Parámetros relacionados con el complejo adsorbente

Los cationes básicos intercambiables en el complejo adsorbente corresponden a una fracción de nutrientes disponible para las plantas, pero protegida contra la lixiviación.

La suma de los llamados “cationes básicos”, Ca, Mg, K, Na, en el complejo adsorbente, se denomina valor *S* (en [cmol_c/kg]). La proporción de estos cationes en la superficie del intercambiador se conoce como saturación de bases (*SB* en [%]). La diferencia entre valor *S* y la *CIC* es ocupada por cationes ácidos, H⁺ y Al³⁺, fracción designada como valor *H* (en [cmol_c/kg]).

$$S = \sum (Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+})_{int} \quad [cmol_c/kg] \text{ ó } [mmol_c/kg] \quad (3.7)$$

$$SB = \frac{S}{CIC} \times 100 \quad [\%] \quad (3.8)$$

$$H = \sum (H^+, Al^{3+})_{int} \quad (3.9)$$

$$CIC = S + H \quad [cmol_c/kg] \text{ ó } [mmol_c/kg] \quad (3.10)$$

La saturación de bases se encuentra en 100 % al inicio de la evolución del suelo, cuando el pH es neutro o alcalino. Con la acidificación progresiva del suelo, proceso típico en zonas húmedas, la saturación de base disminuye, siempre en equilibrio con el pH del suelo (fig. 3.9). Conociendo entonces el pH y la *CIC* del suelo, se pueden estimar la saturación de bases respectivamente el valor *S*.

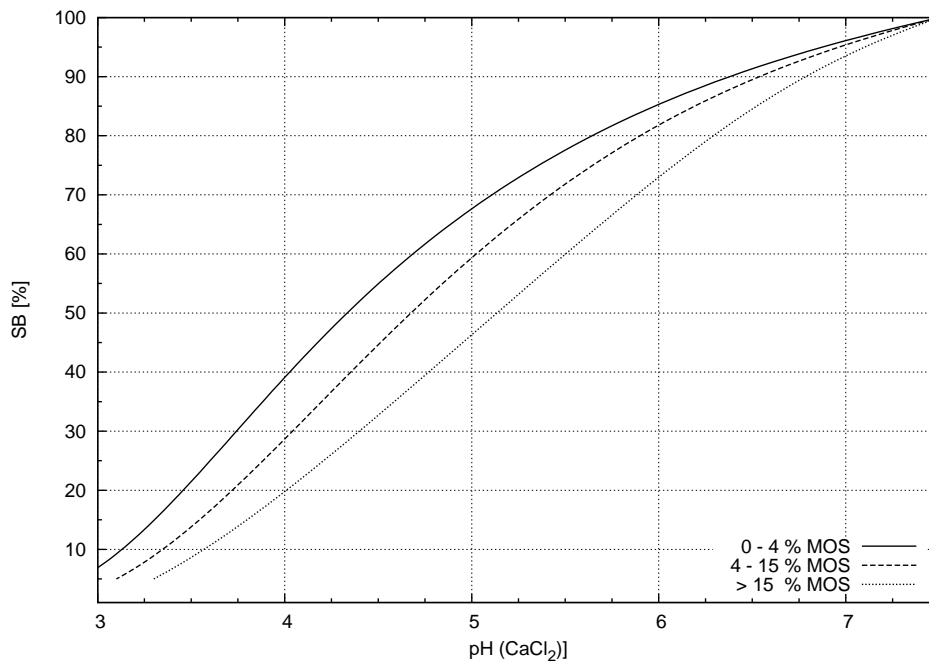


Figura 3.9: Relación entre pH del suelo y la saturación de bases, para diferentes contenidos de humus (Ad-hoc-AG Boden 2005)

	<i>SB</i> [%]	evaluación	
		verbal	numérica
Cuadro 3.17: Evaluación de la saturación de bases (Ad-hoc-AG Boden 2005)	≤ 5	muy baja	1
	5 - 20	baja	2
	20 - 50	regular	3
	50 - 80	alta	4
	80 - 100	muy alta	5

Estimación y cálculo del valor S para todo el espacio de enraizamiento:

$$S.conc = \frac{SB}{100} \times CIC$$

$$S.cant = S.conc \times \frac{1}{1000} \times Dap \times \frac{(100 - vol.piedras)}{100} \times \frac{vol.horiz}{A}$$

$$S.cant_{suelo} = \sum_{i=1}^n (S.cant)_i$$

- $S.conc$ valor S en [mmol_c/kg];
- SB saturación de bases [%];
- CIC capacidad de intercambio catiónico [mmol_c/kg];
- $S.cant$ valor S en [mol_c/m²];
- $vol.piedras$ volumen de piedras [% – vol];
- $\frac{vol.horiz}{A}$ volumen de horizonte por unidad de área A [dm³/m²];
- $i \dots n$ horizontes i a n del suelo

S [mol _c /m ²]	evaluación	
	verbal	numérica
≤ 1	muy baja	1
1 - 10	baja	2
10 - 50	regular	3
50 - 200	alta	4
> 200	muy alta	5

Cuadro 3.18: Evaluación del valor S en el espacio de enraizamiento (según Schlichting *et al.* 1995)

3.2.4.5. Evaluación de cantidades disponibles y reservas movilizables de nutrientes

De acuerdo con el concepto de la oferta de nutrientes a partir de la movilización de la reserva total (fig. 3.8), existen diferentes fracciones del nutriente, que se distinguen en su resistencia a la movilización. En base a ello, se han elaborado muchos métodos analíticos que tratan de extraer fracciones de nutrientes que sean disponibles a corto o mediano plazo (meses a un año), circunscribiendo con ello una “fracción disponible”.

En los siguientes cuadros, se muestran fracciones disponibles a corto plazo (cuadro 3.19), y otras disponibles a largo plazo (o reservas, cuadro 3.20). Cabe destacar, más que nada para las fracciones lábiles, que los valores de las valoraciones están estrechamente ligadas al método analítico usado.

En caso de usar valores de otros métodos, se recomienda una revisión bibliográfica sobre el análisis y, específicamente, la correlación de los resultados con los de otras

técnicas.

Cuadro 3.19: Evaluación de cantidades de nutrientes disponibles en el espacio efectivo de enraizamiento; valores en [kg/ha] (Schlichting *et al.* 1995)

elemento	cantidad disponible [kg / ha]					
$N_{\min}^{1)}$	1	20	45	120	800	
$N_z^{2)}$	2	10	20	80	200	
$P_{\text{disp}}^{1)}$	-	100	250	400	600	
$K_{\text{int}}^{4)}$	80	240	480	800	1200	
$Mg_{\text{int}}^{4)}$	50	150	300	600	1200	
$Ca_{\text{int}}^{4)}$	150	500	1000	2000	6000	
$S_{\min}^{5)}$	20	80	200	400	-	
evaluación	1 m.bajo	2 bajo	3 reg	4 mod.alto	5 alto	6 m.alto

1) N mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) en extracto 1:4 de 0.025 N CaCl_2 ; 2) N mineralizado en incubación a 20 °C, 60 % cap. max. H_2O , 6 semanas; 3) P disponible según Olsen, extracto en NaHCO_3 , pH 8.5; 4) cationes intercambiables según método de NH_4Ac a pH 7.0; 5) SO_4^- en extracto 1:5 de NaCl (1 %)

Respecto a la evaluación de las reservas de nutrientes que se movilizan a largo plazo, cuadro 3.20 proporciona valores de referencia, para un clima templado-atlántico ($\varnothing T = 7$ °C, $P = 700$ mm). Para condiciones climáticas diferentes, hay que recurrir a extractantes más o menos agresivos o ajustar la evaluación realizada.

Cuadro 3.20: Evaluación de reservas movilizables de nutrientes en el espacio efectivo de enraizamiento; valores en [kg/ha] (Schlichting *et al.* 1995)

elemento	reservas movilizables [kg / ha]					
$N_t^{1)}$	1000	2500	5000	10000	20000	
$P_w^{2)}$	250	1250	1750	2500	5000	
$K_w^{2)}$	1000	5000	10000	15000	30000	
$Mg_w^{2)}$	500	2500	3500	5000	10000	
$Ca_w^{2)}$	500	2500	3500	5000	10000	
evaluación	1 m.bajo	2 bajo	3 reg	4 mod.alto	5 alto	6 m.alto

1) N total según Kjeldahl u otro método; 2) extracto 1:5 con HCl (30 %) de una muestra incinerada a 500 °C

3.2.5. Condiciones adversas / toxicidades

Los mismos nutrientes, pero también otros elementos, pueden provocar efectos adversos en los vegetales, cuando se presentan en cierta concentración. Entre los problemas más comunes podemos encontrar (i) la salinidad y sodicidad en climas áridos y semiáridos, (ii) la toxicidad de aluminio en zonas húmedas y (iii) la contaminación con metales pesados.

3.2.5.1. Salinidad

Salinidad designa una elevada concentración de sales más solubles que yeso en la solución del suelo, resultando en una elevada presión osmótica, lo que impide a las plantas la extracción de agua. Aparte de ello, puede haber efectos tóxicos específicos de ciertos iones.

La medición estándar de la salinidad es la conductividad eléctrica (CE) en el extracto de saturación, dado que iones solubles en agua permiten la conducción de corriente eléctrica. El extracto de saturación se aproxima a la solución del suelo en estado de capacidad de campo. La presión osmótica (π) correspondiente a una cierta conductividad eléctrica (CE) en la solución del suelo puede ser estimada a través de la siguiente relación empírica:

$$\pi = 0.036 \times CE \quad (3.11)$$

- π presión osmótica [MPa];
1 MPa = 10 bar
- CE conductividad eléctrica [dS/m];
1 dS/m = 1 mS/cm = 1 mmohs/cm

Si no se dispone de la conductividad en el extracto de saturación, la misma puede ser estimada en base a un análisis rápido de la CE en un extracto suelo:agua 1:2.5 ($EC_{2.5}$), con la referencia de CE al volumen de agua de capacidad de campo (FAO 2009):

$$\hat{C}E_s [dS/m] = \frac{250 \times CE_{2.5}}{CC} \quad (3.12)$$

- $\hat{C}E_s$ conductividad eléctrica estimada para estado de capacidad de campo [dS/m]
- $CE_{2.5}$ conductividad eléctrica en extracto suelo : agua = 1 : 2.5 [dS/m]
- CC capacidad de campo [% - vol]

Este método rápido da estimaciones satisfactorias de la conductividad en estado de saturación del suelo, siempre cuando no haya sales poco solubles como $CaSO_4$ o $CaCO_3$. En presencia de éstas, la CE es generalmente algo sobrestimada.

Los valores de conductividad eléctrica en la solución del suelo son evaluados según cuadro 3.21.

Cuadro 3.21: Evaluación de la conductividad eléctrica (CE , [dS/m], estandarizada a 25 °C) en la solución del suelo (extracto de saturación respectivamente situación de capacidad de campo) (Abrol *et al.* 1988)

CE [dS/m]	evaluación		descripción
	numérica	verbal	
0 - 2	1	no salino	libre de influencia, no existen limitaciones a los cultivos
2 - 4	2	moderadamente salino	casi libre de influencia, algunos cultivos muy sensibles muestran afectaciones
4 - 8	3	ligeramente salino	cultivos afectados, pero no impedidos
8 - 15	4	fuertemente salino	cultivos muy afectados, incluso impedidos, excepto los resistentes
>15	5	muy fuertemente salino	todos los cultivos impedidos; sólo vegetación halófila natural

Como la presencia de sales es también un criterio importante en la clasificación del suelo, la designación taxonómica del suelo nos permite deducir si el suelo tiene o no problemas de salinidad. A continuación se detallan definiciones de la “Base Referencial Mundial del Recurso Suelo” (IUSS Working Group WRB 2014).

