

Estado de Suelos de los Pirineos

Acción 6-Gobernanza



David Badía Villas
Clara Martí Dalmau



**Escuela Politécnica
Superior - Huesca**
Universidad Zaragoza

Figura de la contra portada:

Eutric Cambisols en los alrededores del Pelopín (a 2007 msnm) desarrollado sobre turbiditas eocenas. Al fondo, nevado, el macizo de Monte Perdido.

Tabla de contenido

1. El suelo: Un recurso natural estratégico imprescindible para la vida.....	4
2. Factores formadores de los suelos del Pirineo.....	6
3. Procesos formadores de los suelos del Pirineo.....	11
4. Grupos de Suelos de Referencia en el Pirineo.....	19
5. La cartografía de suelos en España y el Pirineo en particular.....	31
6. Los suelos del Pirineo frente al cambio climático.....	37
7. Aspectos legislativos relacionados con los suelos.....	50
8. Take-home message.....	57
1. Información:.....	58
2. Protección y Vulnerabilidad:.....	59
3. Divulgación:.....	59
9. Bibliografía.....	61
ANEXO 1: Repositorios de datos de suelos.....	66

1. El suelo: Un recurso natural estratégico imprescindible para la vida.

La relevancia del suelo para la sociedad y los ecosistemas deriva de las funciones y servicios que presta este recurso natural estratégico, no renovable a escala humana. Los suelos constituyen uno de los factores más importantes en el equilibrio global de la biosfera, haciendo posible el crecimiento de las plantas al suministrarles anclaje, agua y nutrientes (Ruellan y Dosso, 1993; Porta et al, 2020). Se trata, por tanto, de un recurso natural fundamental, en cualquier zona del mundo (Mathieu, 2009), para satisfacer las diversas necesidades de alimentos, y otras formas de biomasa, y para garantizar la prestación de servicios ecosistémicos esenciales: filtro ambiental, biorreactor, secuestro de carbono, hábitat y reserva de biodiversidad, o el ciclo del agua, entre otros (Tabla 1).

Tabla 1. Funciones del suelo (<http://ec.europa.eu/environment/soil>)

Funciones del suelo	
Producción de biomasa	Producción de alimentos, forrajes, biodiesel, madera.
Interacción ambiental	Almacena, filtra y transforma nutrientes, sustancias y agua. Por ejemplo, almacena carbono, agua y nutrientes disponibles para las plantas, biodegrada o retiene contaminantes, etc.
Hábitat biológico y reserva genética	Contiene una amplia diversidad de organismos que participan en los ciclos de nutrientes, contribuyen a la estabilidad estructural, contrarrestan los efectos de patógenos y contaminantes químicos, etc.
Soporte físico	Sirve de base para el desarrollo urbano y otras actividades humanas incluidas las lúdicas.
Fuente de materiales y sustancias	Contiene la arena, grava, caliche o mallacán y otros materiales usados por el hombre.
Archivo patrimonial y cultural	Conserva los restos arqueológicos que sirven para evaluar modelos de asentamientos humanos. Engloba rasgos que evidencian cambios en el paisaje, el uso del territorio o el clima.

“Los suelos constituyen la base para el desarrollo de la agricultura, de funciones esenciales de los ecosistemas y para la seguridad alimentaria y, por tanto, son claves para la vida en la Tierra”
(68º AG, Naciones Unidas, 2013)

El suelo es un ente natural, organizado e independiente, con unos constituyentes, propiedades y génesis que son el resultado de la actuación de una serie de factores activos (clima, organismos, relieve y tiempo) sobre un material pasivo (la roca madre). Estos factores (Fig. 1) actúan por medio de unos procesos formadores (transformaciones, translocaciones y pérdidas/adiciones) cuya acción es muy lenta comparada con la escala de tiempo humana.

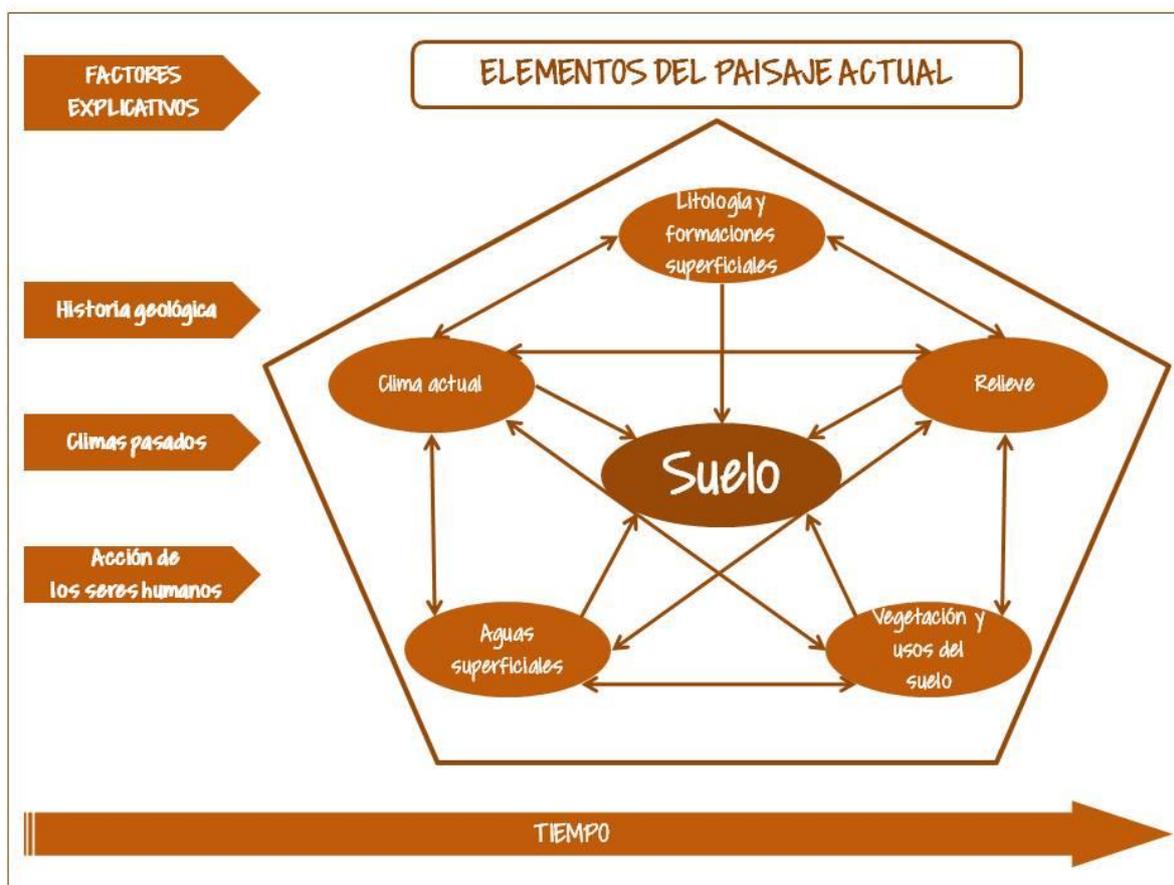


Figura 1. Elementos y factores del paisaje mostrando sus interacciones con el suelo (Fuente: Badía et al., 2008).

La formación de un cm de suelo requiere de miles de años, en cambio su pérdida puede ser cuestión de minutos (por erosión, por contaminación, o por sellado). Por este motivo es imprescindible considerar el suelo como un **recurso no renovable**, que es necesario usar sin destruir (Porta et al., 2020).

“Recuperar un centímetro de suelo puede tardar miles de años, y podemos destruir un centímetro en una tormenta. No debemos dar nunca el suelo por sentado”

(Dr. Rattan Lal, Premio Mundial de la Alimentación 2020 y co-galardonado con el Premio Nobel de la Paz 2007)

Como resultado de la acción de los citados factores y procesos de formación, en la naturaleza encontramos en la naturaleza una diversidad de suelos con diferentes propiedades, cuyo conocimiento es necesario si queremos manejarlos adecuadamente, además de tener un completo conocimiento del medio natural, en general y de las montañas en particular (Bitterlich et al., 1999; Duclos, 1994).