En primer lugar existe la definición del horizonte sálico, cuya presencia en la parte superior del suelo lleva a la clasificación de un *Solonchak* (IUSS Working Group WRB 2014), un suelo salino que condiciona una vegetación halófila:

Salic horizon

General description. The salic horizon (from Latin sal, salt) is a surface horizon or a subsurface horizon at a shallow depth that contains high amounts of readily soluble salts, i.e. salts more soluble than gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\log K_s = -4.85$ at 25 °C).

Diagnostic criteria. A salic horizon has:

1. at some time of the year an electrical conductivity of the saturation extract (EC_e) at 25 °C of
 - a) $\geq 15 \text{ dS m}^{-1}$; or
 - b) $\geq 8 \text{ dS m}^{-1}$ if the pH water of the saturation extract is ≥ 8.5 ; and
2. at some time of the year a product of thickness (in centimetres) and EC_e at 25 °C (in dS m^{-1}) of ≥ 450 ; and
3. a thickness of $\geq 15 \text{ cm}$.

Field identification. *Salicornia*, *Tamarix* or other halophyte plants and salt-tolerant crops are first indicators. Salt-affected layers are often puffy. Salts precipitate only after evaporation of most soil moisture; if the soil is moist, salt may not be visible.

Salts may precipitate at the surface (external Solonchaks) or at depth (internal Solonchaks). A salt crust, if present, is part of the salic horizon.

Aparte de ello, existen definiciones de “elementos formativos”, que caracterizan los suelos a niveles taxonómicos inferiores. Respecto a salinidad, se distinguen (IUSS Working Group WRB 2014):

Salic (sz): having a salic horizon starting ≤ 100 cm from the soil surface.

Hypersalic (jz): having an EC_e of $\geq 30 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ at 25°C in some layer within ≤ 100 cm of the soil surface.

Protosalic (qz): having an EC_e of $\geq 4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ at 25°C in some layer within ≤ 100 cm of the soil surface and not having a salic horizon starting ≤ 100 cm

De tal manera, de nombres taxonómicos como p.ej. Solonchak, Vertisol sálico, Fluvisol sálico, Calcisol endosálico, se desprende mucha información acerca de la salinidad, que nos sirve para la interpretación ecológica.

3.2.5.2. Sodicidad

Sodicidad designa la elevada presencia de sodio, o sodio más magnesio, en el complejo adsorbente. Los suelos sódicos típicamente no poseen salinidad, es decir la conductividad eléctrica es $<4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, y se caracterizan por una reacción alcalina. Sin embargo, existen transiciones con suelos salinos, que reúnen aspectos de salinidad y sodicidad.

La alta proporción de sodio en el complejo adsorbente provoca los siguientes inconvenientes en suelos:

- (i) una reacción fuertemente alcalina, correspondiente al sistema buffer de Na, con pH encima de 8.5, lo que genera problemas de nutrición con ciertos elementos y de toxicidad;
- (ii) una baja estabilidad estructural, debido a la fuerte dispersión de partículas por Na^+ , resultando en problemas de aireación y de permeabilidad;

Los parámetros de evaluación son el porcentaje de sodio intercambiable (*PSI*) respectivamente la suma de sodio y magnesio intercambiable, y el pH (criterios usados por la Base Referencial, IUSS Working Group WRB 2014), mientras que la escuela norteamericana (Soil Survey Division Staff 1993) prefiere la relación de adsorción de sodio (*RAS*) en el extracto de saturación:

$$PSI = \frac{Na_{int}^+}{CIC} \times 100 \quad [\%] \quad \text{complejo adsorbente}$$

$$RAS = \frac{Na_{aq}^+}{\sqrt{\frac{Ca_{aq}^{2+} + Mg_{aq}^{2+}}{2}}} \quad \text{solución del suelo}$$

PSI	porcentaje de sodio intercambiable [%];
Na_{int}^+	sodio intercambiable [$cmol_c/kg$];
RAS	relación de adsorción de sodio [$\sqrt{cmol_c/L}$];
Na_{aq}^+	sodio en la solución del suelo [$cmol_c/L$];
Ca_{aq}^{2+}	sodio en la solución del suelo [$cmol_c/L$];
Mg_{aq}^{2+}	sodio en la solución del suelo [$cmol_c/L$];

Los criterios de sodicidad se usan en la clasificación de suelos a distintos niveles, así que del nombre taxonómico se pueden deducir los grados de sodicidad. El suelo sódico típico es el *Solonetz*, que posee un horizonte nátrico, es decir un horizonte B_{in} de acumulación iluvial de arcilla y una elevada proporción de Na intercambiable (IUSS Grupo de Trabajo WRB 2007):

Horizonte nátrico

Identificación en el campo. El color del horizonte nátrico va de pardo a negro, especialmente en la parte superior. La estructura es columnar o prismática gruesa, a veces en bloques o masiva. Son características las cabezas redondeadas de los elementos estructurales y con frecuencia de color blancuzco.

Ambas características de color y estructurales dependen de la composición de los cationes intercambiables y el contenido de sales solubles en las capas subyacentes. Con frecuencia ocurren cutanes de arcilla gruesos y de color oscuro, especialmente en la parte superior del horizonte. Los horizontes nátricos tienen una estabilidad de agregados pobre y muy baja permeabilidad en mojado. Cuando seco el horizonte nátrico se vuelve duro a extremadamente duro. La reacción del suelo es fuertemente alcalina; el pH (H_2O) es mayor de 8.5.

Características adicionales. Los horizontes nátricos se caracterizan por un alto pH(H_2O) el que frecuentemente es mayor de 9.0. Otra medida para caracterizar al horizonte nátrico es la relación de adsorción de sodio (RAS) que debe ser 13 o más. El RAS se calcula a partir de datos de la solución del suelo (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} expresados en $mmolc/litre$): $RAS = Na^+ / [(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{0.5}$.

Micromorfológicamente, los horizontes nátricos muestran una fábrica específica. El plasma peptizado muestra una fuerte orientación en un patrón de mosaico o estriado paralelo. Las separaciones plásmicas también muestran un alto contenido de humus asociado. Cuando el horizonte nátrico es impermeable aparecen microcostras, cutanes, pápulas y rellenos.

Para otros suelos, las definiciones de *elementos formativos* de los taxones proporcionan una buena guía para la evaluación de la sodicidad (IUSS Working Group WRB 2014):

Sodic (so): having ≥ 15 % exchangeable Na plus Mg and ≥ 6 % exchangeable Na on the exchange complex, in a layer ≥ 20 cm thick, starting ≤ 100 cm from

the soil surface and not having a natric horizon starting ≤ 100 cm from the soil surface.

Argisodic (as): having an argic horizon, starting ≤ 100 cm from the soil surface, that has ≥ 15 % exchangeable Na plus Mg and ≥ 6 % exchangeable Na on the exchange complex throughout or within its upper 40 cm, whichever is thinner.

Protosodic (qs): having ≥ 6 % exchangeable Na on the exchange complex, in a layer ≥ 20 cm thick, starting ≤ 100 cm from the soil surface and not having a natric horizon starting ≤ 100 cm from the soil surface.

3.2.5.3. Otras adversidades

Sin entrar en detalle, se deja aquí constancia del gran potencial de los criterios y la nomenclatura usados en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB 2007; IUSS Working Group WRB 2014).

Igual que en el caso de la salinidad y sodicidad, los nombres taxonómicos y sus connotaciones revelan p.ej. condiciones extremas de acidez, altos tenores de aluminio en el complejo adsorbente (\rightarrow toxicidad de aluminio), presencia de sustancias tóxicas, etc. Así que la existencia de mapas de suelos, con su correspondiente taxonomía, nos ayuda en la detección de condiciones adversas.

3.2.6. Sinopsis, procesamiento y diferenciación de la evaluación de la función biológica

Las secciones anteriores demuestran, que para los diferentes criterios o subfunciones que definen la calidad del suelo como factor de sitio de la vegetación, se ofrecen diversos parámetros que se pueden usar para su evaluación.

De acuerdo con el contexto ambiental y la variación de los suelos en el área de estudio, se definen los parámetros que mejor puedan calificar los criterios considerados. A su vez, la escala del estudio, los recursos y la base de información disponible determinan, si se pueden usar parámetros directos o si se tienen que aproximar la evaluación del criterio mediante parámetros indirectos. Fig. 3.10 muestra el esquema de evaluación propuesta aquí, con la selección de parámetros directos e indirectos.

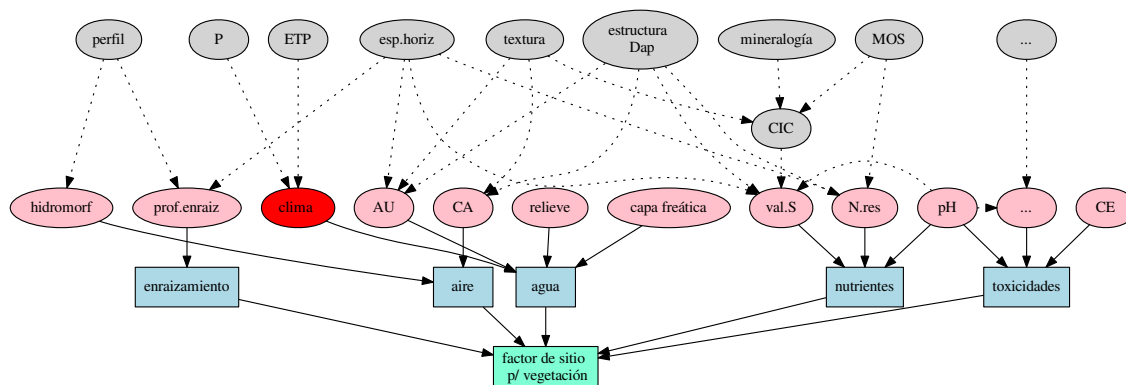


Figura 3.10: Criterios y parámetros para evaluar la función biológica del suelo (sin clima) o del sitio. El esquema muestra un conjunto posible de aspectos. (niveles desde abajo para arriba: función a evaluar, criterios y parámetros; ver explicaciones en el texto)

Con fines de obtener una visión completa de todos los criterios y posibles parámetros de evaluación disponibles, se recomienda asentar los datos en la ficha de descripción y evaluación ecológica de suelos (fig. A.2, pág. 96) y en el cuadro sinóptico A.5, pág. 97, en el anexo.

Respecto al procedimiento de evaluación, se propone el esquema de fig. 3.2, pág. 43, que permite, en términos generales, una valoración de la función de factor de sitio, tanto para vegetación natural como para cultivos y forestaciones. Al mantener de forma diferenciada la evaluación de los criterios individuales, se detectan fácilmente valores extremos, tanto mínimos como máximos. De esta manera, se pueden identificar sitios especiales o extremos, que posiblemente se relacionan con una biocenosis especial.