2. Factores formadores de los suelos del Pirineo

Desde un punto de vista ambiental, los suelos del Pirineo están funcionalmente relacionados con los siguientes factores formadores:

El clima. Influye directamente en la humedad y la temperatura del suelo e, indirectamente, a través de la cubierta vegetal (Fig. 2). La precipitación condiciona la alteración y la transformación de los minerales y de igual forma interviene activamente dentro del perfil, adicionando o eliminando materiales del suelo. La disponibilidad de agua y su flujo determina la velocidad de muchos procesos edáficos. La temperatura influye en los procesos de alteración y transformación mineral, condicionando la velocidad de muchas reacciones químicas que se dan en el suelo. Las bajas temperaturas generan una ralentización de la descomposición orgánica y una acumulación de material orgánico (horizonte fólico, en aerobiosis, u horizonte hístico, en anaerobiosis). La disponibilidad de agua para la vegetación durante la estación de crecimiento favorece la producción de biomasa que se incorpora al horizonte superficial (horizontes móllico y úmbrico), mientras que la acción del hielo es responsable de la crioturbación y la solifluxión, habituales en el medio alpino (Duclos, 1994).



Figura 2. La contrastada variación altitudinal y de orientación de las laderas genera fuertes gradientes en el clima del suelo y en la composición de la cubierta vegetal (Panticosa, Pirineo Central).

El clima del suelo (ST-USDA)

En los Pirineos, el régimen de humedad de los suelos (según la STS-USDA) es mayoritariamente percolante (údic), salvo en el Pirineo mediterráneo y la Depresión media donde a los inviernos húmedos y fríos le suceden veranos cálidos y más o menos secos (régimen xérico y ústico). A menor escala, en zonas con presencia de niveles freáticos próximos a la superficie, se satura el suelo con agua durante períodos prolongados, dejándolo sin oxígeno disuelto (régimen de humedad ácuico). En relación con el régimen de temperatura del suelo, en los pisos subalpino y alpino (o supraforestal), la temperatura anual media (TAM) del suelo está por debajo de los 8° C (régimen frígido) mientras que en el piso montano (cuyo límite podemos situar a unos 1700 m en solana y 1500 m en umbría) está ligeramente por encima (régimen méxico, entre los 8° C y 15° C).

Los organismos vivos. En el suelo encontramos multitud de seres vivos (bacterias, hongos, algas, plantas y animales) cuya influencia, difícilmente separable del clima, se manifiesta tanto en las propiedades como en la morfología del suelo (Badía, 1995). Es tradicional definir al suelo como la epidermis viva de la Tierra (Mathieu, 2009). Entre los representantes de la fauna destaca la microfauna (<0,02 mm, límite entre limo fino y arcilla), con protozoos y nematelmintos, depredadores de bacterias y detritívoros además de fitoparásitos, la mesofauna (<10 mm) con artrópodos (ácaros y colémbolos) y enquitreidos (depredadores de hongos, detritívoros y bioedafoturbadores del suelo) y la macrofauna (>10 mm) como los lombrícidos, cuya acción minadora y disgregadora del suelo, la ingestión de hojas, fragmentación y mezcla con la materia mineral favorece la acción de bacterias y hongos. Éstos ejercen una gran influencia en los ciclos biogeoquímicos, especialmente en el ciclo del Carbono y del Nitrógeno. Así, los hongos pueden asimilar entre el 30 y el 50% del carbono presente en la materia orgánica que descomponen, una tasa de conversión muy superior a la de las bacterias, que se sitúa entre el 5 y el 20%. Además, los hongos ejercen asociaciones simbióticas con la mayoría de las plantas superiores, actuando como un sistema radicular extra que ayuda en la absorción de agua y nutrientes, especialmente fósforo (Fig. 3).



Figura 3. La presencia de *Russula sanguinea*, hongo micorrizógeno, se pone de manifiesto en otoño por la presencia de sus cuerpos fructíferos; en este caso en bosques de pino rojo, en La Sarra, sobre Cambisols desarrollados en pizarras del Devónico.

También el hombre participa en la formación del suelo (factor antrópico), por ejemplo, abancalando laderas (panares) para el cultivo de cereales, como método de conservación de suelos y agua en montaña (Badía y Martí, 1999) o cambiando el manejo y la cubierta vegetal lo que modifica múltiples propiedades del suelo (Bitterlich et al, 1999; Regüés et al., 2017).