3.2.6.1. Ajuste de la evaluación de la función biológica del suelo por otros factores de sitio

Cabe aclarar aquí, las opciones de incluir o no los factores clima y capa freática profunda:

- función biológica netamente referida al potencial del suelo, sin incluir clima y capa freática: función biológica del suelo \Rightarrow **fb.suelo**;
- función biológica del sitio (incluyendo clima y capa freática profunda): \Rightarrow **fb.sitio**;

En el caso de reducir la evaluación de la función biológica en una primera instancia netamente al suelo mismo (fb.suelo), no integrando el factor clima y la capa freática, se propone aquí el siguiente árbol de decisión, para corregir la función biológica en base a estos factores, llegando a la evaluación de la función biológica de sitio (fb.sitio), integrando el aspecto clima.

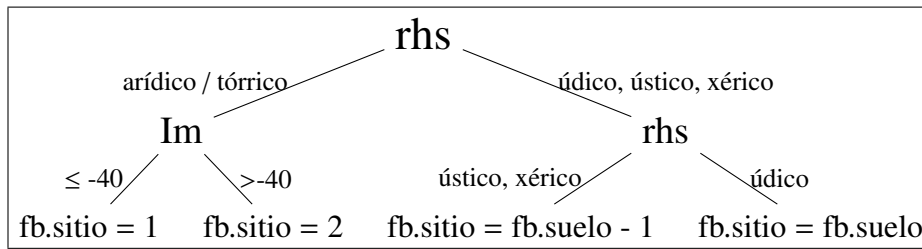


Figura 3.11: Árbol de decisión para el ajuste de la función biológica a nivel de sitio (fb.sitio), partiendo de la función biológica del suelo (fb.suelo), incluyendo el factor de la humedad climática (rhs = régimen de humedad del suelo; Im = índice de humedad climática según Thornthwaite)

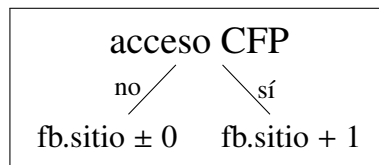


Figura 3.12: Ajuste de la función biológica a nivel de sitio (fb.sitio), para zonas (semi)áridas y acceso de la vegetación a una capa freática profunda (CFP, >5 - 15 m; al alcance de ciertas especies leñosas)

3.3. Los suelos como hábitat de la vegetación natural

Como demostrado en el apartado anterior, el procesamiento de la evaluación detallada del suelo como factor de sitio brinda una visión detallada respecto a los diferentes criterios considerados. De tal manera permite, aparte de determinar la potencialidad de la producción biológica, detectar condiciones limitantes y extremas, que posiblemente ya indican la presencia de ambientes extremos o raros.

Con la idea de realizar una evaluación que apunta al valor integral de un ambiente natural, en cuanto a cuestiones de preservación y protección, al criterio de un sitio especial (raro y/o extremo) se agrega el aspecto del grado de naturalidad de paisaje y suelo, correspondiente a los factores ambientales. De tal manera, se podría avanzar según el esquema en fig. 3.13

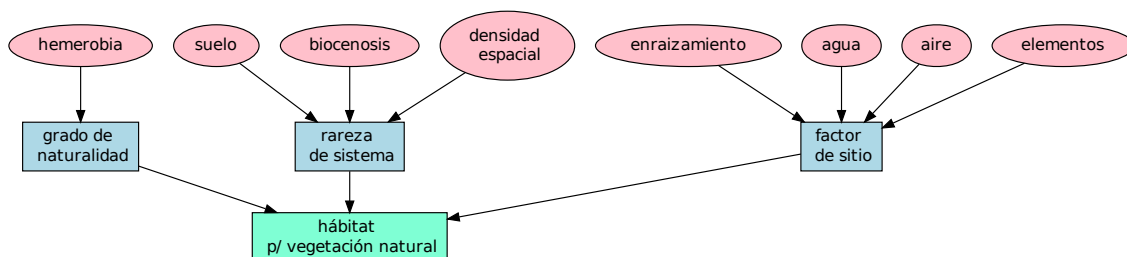


Figura 3.13: Esquema para la evaluación de la función del suelo como hábitat de la vegetación natural (niveles desde abajo para arriba: función a evaluar, criterios, sub-criterios)

El criterio de grado de naturalidad se evalúa basada en la escala de hemerobia (cuadro 2.3, pág. 17), mientras que para la valoración de sitio extremo se usa el procedimiento elaborado en la sección anterior (fig. 3.2, pág. 43). Los parámetros a usar para los sub-criterios que circunscriben el aspecto de rareza, se deberían establecer según el contexto ambiental, considerando los componentes vegetación (o biota) y suelos, enfocando su ocurrencia en el área de estudio.

El esquema adoptado aquí es similar al usado por el *Berlin Environmental Atlas* (Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014). Este mismo propone la siguiente clave de evaluación (cuadro 3.22), la que habría que ajustar de acuerdo con las condiciones en un contexto local de análisis.

Cuadro 3.22: Ejemplo de la evaluación del suelo como hábitat de la vegetación natural, según los criterios rareza, condición de sitio extremo y grado de naturalidad (según Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) 2014)	tipo de sitio	grado de naturalidad			
		4	3	2	1
	sitio raro	4	3	2	2
	sitio extremo (humedal)	4	3	2	2
	sitio extremo (seco y pobre)	3	3	3	3
	no especial	3	2	2	2

Capítulo 4

Evaluación de las funciones de regulación

Las funciones edáficas presentadas en este capítulo se refieren a la regulación de elementos, materia y energía en el ambiente. Dada su importancia respecto a la temática de riesgos ambientales y la calidad ambiental en general, la capacidad de regulación del balance de agua del paisaje recibe especial interés.

Cabe aclarar, que el rol de los suelos en la función paisajística de regular la diversidad biológica y de sistemas, se atiende en la función biológica de espacio de vida.

4.1. Regulación del balance de agua de paisajes

Los suelos desempeñan un rol sumamente importante en la regulación del balance de agua del paisaje, debido a su característica de ser un sistema poroso. El efecto regulador del suelo en el ciclo de agua se puede expresar mediante el balance de agua total, en el cual la capacidad de retención de agua del suelo modifica tanto la evapotranspiración como el drenaje superficial y en profundidad:

$$P + AC + ET_r + \Delta R + E_{sc} + Dr = 0 \quad (4.1)$$

$$P + AC = ET_r + \Delta R + E_{sc} + Dr \quad (4.2)$$

con

$$\Delta R = R_{t2} - R_{t1} \quad (4.3)$$

P	precipitación [mm];
AC	ascenso capilar [mm];
ET_r	evapotranspiración real [mm];
ΔR	cambio de reserva de agua en el suelo [mm];
E_{sc}	escorrentía superficial [mm];
Dr	drenaje en profundidad [mm];

$$P + Ac = ET_r + \Delta R + E_{sc} + Dr$$

Las diferentes subfunciones que participan en esta función de regulación (fig. 4.1) permiten reducir la escorrentía superficial y la inundación, al permitir la entrada de agua en el suelo, al retenerla en el sistema poroso, disponerla parcialmente a la biota y así optimizar su uso productivo. Finalmente, se contribuye a la neoformación de los acuíferos, involucrando en este proceso además el de filtración de sustancias.

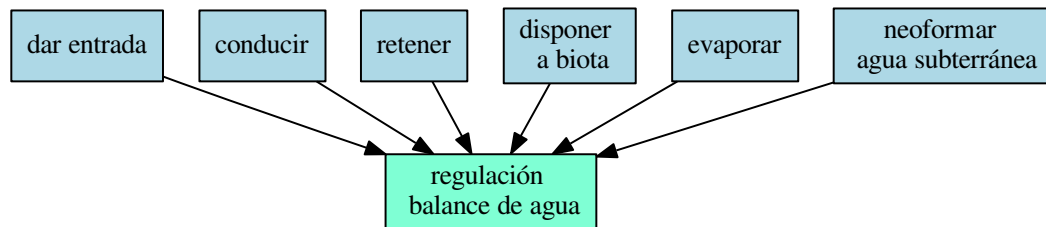


Figura 4.1: Función de regulación del balance de agua de paisajes - criterios o subfunciones principales

Cada una de las subfunciones o una combinación de ellas pueden ser tomadas como criterios de evaluación del rol de regulador del balance de agua del suelo. Desde la evaluación de parámetros edáficos individuales hasta la simulación del balance hídrico total, con la inclusión de datos climáticos, existe una amplia gama de esquemas y modelos de evaluación, de los cuales se presentan algunos en los siguientes apartados. Dada la importancia del balance de agua para las funciones biológicas y de filtro, algunos métodos se presentan en los capítulos correspondientes.

4.1.1. Infiltración y conducción de agua

La infiltración y la conducción interna de agua son procesos que determinan la redistribución del agua en el sistema, entre el drenaje externo por un lado y la captación del agua por el suelo.

Los parámetros generales fueron presentados en sección 2.3.2, pág. 27. Como mencionado en aquellos apartados, la conductividad hidráulica K_s puede ser tomada como un estimador conservador de la infiltración (estimador mínimo). La mayoría de los métodos de evaluación de la capacidad de regulación integran la conductividad hidráulica como un parámetro primario.

4.1.2. Capacidad de retención de agua, captación temporaria de agua

El almacenamiento de agua del suelo constituye una calidad importante en el balance de agua, determinando el uso para la evapotranspiración y la proporción de drenaje en profundidad. Representa a su vez un compartimento que atenúa los picos de flujos en la redistribución del agua en el paisaje.

Como descriptores del almacenamiento se usan la capacidad de campo (CC) o la capacidad de agua útil (AU), calculados hasta la profundidad de enraizamiento o hasta 1 metro de profundidad, como la cantidad de agua retenida (L/m^2). Dado que el contenido de humedad del suelo oscila principalmente entre los límites del punto de marchitez (pF 4.2) y de la capacidad de campo (pF 1.8), se prefiere considerar la capacidad de agua útil como parámetro.

La definición de estas fracciones, su estimación y evaluación son tratados en el apartado 2.3, pág. 21.

En cuanto a la captación temporaria y conducción rápida de agua, algunos métodos consideran también la fracción de macroporos, correspondiente a la capacidad de aire (CA , $\phi > 50 \mu m$), cuantificada en (L/m^2).

4.1.3. Evaluación de la capacidad de atenuación de drenaje superficial y en profundidad

La metodología presentada toma como criterio la capacidad del suelo de captar el agua de precipitación, mediante su almacenamiento y/o su conducción hacia la capa freática, reduciendo de esta manera la escorrentía (Ad-hoc-AG Boden 2007), y fue elaborada por el Ministerio de Medio Ambiente de una provincia de Alemania (Umweltministerium Baden-Württemberg 1995).

Como parámetros de entrada se usan la conductividad hidráulica saturada, la capacidad de agua útil y la capacidad de aire, aparte se considera la clase genética del suelo y características del perfil y la pendiente del terreno.