La litología. La roca madre o material parental del suelo es descrita como “el estado del suelo en el tiempo cero de formación”. Se puede esquematizar la litología de los Pirineos en tres tipos de materiales según su naturaleza química: el silíceo ácido (granito, diorita, pizarra, cuarcita) preponderante en el Pirineo Axial; el silíceo básico (basalto) de la Garrotxa, y el calizo, abundante tanto en las Sierras Interiores como en las Exteriores y su Depresión Media (Belmonte, 2022). La litología influye en la textura, infiltración, fertilidad natural (pH, saturación de bases), tipo de arcillas, o el color del suelo. Así los suelos desarrollados sobre margas presentarán, de partida, unas texturas más finas y pH más altos que los desarrollados sobre granitos. La influencia del material original es más acusada en suelos jóvenes y en zonas secas y va disminuyendo a medida que actúan los procesos formadores; así, no es raro encontrar suelos ácidos sobre sustratos calizos, tras unos pocos miles de años de estabilidad de la geoforma en la que éstos se disponen (Badía et al., 2020).



Figura 4. Las turbiditas del Eoceno son una de las rocas más abundantes en las Sierras exteriores pirenaicas. Se trata de capas alternantes de calcarenitas duras con margas blandas, formadas en fondos marinos muy profundos.

La geomorfología: En los Pirineos son frecuentes las laderas donde los suelos varían según la posición que ocupan en la vertiente. Para describir esta variación lateral, en condiciones de igual litología, se utiliza el término catena o toposecuencia (Orús et al., 2011). Puesto que en alta montaña son habituales las fuertes pendientes, donde el suelo es rejuvenecido por erosión, los suelos maduros, profundos, son minoritarios. Lógicamente, la cubierta vegetal (pastos, prados, matorrales, bosques) ejerce un papel protector contra la erosión (Filat et al, 2008). Además de las laderas, se distinguen algunos fondos de valle con depósitos morrénicos y terrazas aluviales de diferente edad. El relieve además de afectar a la circulación de partículas y del agua, modifica el microclima; así la inclinación influirá en la intensidad calorífica de las radiaciones recibidas, la orientación regulará el tiempo de incidencia de las radiaciones solares, y la altitud, que influirá en los elementos climáticos generales.

La evolución del suelo y sus propiedades van muy ligadas a la estabilidad de la geoforma sobre la que se desarrolla, y esto a su vez condiciona la vegetación que crece en el suelo (Badía et al., 2020). Por ello, es posible encontrar relaciones fito-edáficas a lo largo de una toposecuencia (Fig. 5);