El procedimiento se lleva a cabo en 4 pasos:

(1) Definición de la sección de control del suelo en función de la clase genética del suelo

clase genética del suelo	sección de control
suelos con capa de agua estancada (hidromorfismo de superficie, <i>Stagnogley</i> , <i>Planosol</i> , <i>Stagnic</i> ...)	hasta límite superior del horizonte no permeable
turberas (suelos orgánicos, <i>Histosol</i>)	hasta nivel freático mínimo medio (≤ 1 m)
suelos con influencia de la capa freática (<i>Gleysol</i> , <i>Gleyic</i> ...)	hasta límite superior de horizonte de reducción (B_r o C_r)
suelos no hidromórficos	hasta límite inferior del solum (≤ 1 m)

(2) Determinación de la media ponderada de la conductividad hidráulica saturada

La conductividad de los horizontes individuales, en caso de no existir valores analíticos, se estiman mediante cuadro 2.10 (pág. 29). El valor medio se calcula como media armónica ponderada para toda la sección de control¹, según:

$$K_{sm} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{K_i}} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots}{\frac{h_1}{K_1} + \frac{h_2}{K_2} + \frac{h_3}{K_3} + \dots} \quad (4.4)$$

K_{sm} conductividad hidráulica saturada media [cm/d];
 n número de horizontes en la sección de control;
 h_i altura o espesor de horizontes individuales [cm];
 K_i conductividad hidráulica de horizontes individuales [cm/d];

(3) Determinación de la capacidad de almacenamiento de agua

a) Suelos con agua estancada, topografía llana (pendiente $<6\%$) o suelos en posición de relieve de escorrentía baja (pendiente $<6\%$):

$$CAA = AU + CA \quad (4.5)$$

CAA capacidad de almacenamiento de agua en la sección de control [L/m^2];
 AU capacidad de agua útil [L/m^2];
 CA capacidad de aire [L/m^2];

¹en caso de existir horizontes con $K_s < 1$ cm/d, la sección de control termina en el horizonte suprayacente a este;

b) Todos los otros suelos:

$$CAA = AU \quad (4.6)$$

CAA capacidad de almacenamiento de agua en la sección de control [L/m²];
AU capacidad de agua útil [L/m²];

Observación: para suelos muy profundos (>1 m) o suelos encima de un subsuelo muy permeable y valores de conductividad medianas ($K_s > 10$ cm/d) en todo el perfil, la *CAA* puede ser evaluada con una clase más alta.

(4) Evaluación de la función de regulación

a) Suelos encima de acuíferos de sedimentos no consolidados (limosos, arenosos, gravosos):

a) Suelos sin o con poca influencia de la capa freática (B_r o $C_r \geq 16$ dm de profundidad) y $K_s > 40$ cm/d en todos los horizontes, hasta una profundidad de más de 1 m:

⇒ clase 5 (muy alta);

b) Suelos sin o con poca influencia de la capa freática (B_r o $C_r \geq 16$ dm de profundidad) con horizontes de $K_s < 40$; cm/d, pero donde es de esperar que el agua de lluvia pueda infiltrar en un lugar próximo, debido a una variabilidad espacial de la conductividad a corta distancia:

⇒ clase 5 (muy alta);

b) Todos los otros suelos:

Cuadro 4.1: Evaluación de la función de regulación del balance de agua en función de la conductividad hidráulica media K_{sm} y la capacidad de almacenamiento de agua (*CAA*)^a (Umweltministerium Baden-Württemberg 1995)

K_{sm} [cm/d]	<i>CAA</i> [L/m ²]				
	< 50	50 - 90	90 - 140	140 - 200	> 200
≤ 7	2	2	2	2 - 3	3
7 - 15	2	2 - 3	3	3	4 - 5
15 - 30	2	3	3 - 4	4 - (5)	5
>30	2	3	4	5	5

^aclases: 1 muy baja, 2 baja, 3 regular, 4 alta, 5 muy alta; en caso de una pendiente del terreno de mayor a 18 %, se reduce la calificación por una clase

4.1.4. Evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua - métodos según TUSEC

La guía *TUSEC*, de Lehmann *et al.* (2013), ofrece diferentes métodos de evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua, con énfasis en diferentes criterios o subfunciones. Se presentan aquí dos diferentes métodos, en forma resumida. Para más información, se ruega consultar la fuente original.

4.1.4.1. Suelo como componente del ciclo de agua - el aspecto de calidad

Se presenta un método que toma como criterio la calidad y cantidad de la recarga del acuífero y la capacidad de infiltración, dando énfasis en la calidad de agua. En la clave de evaluación se refleja un criterio de óptimo, buscando un equilibrio entre conducción y retención de agua. De esta manera, se da una mejor valoración para una combinación específica de parámetros que da tiempo para procesos de interacción entre matriz y agua del suelo (→ filtración de sustancias).

criterio: calidad y cantidad de la recarga de agua subterránea y capacidad de infiltración; ponderando la calidad de agua;

parámetros: ...

primarios: conductividad hidráulica (K_s), capacidad de agua útil (AU);

secundarios: textura, estructura, densidad aparente, espesor de horizontes, contenido de *MOS*;

profundidad de evaluación: 1 m;

clave: ...

1. estimación de la conductividad hidráulica (en [cm/d]), para cada horizonte:

proporción de material grueso ($\phi \Rightarrow$ (i)

$>2\text{mm}) \geq 60\%$ -vol

horizonte de materiales mixtos, \Rightarrow (i)

$D_{ap} < 1.6 \text{ g/cm}^3$

horizonte de estructura granular o \Rightarrow (i)

subangular, $D_{ap} < 1.5 \text{ g/cm}^3$

todos los otros casos \Rightarrow (ii)

(i) $\Rightarrow K_s > 100$

(ii) $\Rightarrow K_s$ según fig. 2.6

o cuadro 2.10

\Rightarrow valor relevante: $\min(K_{s_1} \dots K_{s_n})$

2. cálculo de AU en $[L/m^2]$, para 1 m de profundidad:

$$\sum_{i=1}^n AU.cant = \sum_{i=1}^n AU.conc_i \times esp.horiz_i \times \frac{(100 - vol.piedras_i)}{100}$$

3. evaluación según cuadro 4.2

K_s [cm/d]	AU [L/m^2]			
	≤ 50	50 - 140	140 - 200	>200
≤ 5	1	1	2	3
5 - 10	1	2	3	4
10 - 20	2	3	4	5
20 - 50	1	2	3	4
>50	1	1	2	3

Cuadro 4.2: Evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua, con énfasis en la calidad de agua (método TUSEC Lehmann *et al.* 2013)

4.1.4.2. Suelo como componente del ciclo de agua - el aspecto de cantidad de agua

Como en el método anterior, se toma como criterio la calidad y cantidad de la recarga del acuífero y la capacidad de infiltración, dando énfasis en la cantidad de agua. Se parte del hecho, que en caso de abundantes lluvias, los macroporos (correspondiente a la capacidad de aire, CA) actúan temporalmente como receptor del agua. Se pondera entonces una rápida captación y conducción de agua, sin considerar la calidad del agua de percolación.

criterio: calidad y cantidad de la recarga de agua subterránea y capacidad de infiltración; ponderando la cantidad de agua;

parámetros: ...

primarios: conductividad hidráulica (K_s), capacidad de aire (CA);

secundarios: textura, estructura, densidad aparente, espesor de horizontes, contenido de MOS;

profundidad de evaluación: 1 m;

clave: ...

1. estimación de la conductividad hidráulica (en $[cm/d]$), para cada horizonte:

proporción de material grueso ($\phi > 2\text{mm}$) $\geq 60\%$ -vol	\Rightarrow (i)
horizonte de materiales mixtos, $D_{ap} < 1.6\text{ g/cm}^3$	\Rightarrow (i)
horizonte de estructura granular o subangular, $D_{ap} < 1.5\text{ g/cm}^3$	\Rightarrow (i)
todos los otros casos	\Rightarrow (ii)
(i)	$\Rightarrow K_s > 100$
(ii)	$\Rightarrow K_s$ fig. 2.6 o cuadro 2.10
\Rightarrow valor relevante: $\min(K_{s_1} \dots K_{s_n})$	

2. cálculo de CA en [L/m²], para 1 m de profundidad:

$$\sum_{i=1}^n CA.cant = \sum_{i=1}^n CA.pc_i \times esp.horiz_i \times \frac{(100 - vol.piedras_i)}{100}$$

3. evaluación según cuadro 4.3

	K_s [cm/d]	CA [L/m ²]			
		≤ 50	50 - 140	140 - 200	>200
Cuadro 4.3: Evaluación de la capacidad de regulación del balance de agua, con énfasis en la cantidad de agua - método TUSEC (Lehmann <i>et al.</i> 2013)	≤ 5	1	2	4	4
	5 - 20	2	3	5	5
	20 - 40	3	4	5	5
	40 - 100	4	5	5	5
	>100	5	5	5	5

4.2. Los suelos como sumideros de carbono

La edafosfera representa un compartimento grande en el contexto del ciclo de carbono, almacenando aproximadamente el triple del carbono que se encuentra en la biosfera y el doble del carbono en la atmósfera (Murck *et al.* 1996; Stevenson 1986). El proceso de secuestro de carbono en la materia orgánica es un proceso genérico, circunscripto al período del holoceno (cuadro 4.4).

La importancia de la evaluación de las reservas de carbono en el suelo se da principalmente por dos razones:

- la capacidad de regulación del ciclo de carbono, con vista en el cambio climático global;
- el análisis de la distribución de carbono en ecosistemas, estudiar aspectos del balance y la dinámica del ciclo y la sensibilidad y capacidad de restauración de ecosistemas.

Cuadro 4.4: Tasas medias de secuestro de carbono orgánico en suelos durante el holoceno (según Schlesinger (1990), en Batjes (1999))

ecosistema	fase de acumulación [10 ³ años]	tasa de acumulación [g C m ⁻² año ⁻¹]
desierto polar	8 - 9	0.2
tundra	9	1.1 - 2.4
bosques boreales	3 - 5	5.7 - 11.7
bosques templadas	2	0.7 - 2.5
selva tropical	4 - 8	2.3 - 2.5
estepas templadas	9	2.2

El criterio a tomar en cuenta es el almacenamiento de carbono en el suelo, hasta una profundidad, en lo posible, de mínimamente 1 m. Para la evaluación, se puede usar en forma directa la reserva de *MOS* en el suelo, de acuerdo con cuadro 2.17, pág. 34.

Capítulo 5

Función de filtro, buffer y transformador de suelos

Los suelos funcionan como filtros ambientales efectivos, en su más amplio sentido, protegiendo la calidad de agua, aire y de la cadena trófica. Se integran en esta función procesos de retención mecánica, adsorción en coloides, reacciones de precipitación y transformación química y la transformación biológica (fig. 5.1). A su vez, la relevancia e intensidad de cada uno de los procesos depende de las sustancias en consideración (fig. 5.2).

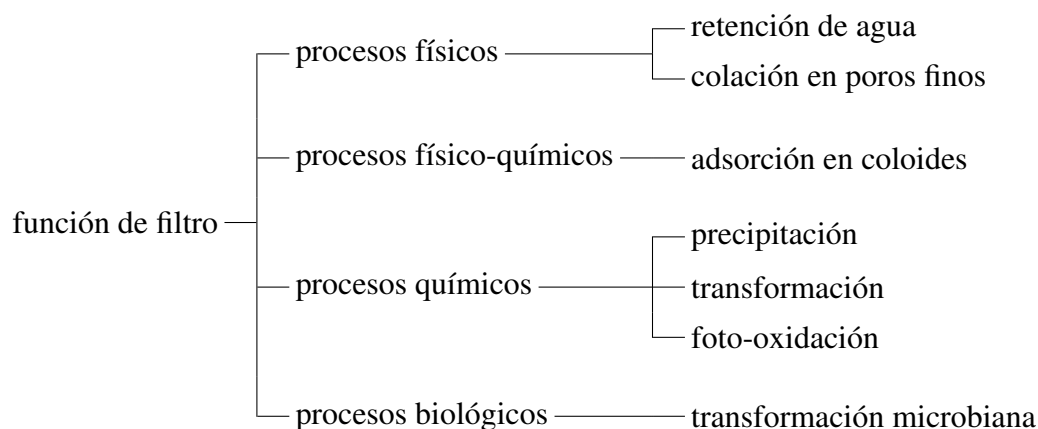


Figura 5.1: Posibles procesos parciales participando en la función de filtro del suelo

Respecto a los factores ambientales aparte del suelo, son el clima y la cercanía de la capa freática que son de especial interés, dado que controlan cuál es el marco temporal en el cual una sustancia nociva puede llegar a las aguas subterráneas.