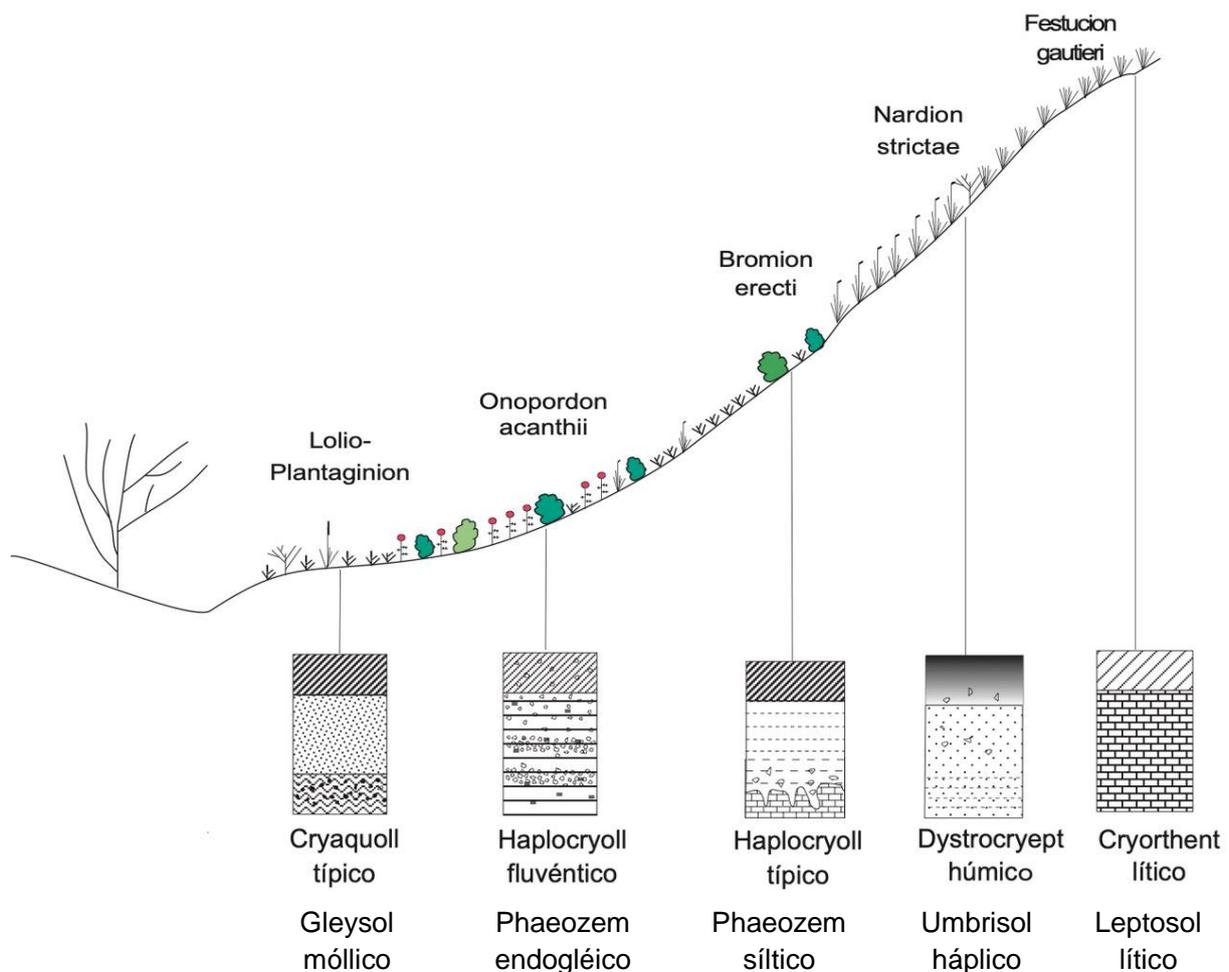


Figura 5. Secuencia fito-edáfica en el piso subalpino del Pirineo Central; se indican las comunidades fitosociológicas y la clasificación de cada perfil edáfico (STS y WRB) a lo largo de una ladera. Fuente: Badía et al (2008).

En base a diferentes propiedades edáficas, como la disponibilidad de agua, de nutrientes, la reacción del suelo...los suelos son capaces de mantener plantas higrófilas, xerófilas, eutrófilas, acidófilas,... lo cual es fácilmente puesto de manifiesto en los Pirineos (Fillat et al, 2008; Gómez et al., 2020). Como en el resto de las montañas, la pendiente y la elevación son factores condicionantes de la diversidad ambiental y ecológica (Comín y Martínez-Rica, 2007).

El tiempo: Cada uno de los factores anteriormente comentados ejercen su influencia en la formación del suelo a lo largo del tiempo, dando lugar a características morfológicas distintas. Los suelos jóvenes e inmaduros han desarrollado pocos horizontes y mantienen propiedades propias (heredadas) del material parental. A medida que van evolucionando, con estabilidad, pueden originarse suelos más profundos y también más diferenciados respecto al material parental. Sin embargo, en los Pirineos, la horizonación se ve limitada por la inestabilidad de la mayoría de las superficies geomórficas y las condiciones climáticas, que rejuvenecen el suelo. Por ello abundan los suelos poco evolucionados, con perfil A-C, y los de desarrollo intermedio, con perfil A-Bw-C. El efecto del factor tiempo sobre el desarrollo de los perfiles edáficos ha sido puesta en evidencia en la región a través del estudio de cronosecuencias en terrazas aluviales de ríos pirenaicos como el Segre (Badía et al, 2009) y el Alcanadre (Badía et al, 2015).

3. Procesos formadores de los suelos del Pirineo

La actuación de los factores formadores previamente citados se produce mediante unos **procesos de edafogénesis**, que pueden sucederse en el tiempo, actuar simultáneamente e incluso ser antagónicos (Badía y Martí, 2006). A continuación, resumimos los procesos que actúan en un suelo agrupados en las siguientes categorías:

1) Transformaciones (orgánicas e inorgánicas). Conjunto de procesos que conllevan cambios de composición y forma de los compuestos orgánicos y/o inorgánicos que pueden afectar al material del suelo.

1.1) Meteorización.

La **meteorización o intemperización** consiste en la transformación por los distintos agentes atmosféricos del material mineral del suelo o de la roca madre. Por tanto, los diferentes procesos de meteorización pueden ser considerados tanto procesos propios de la genesis de suelos como procesos previos a la diferenciación de horizontes. Pueden ser de naturaleza **física** (fragmentación y disgregación mecánica de la roca), **química** (se produce un cambio en la naturaleza de los materiales) o **biológica**, que en última instancia engloba procesos físicos o químicos provocados por la actividad orgánica.



Figura 6. Entre los procesos de edafogénesis más genuinos del Pirineo destacan la solifluxión (izquierda), proceso en el que el suelo se desliza al saturarse, y la meteorización por congelación del agua en fisuras de la roca (derecha).

En los Pirineos, los procesos de meteorización más destacables son:

- la meteorización por disolución, que afecta a los carbonatos, de margas, calizas, calcarenitas
- la meteorización por hidrólisis, es decir la reacción entre un mineral (por ejemplo, aluminosilicatos) y el agua para dar un ácido y una base.
- La meteorización por óxido-reducción, que afecta a los elementos que pueden actuar con diversos estados de valencia, como el hierro y el manganeso.
- la meteorización por cristalización del agua por helada en fisuras de la roca, con el consiguiente incremento de volumen y fragmentación de esta (Figura 6).

1.2) Empardecimiento y rubefacción. Consisten en la liberación de hierro por meteorización de los minerales primarios. Ambos términos designan un proceso único cuya diferenciación se basa en el mineral de hierro formado, lo que a su vez se relaciona con las condiciones ambientales de su formación. Se considera que el mineral precursor es la ferrihidrita que, en condiciones cálidas y secas evoluciona rápidamente a hematita (Fe_2O_3) en un proceso de deshidratación de los óxidos de hierro ligados a las arcillas. Es un proceso casi irreversible que confiere al suelo un intenso color rojo, típico de climas mediterráneos o climas con contraste estacional bien marcado. En los Pirineos es poco frecuente y hay que localizarlo hacia los Pirineos mediterráneos y los Somontanos de las Sierras Exteriores. Por el contrario, en medios más húmedos y fríos no es posible la deshidratación de los óxidos de hierro y se favorece la formación de goetita (FeOOH) por lo que el suelo se empardece o brunifica. Se trata de un proceso propio de climas semicontinentales y atlánticos templados.

1.3) Hidromorfía. Las condiciones hidromorfas o de exceso de agua y la demanda de oxígeno por parte de los microorganismos, favorecen la transformación de los óxidos de hierro a formas ferrosas (gleificación), lo que confiere al suelo un color gris o negro. La alternancia de condiciones húmedas y secas, es decir reductoras y oxidantes a lo largo del año, se manifiesta con la alternancia de los colores grises con los rojos y pardos. En los Pirineos se relaciona con suelos desarrollados sobre depósitos aluviales recientes, próximos a cauces de ríos.

1.4) Melanización: Proceso de oscurecimiento de los horizontes superficiales del suelo por la evolución de restos orgánicos frescos hacia formas complejas (humus), con la participación de los microorganismos. El oscurecimiento es más o menos intenso según domine la mineralización o la humificación. Así en suelos agrícolas, las labores favorecen la mineralización por lo que el oscurecimiento es menos intenso que en las áreas de vegetación natural, siempre que las condiciones de humedad sean semejantes.

1.5) Edafoturbación: Proceso en el que los materiales del suelo sufren cambios posicionales y efectos de mezcla. En los Pirineos tienen su origen tanto en la acción de hielo-deshielo (crioturbación) como al comportamiento de la meso y macrofauna (bioturbación) e incluso al efecto de expansión-retracción de las arcillas (argiloturbación).

2) Translocaciones: Implica un cambio de posición de un componente que, si bien puede ser tanto ascendente como descendente dentro de un perfil, habitualmente domina este último. Supone la concentración de materiales en ciertos puntos del perfil. Según la causa que genera este movimiento distinguimos entre translocaciones en solución (carbonatación) y translocaciones en suspensión (argiluviación).

2.1) Descarbonatación/Carbonatación: Proceso que comporta la solubilización, de los carbonatos en las estaciones húmedas, para lo que se requiere su transformación en bicarbonatos (descarbonatación). Ello se produce gracias al CO_2 y los ácidos orgánicos producidos por la actividad biológica por lo que su intensidad es máxima en los horizontes superficiales. Bajo régimen de humedad percolante (údic) los bicarbonatos son eliminados del perfil edáfico pero en condiciones más secas (xéricas) precipitan a cierta profundidad en forma de carbonatos (carbonatación). En los Pirineos se observan translocaciones en solución, de carbonatos (Badía y Martí, 1999), especialmente en materiales permeables como los depósitos aluviales y coluviales (Fig. 7).