De acuerdo con ello, la selección de los criterios para evaluar la función de filtro depende del contexto ambiental dado. Los conjuntos de parámetros que se toman en cuenta para evaluar estas funciones son, (i) respecto al suelo, el sistema poroso, el complejo adsorbente y la actividad microbiana; (ii) respecto a las sustancias, sus características

químicas, físicas y biológicas, y (iii) los parámetros ambientales como clima y profundidad de la capa freática (Ad-hoc-AG Boden 2007). Fig. 5.3 muestra una selección de los factores y parámetros más importantes a integrar en la evaluación.

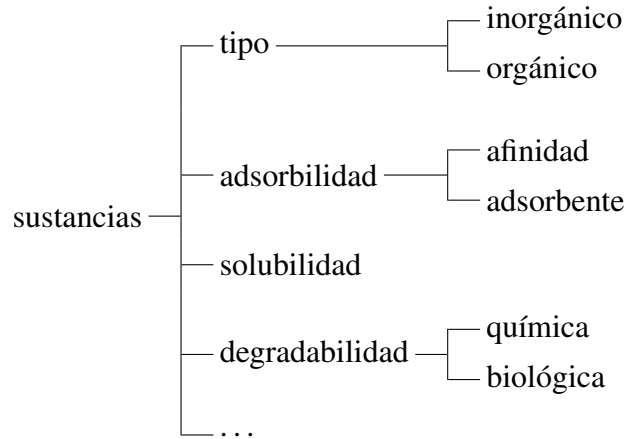


Figura 5.2: Características de sustancias, importantes para su consideración en el contexto de la función de filtro de suelos

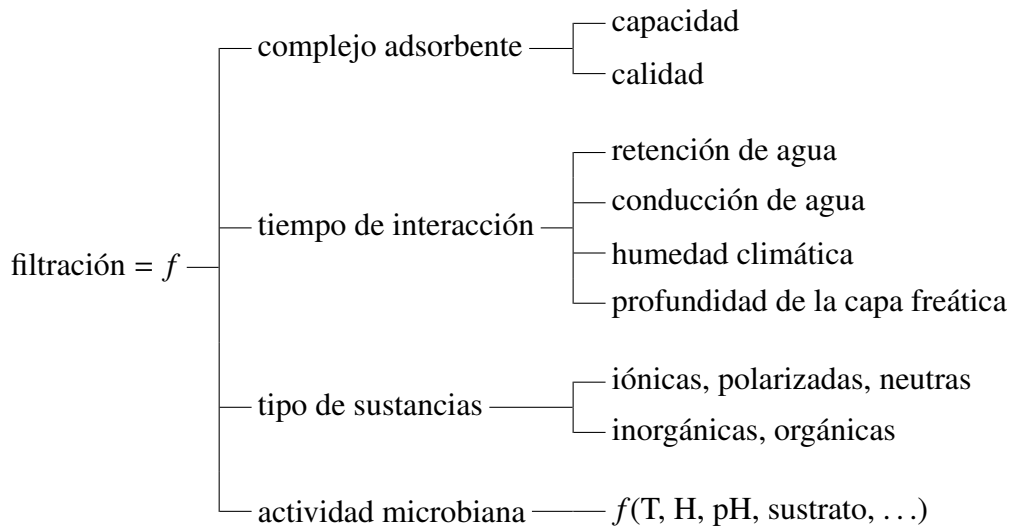


Figura 5.3: Factores y parámetros de la función de filtro

5.1. Métodos de evaluación

En una clave simple (cuadro 5.1), propuesta por H. Blume (1990b), se evalúan tres diferentes criterios respecto a la función de filtro: la filtración mecánica de sustancias gruesas,

la capacidad de adsorción de componentes coloidales y moleculares y la capacidad de transformación microbiana de sustancias xenobióticas.

Cuadro 5.1: Evaluación de la capacidad general de filtro, buffer y transformador del suelo (referencia: (i) + (ii) promedio, (iii) 3 dm superficiales) (según H. Blume 1990b)

evaluación	muy baja	baja	regular	alta	muy alta	extr. alta
<i>(i) filtración de sustancias gruesas ($\phi > 0.1 \mu\text{m}$)</i>						
AU ^a + 1/3	<15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 40	>40
CA ^b						
[% - vol]						
<i>(ii) filtración y amortiguación de sustancias coloidales y moleculares</i>						
superficie total	<10	10 - 50	50 - 100	100 - 200	200 - 300	>300
[m ² · cm ⁻³]						
<i>(iii) descomposición microbiana de sustancias xenobióticas (hasta 20 kg/ha)</i>						
tiempo	>156	156 - 52	52 - 18	18 - 6	6 - 1	<1
[semanas]						

^aagua útil

^bcapacidad de aire

Respecto al sistema coloidal del suelo, se deben tomar en cuenta el tipo de coloide y el pH, dado que este último define las características físico-químicas de su superficie.

En caso de no existir información analítica respecto al sistema coloidal, se pueden cuantificar las principales propiedades de los intercambiadores catiónicos en base al esquema en fig. 5.4 y cuadro 2.19, pág. 37.

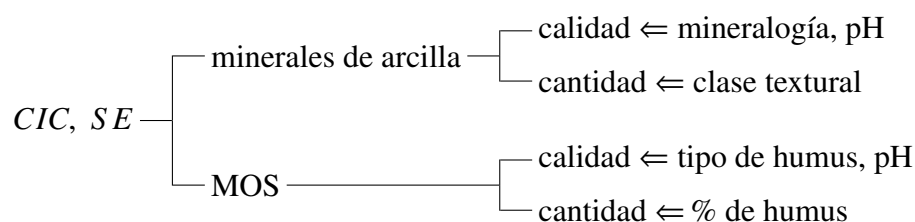


Figura 5.4: Estimación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y superficie específica (SE) en base a otros parámetros descriptivos del suelo

5.1.1. Capacidad de filtración de sustancias adsorbibles

A diferencia, la segunda clave (ver cuadro. 5.2) trata de evaluar más bien la capacidad de retener iones y coloides adsorbibles. Las características de filtración se deducen de propiedades mecánicas y físico-químicas que circunscriben la entrada y permanencia del agua en el suelo (\Rightarrow tiempo de reacción) y la capacidad del complejo adsorbente, importante para todos los procesos de adsorción.

Cuadro 5.2: Clases de efecto de filtro de horizontes o capas homogéneas para sustancias coloidales e iones en dispersión en función de la capacidad de aire (CA) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo (Ad-hoc-AG Boden 2005)

CA (poros $>50 \mu\text{m}$) [%-vol]	CIC1 <4	CIC2 4 - 8	CIC3 8 - 12	CIC4 12 - 20	CIC5 20 - 30	CIC6 ≥ 30
	[cmol _c /kg]					
	clases de efecto de filtro ^a					
<2	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5 - 6
2 - 5	2 - 3	3	3 - 4	4	4 - 5	5
5 - 13	2	2 - 3	3	3 - 4	4	4 - 5
13 - 26	1 - 2	2	2 - 3	3	3 - 4	4
>26	1	1 - 2	2	2 - 3	3	3 - 4

^a6 niveles: 1 = bajo, 2= bajo, 3 = regular, 4 = alto, 5 = muy alto, 6 = extremadamente alto; en caso de sustratos gravosos o agrietados el efecto filtro se reduce por 1 o 2 clases

5.1.2. Evaluación de la capacidad de transformación de sustancias xenobióticas

La capacidad de transformar sustancias orgánicas es estrechamente ligada con la actividad microbiana en el suelo. Debido a que la mayor actividad biológica se da en el primer o los primeros horizontes A, y que el ingreso de contaminantes orgánicos es típicamente por la superficie del suelo, la evaluación de esta función parcial se reduce a estos horizontes.

Como parámetros de caracterización de este criterio, se sugieren una medida directa de la actividad microbiana, el potencial de mineralización o respiración edáfica (*t.Cmin*), que integra aspectos de sustrato, actividad microbiana y factores inherentes como el pH o la salinidad. Adicionalmente, se consideran parámetros que condicionan la actividad microbiana *in situ*, como la aireación (CA, profundidad de la capa freática) y la retención de agua (AU).

Se propone el siguiente procedimiento:

Cuadro 5.3: Evaluación de la capacidad de filtro, subfunción capacidad de transformación biológica (filtro.CTB)

1. ¿Capa freática a ≤ 0.4 m?

sí \Rightarrow $filtro.CTB = 1$

no \Rightarrow pasar a paso 2;

2. Evaluar el potencial de mineralización (C_{min} , cuadro 2.18, pág. 35), la aireación (CA , cuadro 2.9, pág. 27) y la retención de agua disponible (AU , cuadro 2.9, pág. 27), para el horizonte A (1 a máx 3 dm). Calcular la clase media ponderada de las 3 evaluaciones (número entero):

parámetro	evaluación
$t.C_{min}$	1 ... 5
CA	1 ... 5
AU	1 ... 5
$filtro.CTB = \frac{3 \times t.C_{min} + CA + AU}{5}$	1 ... 5

5.1.3. Evaluación de la capacidad de transformación de sustancias orgánicas contaminantes - método TUSEC

Lehmann *et al.* (2013) proponen un método, que también toma el criterio de la capacidad microbiana de transformar sustancias orgánicas, pero se basa en parámetros indirectos, es decir los diferentes factores que condicionan la actividad microbiana en el suelo.

El método toma en consideración únicamente los horizontes superficiales (1 a 3 dm).

Criterio: capacidad de los microorganismos de transformar sustancias orgánicas contaminantes;

Parámetros: (por métodos de campo o datos analíticos)

- contenido de MOS ;
- tipo de estructura;
- pH;
- nivel de la capa freática;

Evaluación: según cuadro 5.4:

Cuadro 5.4: Evaluación de la capacidad de microorganismos de transformar sustancias orgánicas contaminantes - método TUSEC (adaptado de Lehmann *et al.* 2013)

clasificación del horizonte superficial	evaluación
<p>$\geq 10\%$ de <i>MOS</i> hasta los 30 cm de profundidad y estructura dominante de tipo granular o migajoso (si información disponible: agregados con $\phi \geq 2$ mm) y $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 5.5 - 7.5, capa freática por debajo de 0.4 m;</p>	5
<p>$\geq 10\%$ de <i>MOS</i> hasta los 10 cm de profundidad y estructura dominante de tipo granular o migajoso (profundidad de 3 cm suficiente, si el suelo ha sido usado para silvicultura solamente y nunca ha sido laboreado) y $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 5.0 - 8.0, capa freática por debajo de 0.4m;</p>	4
<p>$\geq 5\%$ de <i>MOS</i> hasta los 10 cm de profundidad y estructura dominante de tipo granular o migajoso y $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 5.0 - 8.0, capa freática por debajo de 0.4 m;</p>	3
<p>$\geq 5\%$ de <i>MOS</i> hasta los 10 cm de profundidad y estructura dominante de tipo subangular y $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 5.0 - 8.0, capa freática por debajo de 0.4 m;</p>	2
otros casos	1

Apéndice A

Anexo

Cuadro A.1: Clases de tamaños de partículas, según los sistemas de FAO y USDA

fracción	símbolo	límites (ϕ en μm)					
		FAO			USDA		
arena	A	2000	-	63	2000	-	50
arena muy gruesa	A _{mg}	2000	-	1000	2000	-	1000
arena gruesa	A _g	1000	-	630	1000	-	500
arena media	A _m	630	-	250	500	-	250
arena fina	A _f	250	-	100	250	-	100
arena muy fina	A _{mf}	100	-	63	100	-	50
limo	L	63	-	2	50	-	2
limo grueso	L _g	63	-	20	50	-	20
limo fino	L _f	20	-	2	20	-	2
arcilla	Ac	<2	-		<2	-	

Cuadro A.2: Clave para la estimación de la densidad aparente (D_{ap} en $[\text{kg}/\text{dm}^3]$) de suelos minerales (Schlichting *et al.* 1995)

características	estructuras frecuentes	D_{ap} estimada ¹
A) suelos limosos, franco-limosos, francos y arenosos (secos a frescos)		
1) muestra se desmenuza ya al sacar el material de la pared de la calicata, en la pared se observan muchos macroporos	grano suelto, migajoso, granular	0.9 - 1.2
2) muestra se desmenuza bajo leve presión en muchos fragmentos o partículas singulares	grano suelto, bloques subangulares, (y angulares)	1.2 - 1.4
3) cortaplumas penetra con facilidad al suelo, muestra se deshace en pocos fragmentos que pueden ser divididos en la mano	bloques subangulares y angulares, prismas, láminas	1.4 - 1.6
4) cortaplumas penetra difícilmente 1-2cm al suelo, muestra se deshace en pocos fragmentos que apenas se dejan dividir en la mano	prismas, láminas, de puente, (bloques angulares)	1.6 - 1.8
5) cortaplumas penetra al suelo sólo con mucha fuerza, muestra no se desmenuza	de puente, coherente, prismas	1.8 - 1.9
B) suelos franco-arcillosos y arcillosos (secos a frescos)		
1) al caer en el piso, la muestra se desmenuza en muchos fragmentos que se pueden subdividir bajo presión moderada	bloques angulares, fragmentos	1.0 - 1.2
2) al caer en el piso, la muestra se desmenuza en pocos fragmentos que se pueden dividir bajo moderada presión	bloques angulares, prismas, columnas, láminas, lenticular	1.2 - 1.4
3) al caer en el piso, la muestra apenas se desmenuza; subdivisión posible bajo presión fuerte	coherente, prismas, (columnas, bloques angulares)	1.4 - 1.6
4) al caer en el piso, la muestra no se desmenuza; subdivisión a mano apenas posible	coherente, prismas, columnas	1.6 - 1.7

¹ en caso de un contenido de materia orgánica de $>2\%$, disminuir la D_{ap} por $0.03 [\text{kg}/\text{dm}^3]$ por $\%$ de humus

Modelo diferenciado de evaluación de fracciones de agua / poros

En condiciones de buen drenaje, con capa freática profunda, aparte de los macroporos gruesos, los macroporos finos (*ma.P.f*, fig. A.1) se drenan en tiempos relativamente cortos y permite en ellos la circulación de aire, por lo cual la *CC* se ajusta aproximadamente en pF 2.5. A diferencia, en suelos de drenaje algo imperfecto, los macroporos finos drenan muy lentamente y la *CC* se estabiliza en este caso en aproximadamente pF 1.8. En función de ello, se pueden aplicar diferentes límites de potenciales para definir las fracciones de *CC*, *CA* y *AU* (fig. A.1), algo que se discute actualmente en los ámbitos de evaluación de suelos. Una propuesta, de acuerdo con (Ad-hoc-AG Boden 2008;

DIN 4220 2008), se presenta aquí:

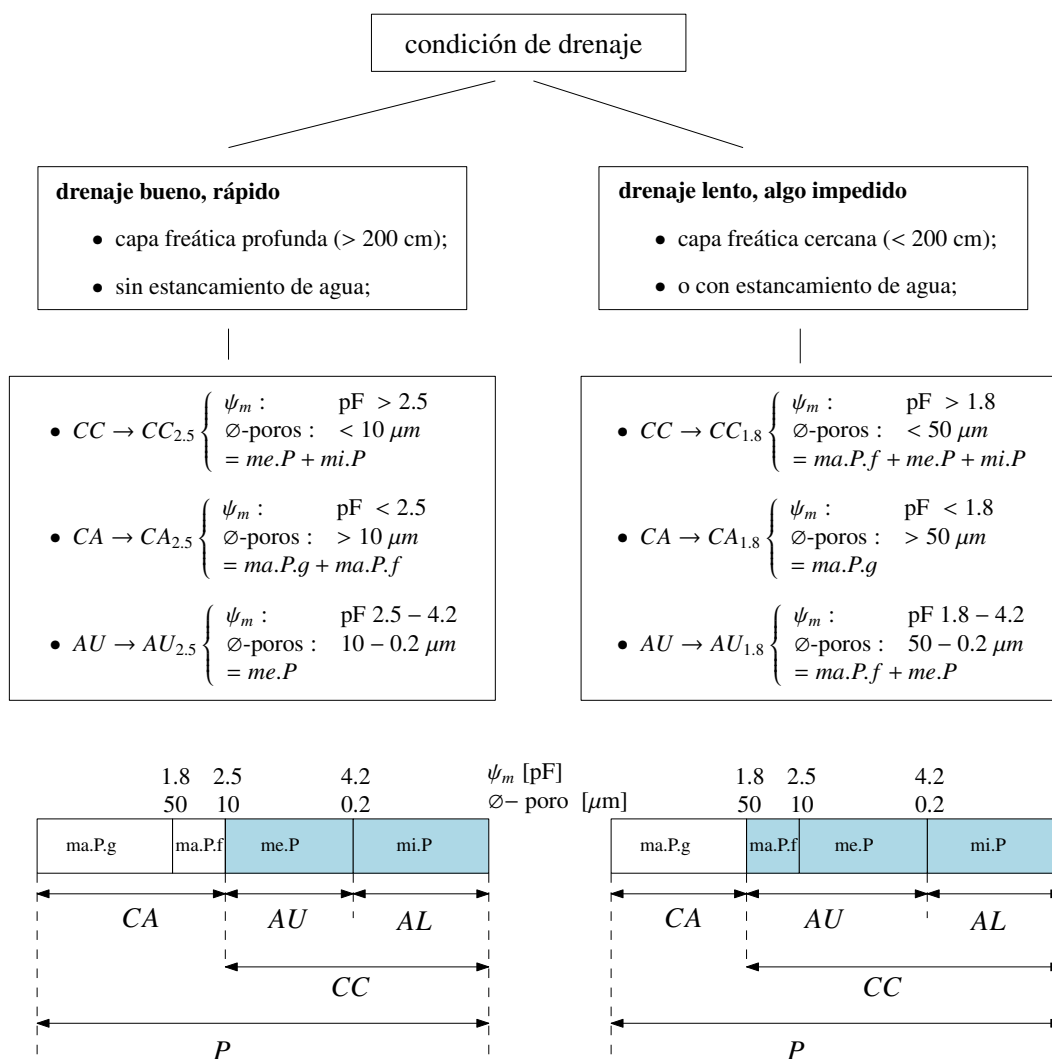


Figura A.1: Definición de los límites de las fracciones de agua de acuerdo con las condiciones de drenaje del suelo (*ma.P.g* = macroporos gruesos, *ma.P.f* = macroporos finos, *me.P* = mesoporos, *mi.P* = microporos)

Cuadro A.3: Estimación diferenciada de todas las fracciones de poros en función de clase textural (*WRB* o *USDA*) y densidad aparente (*Dap*): porosidad total (*P*), macroporos gruesos (*ma.P.g*), macroporos finos (*ma.P.f*), mesoporos (*me.P*), y microporos (*mi.P*); valores en [%- vol]; (Ad-hoc-AG Boden 2008, modificado p/ arena).

clase textural	<i>Dap</i> ^a	<i>P</i>				<i>ma.P.g</i> (> 50 μm)				<i>ma.P.f</i> (50 – 10 μm)				<i>me.P</i> (10 – 0.2 μm)				<i>mi.P</i> (< 0.2 μm)			
		1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5	1	2	3	4/5
arenoso (A)		56	49	42	37	39	35	32	27	-	-	-	-	-	-	-	-	8	5	3	3
arenoso fino (A.f)		-	50	45	35	-	34	31	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6	5	4
arenoso medio (A.m)		-	50	42	34	-	36	32	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	4	3
arenoso grueso (A.g)		-	50	41	35	-	38	33	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3	2
arenoso francoso (AF)		57	48	43	36	23	24	21	15	6	9	8	8	13	10	10	9	14	6	5	4
franco arenoso (FA)		58	50	42	35	25	19	14	9	8	8	7	6	14	13	12	11	10	10	9	9
< 10 % arcilla (FA.l)		57	50	42	36	26	19	15	11	9	10	8	6	14	12	11	12	9	9	7	7
> 10 % arcilla (FA.ac)		59	50	42	35	25	18	14	8	7	6	6	5	15	15	12	10	12	11	12	11
franco limoso (FL)		58	50	43	38	16	11	7	4	6	5	3	3	20	18	18	18	16	15	14	14
< 12 % arcilla (FL.a)		57	49	43	38	14	11	8	4	8	6	6	6	23	19	18	18	13	13	11	11
> 12 % arcilla (FL.ac)		58	50	43	38	16	11	7	4	6	5	3	2	19	18	18	18	16	15	15	14
limoso (L)		54	49	43	38	12	8	6	2	9	8	5	4	22	21	22	21	11	12	11	10
franco (F)		59	50	43	36	20	14	10	6	10	5	4	2	14	15	13	12	15	16	15	15
franco arcillo arenoso (FAcA)		56	52	43	35	10	10	9	6	6	1	0	2	19	22	15	10	21	19	18	17
franco arcilloso (FAc)		58	50	43	37	10	9	7	4	2	0	1	1	20	15	12	10	26	25	24	22
franco arcillo limoso (FAcL)		61	50	43	38	13	9	6	3	5	2	2	2	16	15	12	9	27	24	24	24
arcillo arenoso (AcA)		57	52	43	36	7	6	4	4	5	3	2	6	16	15	9	2	29	28	28	24
arcillo limoso (AcL)		57	51	44	49	5	5	4	3	2	2	2	1	18	13	10	8	33	31	29	27
arcilloso (Ac)		58	50	45	39	5	4	3	4	1	1	2	4	20	13	10	8	32	32	30	23
< 60 % arcilla (Ac.f)		58	50	44	39	7	5	3	4	1	1	2	4	18	14	10	8	32	31	29	23
> 60 % arcilla (Ac.ac)		62	51	46	40	3	3	2	4	4	2	2	12	22	12	10	0	33	35	32	24

^a*Dap* en 5 clases: 1 = muy baja (<1.2 g/cm³), 2 = baja (1.2 - 1.4 g/cm³), 3 = media (1.4 - 1.6 g/cm³), 4/5 = alta a muy alta (>1.6 g/cm³)

		K_s (clase)				
		1	1.2	1.4	1.6	1.8
D_{ap} [kg/dm ³]	clase textural					
	inglés					
	español					
S	A	6	6	6	5	4
LS	AF	5	5	5	4	3
SL	FA	5	4	4	3	3
SCL	FAcA	5	4	3	3	2
SC	AcA	5	5	5	4	3
SiL	FL	5	4	3	2	2
SiCL	FAcL	4	3	3	2	2
SiC	AcL	4	3	2	2	2
Si	L	5	4	3	3	2
CL	FAc	4	3	3	2	2
L	F	4	3	3	2	2
C	Ac	5	4	3	2	2
HC	Ac.ac	4	3	3	2	2

Cuadro A.4: Estimación de la conductividad hidráulica (K_s , en clases), en función de clase textural y densidad aparente (adaptado de Lehmann *et al.* 2013)

descripción del suelo

perfil N°: _____ mapa N°: _____ paisaje: _____

lugar: _____ uso de la tierra: _____

fecha: autor: _____ relieve (posición, forma): _____ tiempo actual: _____ vegetación: _____

altura: _____ m snm exposición: _____ mm ø P: _____ °C drenaje: 0 m. escaso 2 imperfecto 4 bueno 6 exc.

escurrimiento: 0 nulo 1 m. bajo 2 bajo 3 medio 4 alto 5 m. alto 6 extr. alta 1 escaso 3 mod. bueno 5 alg. exc.

permeabilidad: 1 m. baja 2 baja 3 regular 4 alta 5 m. alta 6 extr. alta freq. de anegamiento: _____

prof [cm]	textura	rocos Vol-%		pH	humus		pF	estructura		poros	estab. estruct.	densidad aparente	raíces	límite	horizonte
		color (húmedo/seco)	Munsell		nombre	CaC12		m-%	m-%							formas especiales	(tipo, clase, grado)

prof. del solum _____ cm sales / álcali: 0 1 2 3 4 forma de humus: _____

prof. de enraizamiento efectivo: _____ cm tipo de suelo: _____

evaluación ecológica

espe-sor dm	arraigab.	porosidad total Vol-%	evaluación	capacidad de aire (CA) Vol-%	evaluación	agua útil (AU)		Capacidad de campo (CC) Vol-%	evaluación	CIC	valor S	humus	valores ponderados		S	Nt	Ni	Ndisp
						fact	pond						fact	pond				

prof. límite de enraizamiento: _____ cm mecánica fisiológica

causa: _____

evaluación: _____

erodibilidad (A) _____

valor k: _____ evaluación: _____

Tasa de ascenso capilar: _____
 x _____ días = _____ l/m²

Σ CC: (hasta 1m max) _____ l/m²
 evaluación: _____

Σ AU (hasta 1m max): _____ l/m²
 evaluación: _____

Σ totales (hasta max 1m):
 Σ humus: _____ kg/m²
 Σ Ni: _____ kg/m²
 Σ S: _____ mol_e/m²
 Σ Nt: _____ kg/m²
 Σ N disp: _____ g/m²

Figura A.2: Ficha edáfica sintética para registrar los datos de observación in situ de suelo y ambiente y de la evaluación ecológica del suelo

Cuadro A.5: Cuadro sinóptico de valores de parámetros y su evaluación, para los diferentes criterios considerados en la función biológica

<i>nombre del sitio y suelo</i>				
<i>criterio / parámetro</i>	<i>horizontes</i>	<i>profundidad</i>	<i>valor</i>	<i>evaluación</i>
<i>espacio de enraizamiento</i>				
a) densidad aparente [kg/dm ³]	_____	_____	—	_____
b) densidad de empaque [kg/dm ³]	_____	_____	—	_____
c) profundidad de enraizamiento [cm]	_____	_____	—	_____
d) otros	_____	_____	—	_____
evaluación integral = $f(\text{_____})$				
<i>balance de aire</i>				
a) porosidad total [% - vol]	_____	_____	—	_____
b) capacidad de aire [% - vol]	_____	_____	—	_____
c) hidromorfismo	_____	_____	—	_____
d) otros	_____	_____	—	_____
evaluación integral = $f(\text{_____})$				
<i>balance de agua</i>				
a) conductividad hidráulica [cm/d]	_____	_____	—	_____
b) capacidad de campo, CC [L/m ²]	_____	_____	—	_____
c) auga útil, AU [L/m ²]	_____	_____	—	_____
d) aporte de agua = $f(\text{relieve})$	_____	_____	—	_____
e) aporte de agua = $f(\text{capa freática})$	_____	_____	—	_____
f) $AD_{s.cl} = f(\text{suelo, clima})$	_____	_____	—	_____
g) $AD = f(\text{suelo, clima, relieve, capa freática})$	_____	_____	—	_____
h) otros	_____	_____	—	_____
evaluación integral = $f(\text{_____})$				
<i>balance de elementos</i>				
a) forma de humus	_____	_____	—	_____
b) materia orgánica [%]	_____	_____	—	_____
c) materia orgánica, [kg/m ²]	_____	_____	—	_____
d) N orgánico [kg/m ²]	_____	_____	—	_____
e) N disponible [kg/m ²]	_____	_____	—	_____
f) P disponible [kg/m ²]	_____	_____	—	_____
g) CIC [mmol _c /kg]	_____	_____	—	_____
h) saturación de bases [%]	_____	_____	—	_____
i) valor S [mol _c /m ²]	_____	_____	—	_____
j) CaCO ₃ [%]	_____	_____	—	_____
k) pH _{CaCl₂}	_____	_____	—	_____
l) otros	_____	_____	—	_____
evaluación integral = $f(\text{_____})$				
<i>toxicidades</i>				
a) salinidad, CE [mS/cm]	_____	_____	—	_____
b) sodicidad, PSI [%]	_____	_____	—	_____
c) metales pesados	_____	_____	—	_____
d) aluminio	_____	_____	—	_____
e) otros	_____	_____	—	_____
evaluación integral = $f(\text{_____})$				

Bibliografía

- Abrol, I., J. Yadav y F. Massoud (1988). *Salt-affected soils and their management*. FAO Soils Buletin 39. Rome: Food y Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- AG Boden (1996). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 4^o. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter Deutschland. 392 págs.
- AG Bodenkunde (1982). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 3^o. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter Deutschland. 331 págs.
- Arbeitskreis Standortskartierung in der Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung (1980). *Forstliche Standortsaufnahme*. 4.^a ed. Münster-Hiltrup, Germany: Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, pág. 188.
- BAM (2001). *Exigencias para la toma de muestras, el manejo de muestras y los métodos químicos de investigación y análisis para propiedades federales (EPTMyMIA)*. autores individuales: (Bannert, M. Berger, W. Fischer, H. Horchler, D. Keese, K. Lehnik-Habrink, P. Lück, D. Pritzkow, J. Win, T.) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Berlin, Germany.
- Bastian, O. (1997). «Gedanken zur Bewertung von Landschaftsfunktionen - unter besonderer Berücksichtigung der Habitatfunktion». En: *NNA-Berichte* 10, págs. 106-125.
- Bastian, O., K. Grunewald y D. Haase (2010). «Linking ecosystem functions and ecosystem services». En: *Salzau Conference on Solutions for Sustaining Natural Capital and Ecosystem Services*. Kiel.
- Batjes, N. (1999). *Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil*. Report 410-200-031, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change & Technical Paper 30, Wageningen. Wageningen.
- Bertrand, G. (1978). «Le paysage entre la nature et la société». En: *RGPSO* 49, págs. 239-258.
- Blume, H.-P. y H. Sukopp (1976). «Ökologische Bedeutung anthropogener Bodenveränderung». En: *Schriftenreihe Vegetationskunde* 10, págs. 75-89.
- Blume, H. (1990a). «Anthropogene Böden». En: *Handbuch des Bodenschutzes*. Ed. por H. Blume. Landsberg: Ecomed-Verlag, págs. 458-473.
- (1990b). «Böden als Filter, Puffer und Transformatoren». En: *Handbuch des Bodenschutzes*. Ed. por H. Blume. Landsberg: Ecomed-Verlag, págs. 96-105.
- (1990c). «Einführung». En: *Handbuch des Bodenschutzes*. Ed. por H. Blume. Landsberg: Ecomed-Verlag, págs. 1-3.
- ed. (1990d). *Handbuch des Bodenschutzes*. Landsberg: Ecomed-Verlag, pág. 686.

- Burel, F. y J. Baudry (2002). *Ecología del paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. Madrid, Spain: Ediciones Mundi-Prensa. 353 págs.
- Burgos, J. y A. Vidal (1951). «Los climas de la república Argentina, según la nueva clasificación de Thornthwaite». En: *Meteoros* 1, págs. 3-32.
- Comisión de las Comunidades Europeas (2006). *Propuesta de directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco para la protección del suelo y se modifica la Directiva 2004/35/CE*. COM(2006) 232 final. Bruselas: Unión Europea.
- Consejo de Europa (2000). *Convenio europeo del paisaje*. Florencia.
- DIN 4220 (2008). *Pedologic site assessment - Designation, classification and deduction of soil parameters (normative and nominal scaling) (in German)*. Inf. téc. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Doran, J., D. Coleman, D. Bezdiek y B. Stewart, eds. (1994). *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Special Publication 35. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc. 244 págs.
- Doran, J. y A. Jones, eds. (1996). *Methods for assessing soil quality*. SSSA Special Publication 49. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America. 410 págs.
- Doran, J. y T. Parkin (1996). «Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set». En: *Methods for assessing soil quality*. Ed. por J. Doran y A. Jones. SSSA Special Publication 49. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America.
- FAO (2006). *Guidelines for soil description*. 4.^a ed. Rome: Food y Agriculture Organization of the United Nations. 97 págs.
- (2009). *Guía de descripción de suelos*. 4.^a ed. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 99 págs.
- Federal Soil Protection Act (1998). *Section 1. Act on protection against harmful changes to soil and on rehabilitation of contaminated sites (Federal Soil Protection Act - BBodSchG)*. Federal Law Gazette I, p. 502, Bonn, Germany.
- Forman, R. y M. Godron (1986). *Landscape ecology*. New York: John Wiley & Sons.
- Gavaud, M. (1977). «Essai sur la classification génétique des sols». En: *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique* 15, págs. 63-87.
- Gerstenberg, J. (2013). *Erstellung von Karten zur Bewertung der Bodenfunktionen*. Inf. téc. Berlin: im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt III F, Berlin.
- Gerstenberg, J., W. Siewert y U. Smettan (2007). *Catalogue of models and measures for professional soil protection in Berlin*. Inf. téc. Berlin: on behalf of the Senate Department for Health, Environment y Consumer Production.
- Hill, M. O., D. B. Roy y K. Thompson (2002). «Hemeroby, urbanity and ruderality: bioindicators of disturbance and human impact». En: *Journal of Applied Ecology* 39, págs. 708-720.
- Ad-hoc-AG Boden (2003). *Methodenkatalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Gefahr der Entstehung schädlicher Bodenveränderungen sowie der Nutzungsfunktion "Rohstofflagerstätte" nach BBodSchG*. Inf. téc. Hannover: Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. 438 págs.

- (2007). *Methodenkatalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Gefahr der Entstehung schädlicher Bodenveränderungen sowie der Nutzungsfunktion "Rohstofflagerstätte" nach BBodSchG sowie der Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Erosion und Verdichtung*. Inf. téc. Hannover: Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- (2008). *Die bodenartenspezifischen Kennwerte der KA5*. Inf. téc. Hannover: Ad-hoc-AG Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Hochfeld, B., A. Gröngroft y G. Miehl (2003). *Grossmassstäbige Bodenfunktionsbewertung für Hamburger Böden. Verfahrensbeschreibung und Begründung*. Inf. téc. Hamburg, Germany: Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg.
- ISSS Working Group RB (1998). *World Reference Base for Soil Resources*. World Soil Resources Reports 84. Rome: FAO, ISRIC, ISSS. 88 págs.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007*. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos 103. Roma: FAO, ISRIC, ISSS. 117 págs.
- IUSS Working Group WRB (2014). *World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. World Soil Resources Reports 106. Rome: FAO. 181 págs.
- Jahn, R. (1992). *Praktikumsanleitung zur Beschreibung, Deutung und ökologischen Bewertung von Böden*. Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim. Hohenheim, Deutschland.
- Jalas, J. (1955). «Hemerobe und hemerochore Pflanzenarten. Ein terminologischer Reformversuch». En: *Acta Societatis Pro Fauna et Flora Fennica* 72, págs. 1-15.
- Kiedrzyński, M., E. Kiedrzyńska, P. Witosłowski, M. Urbaniak y J. K. Kurowski (2014). «Historical Land Use, Actual Vegetation, and the Hemeroby Levels in Ecological Evaluation of an Urban River Valley in Perspective of Its Rehabilitation Plan». En: *Pol. J. Environ. Stud.* 23, págs. 109-117.
- Kim, Y.-M., S. Zerbe y I. Kowarik (2002). «Human impact on flora and habitats in Korean rural settlements». En: *Preslia, Praha* 74, págs. 407-419.
- Lehmann, A., S. David y K. Stahr (2013). *TUSEC - Bilingual-Edition: Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden (Deutsche Fassung). Technique for soil evaluation and categorization for natural and anthropogenic soils (English version)*. 2.^a ed. Hohenheimer Bodenkundliche Hefte 86. Universität Hohenheim.
- Lehmann, A. y K. Stahr (2010). «The potential of soil functions and planner-oriented soil evaluation to achieve sustainable land use». En: *Journal of Soils and Sediments* 10.6, págs. 1092-1102.
- Lorenz, G. (2005). *Métodos de análisis de suelos*. 1.^a ed. Serie Didáctica 12. Santiago del Estero, Argentina: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. 126 págs.
- Lorenz, G. y M. Izzo (2015). «Evaluación de funciones de paisaje de la zona periurbana sur de la ciudad de Santiago del Estero». En: *El paisaje: unidad natural funcional, dinámica y*

- resiliente. V Jornadas y II Congreso Argentino de Ecología de Paisajes. 27 - 29 de mayo 2015. Azul, Buenos Aires, págs. 154-156.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press.
- Mitlöchner, R. (1990). «Die Konkurrenz der Holzgewächse im regenrünen Trockenwald des Chaco Boreal, Paraguay». Tesis doct. Göttingen: Universität Göttingen, pág. 177.
- MOPT (1992). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico. Contenido y metodología*. Monografías de la Secretaría del Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes, pág. 809.
- Murck, B., B. Skinner y S. Porter (1996). *Environmental geology*. 1.^a ed. New York: Wiley & Sons.
- Naveh, Z. (2001). «Ten major premises for a holistic conception of multifunctional landscapes». En: *Landscape and Urban Planning* 57, págs. 269-284.
- Philip, J. (1957). «Theory of infiltration: A sorptivity and algebraic infiltration equation». En: *Soil Sci.* 84, págs. 257-254.
- Ruellan, A. (1985). «Les sols dans le paysage». En: *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique* 21, págs. 133-217.
- Schaap, M. G., F. J. Leij y M. T. v. Genuchten (2001). «rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions». En: *Journal of Hydrology* 251.3-4, págs. 163-176.
- Scheffer, F. y P. Schachtschabel (1989). *Lehrbuch der Bodenkunde*. 12.^a ed. Stuttgart: Enke Verlag.
- Schinner, F. (1996). «Soil respiration». En: *Methods in soil biology*. Ed. por F. Schinner, R. Öhlinger, E. Kandeler y R. Margesin. Heidelberg, New York: Springer-Verlag, págs. 93-110.
- Schlesinger, W. (1990). «Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage of soils». En: *Nature* 348, págs. 232-234.
- Schlichting, E. (1972). «Böden puffern Umwelteinflüsse ab». En: *Umschau in Wissenschaft und Technik* 72, págs. 50-52.
- (1978). «Funktionen von Böden in der Ökosphäre». En: *Daten u. Dokumente z. Umweltschutz* 22, págs. 9-12.
- (1986). *Einführung in die Bodenkunde*. Hamburg und Berlin: Paul Parey.
- Schlichting, E. y H. Blume (1966). *Bodenkundliches Praktikum*. Hamburg, Berlin: Paul Parey Verlag. 209 págs.
- Schlichting, E., H. Blume y K. Stahr (1995). *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. Berlin: Blackwell Wissenschaftsverlag, pág. 295.
- Schroeder, D. (1992). *Bodenkunde in Stichworten*. Stuttgart: Gebrüder Bornträger. 175 págs.
- Senate Department for Urban Development Berlin (ed.) (2014). *Berlin Environmental Atlas*. Berlin. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/> (accessed 04/2014).
- Soil Science Society of America (1995). «Statement on soil quality.» En: *Agronomy News* June.
- Soil Survey Division Staff (1993). *Soil survey manual*. Agriculture Handbook 18. Washington: United States Department of Agriculture, pág. 437.

- Soil Survey Staff (1999). *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2^o. Agricultural Handbook 436. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 869 págs.
- (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. 12.^a ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service. 359 págs.
- Stein, C. y U. Walz (2012). «Hemerobie als Indikator für das Flächenmonitoring - Methodenentwicklung am Beispiel von Sachsen». En: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 44(9), págs. 261-266.
- Steinhardt, U., F. Herzog, A. Lausch, E. Müller y Lehmann S. (1999). «Hemeroby index for landscape monitoring and evaluation». En: *Environmental Indices-System Analysis Approach*. Ed. por Pykh Y.A., Hyatt D.E. y Lenz R.J.M. Oxford: EOLSS Publications, págs. 237-254.
- Stevenson, F. (1986). *Cycles of soils*. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: Wiley & Sons, Inc. 380 págs.
- Stoll, A. (2007). «Hemerobia: una medida para evaluar el estado de conservación de comunidades vegetales nativas». En: *Chloris Chilensis* 10 (2).
- Stroganova, M., A. Miagkova, T. Prokofieva y I. Skvortsova (1998). *Soils of Moscow and Urban Environment*. Moscow: Lomonosov Moscow State University.
- Sukopp, H. (1972). «Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen». En: *Berichte über Landwirtschaft* 50, págs. 112-139.
- (1976). «Dynamik und Konstanz in der Flora der Bundesrepublik Deutschland». En: *Schriftenreihe für Vegetationskunde* 10, págs. 9-27.
- Thornthwaite, C. (1948). «An approach toward a rational classification of climate». En: *Geographical Review* 38, págs. 55-94.
- Umweltministerium Baden-Württemberg (1995). *Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit - Leitfaden für die Planung und Gestattungsverfahren*. Luft, Boden, Abfall 31. Umweltministerium Baden-Württemberg, pág. 57.
- United States Department of Agriculture (2001). *Soil Quality Test Kit Guide*. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service and Natural Resources Conservation Service-Soil Quality Institute.
- Walter, H. y S. Breckle (1991). *Ökologie der Erde. Band 1: Ökologische Grundlagen in globaler Sicht*. 2^o. Stuttgart: Fischer Verlag, pág. 238. 238 págs.
- Woods End Research (1997). *Guide to solvita testing and managing your soil*. Woods End Research Laboratory, Inc. Mt. Vernon, ME.

Índice alfabético

- índice hídrico, 50
- acidez del suelo, 31
- agua útil, 23
- agua disponible, 47
 - evaluación integral, 55
 - factor capa freática, 54
 - factor relieve, 53
 - factores locales, 53
- agua ligada, 23
- aireación del suelo, 46

- balance de agua
 - frecuencia de recambio, 31
 - regulación, 75, 76
 - regulación, método, 77, 80, 81

- capa freática
 - profundidad, 30
- capacidad de aire, 23
- capacidad de campo, 23
- capacidad de intercambio catiónico, 36
 - efectiva, 38
 - estimación, 37
 - evaluación, 38
 - potencial, 36
- característica del agua del suelo, 22
- cationes intercambiables, 63
- complejo absorbente, *véase* complejo adsorbente
- complejo adsorbente, 35, 63
 - coloides, 37
 - función de filtro, 86
 - intercambiadores, 37
 - porcentaje de sodio intercambiable, 36, 69
 - saturación de bases, 36, 63
 - superficie específica, 36
 - valor H, 36
 - valor S, 36, 63
- conductividad eléctrica, 67
 - evaluación, 67
- conductividad hidráulica, 27
 - estimación, 28
 - evaluación, 30

- densidad aparente, 18
 - evaluación, 19
- densidad de empaque, 20
 - evaluación, 20
- densidad real, 20

- enraizamiento
 - arraigabilidad, 45
 - espacio de, 44
 - profundidad, 44
 - profundidad fisiológica, 44
 - profundidad límite, 44
- extracto de saturación, 67

- fracciones de agua, 22
 - agua útil, 23
 - agua ligada, 23
 - capacidad de aire, 23
 - capacidad de campo, 23
 - estimación, 24
 - evaluación, 27
- fracciones de poros
 - estimación, 24

- evaluación, 27
- frecuencia de recambio de agua, 31
- función biológica, 39, 42
- función de base de la vida humana, 39
- función de factor de sitio, 42
- función de filtro, 85
 - capacidad de transformación, 88
 - evaluación, 87
 - factores ambientales, 85
 - procesos, 85
 - sustancias adsorbibles, 88
- función de regulación, 75
 - del balance de agua, 75
 - del ciclo de C, 82
- funciones de paisajes, 3
- funciones de suelos, 5
- hemerobia, 13
 - del paisaje, 14
 - del suelo, 16
- humus, *véase* materia orgánica del suelo, 33
- infiltración de agua, 27, 76
- materia orgánica del suelo, 33
 - concentración, 33
 - reserva, 34
- nitrógeno
 - fracción disponible, 63
 - reserva, 63
- nutrientes
 - fracción disponible, 65
 - reservas, 66
- paisaje
 - definición, 3
 - distancia al estado natural, 13
 - funciones, 3
 - hemerobia, 13
 - proximidad al estado natural, 17
- pH del suelo, 31
- evaluación, 61
- rangos, 32
- porcentaje de sodio intercambiable, 69
- porosidad, 19, 22
- potencial de mineralización de C, 35
- potencial matricial, 22
 - unidades, 22
- potencial matricial agua
 - curva de retención, 22
- proximidad al estado natural, 17
- régimen de humedad del suelo, 52
- relación de adsorción de sodio, 69
- respiración edáfica, 35
- retención de agua, 22
- salinidad, 67
 - evaluación, 67
- servicios ecosistémicos, *véase también* funciones de paisaje, 4
- sistema poroso, 21
 - agua útil, 23
 - agua ligada, 23
 - capacidad de aire, 23
 - capacidad de campo, 23
 - importancia ecológica, 21
 - porosidad, 22
 - tamaños de poros, 21
 - tipo de poros, 21
- sodicidad, 69
- suelo
 - distancia al estado natural, 13
 - hemerobia, 13
 - proximidad al estado natural, 17
 - superficie específica, 36
- textura, 17
 - clases, 17