Figura 7. Perfiles con horizontes subsuperficiales de acumulación de carbonatos secundarios (horizonte de diagnóstico cálcico, Bk), translocación favorecida por las aportaciones laterales de aguas ricas en bicarbonatos.

2.2) Argiluvación: Proceso de movilización en suspensión de arcilla por acción del agua, que actúa como agente físico de transporte, sin reaccionar químicamente con ella. El proceso de translocación de arcillas a lo largo del perfil requiere de la existencia de fases húmedas intensas y periodos secos. En las primeras, el agua con las arcillas en suspensión se infiltra a través de los macroporos que al secarse dejan, por succión, las arcillas en sus paredes. Se requiere que las arcillas estén dispersas, y por lo tanto es necesario que exista una eliminación previa de los carbonatos y una ligera acidificación. Supone la formación de horizontes subsuperficiales de acumulación de arcilla (horizonte de diagnóstico árgico, Bt).

2.3) Podsolización: Proceso de movilización de materia orgánica, aluminio y hierro desde un horizonte eluvial (E) con translocación e inmovilización a un iluvial (Bh y/o Bs). Se genera bajo condiciones climáticas frías y húmedas, una vegetación acidófila y escasa actividad biológica.

3) Adiciones y pérdidas: Incluye procesos de enriquecimiento y de eliminación, respectivamente, de materiales y componentes del perfil edáfico.

3.1) Cumulización: Proceso de aporte de material que se traduce en el engrosamiento del horizonte superficial de materia mineral, lo que repercutirá en la evolución del suelo. Puede diferenciarse entre aluvionamiento, o aporte por las corrientes fluviales, y coluvionamiento, con aportes derivados de la combinación de la fuerza de la gravedad y de corrientes de agua. Estos aportes se tratan en muchos casos de material pre-edafizado o suelos erosionados.

3.2) Lixiviado: Migración, más o menos continuada, de un componente del suelo, por la acción de un agente químico. La pérdida del componente afectado se producirá progresivamente dentro del perfil tal y como el frente de humectación lo atravesase de forma habitual. En las condiciones climáticas de los Pirineos el frente de humectación puede atravesar todo el perfil por lo que es habitual que la lixiviación afecte tanto a la parte superior del mismo como a la inferior. En las condiciones más húmedas y geomorfológicamente estables, los iones en solución van circulando y perdiéndose, lo que comporta una progresiva acidificación y desaturación del complejo de cambio.

3.3) Erosión: Proceso de degradación física del suelo que consiste en la pérdida de parte o la totalidad del perfil. Bajo una cubierta forestal o pascícola los suelos presentan agregados muy estables y tanto la escorrentía superficial como el movimiento de partículas tienden a ser escasos. Los procesos de erosión que pueden observarse en el Pirineo son: movimientos de partículas (caída de rocas, arroyada difusa, en surcos y en cárcavas) y movimientos en masa (soliflucción, geliflucción, reptación, deslizamientos). Los sustratos en los

que estos procesos son más evidentes son los depósitos morrénicos, margas y calizas en laderas de fuerte pendiente (Fig. 8).

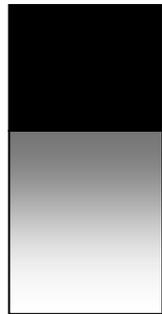


Figura 8. En la sierra de las Cutas, con elevada pendiente, la tasa de formación de suelo es superada por la tasa de pérdida, por erosión y graviturbación (movimiento en masa). Estos procesos proisotrópicos (inhibidores de la diferenciación de horizontes), permiten el afloramiento del sustrato rocoso (calizas del Ilerdiense, Cenozoico).

En definitiva, el desarrollo del suelo se lleva a cabo por la combinación de dos grupos de procesos: los proanisotrópicos, que tienden a diferenciar capas de disposición horizontal (horizontes) a partir de la roca madre; y los proisotrópicos, que ralentizan e incluso inhiben la diferenciación de horizontes. A través de esos procesos proanisotrópicos diferenciamos capas de disposición horizontal o subhorizontal en un mismo suelo (horizontes) que poseen características y propiedades diferentes. Con esta idea, se muestran de forma esquemática los perfiles más frecuentes en el Pirineo, es decir el corte vertical del terreno que nos muestra el conjunto de horizontes del suelo, con sus horizontes de diagnóstico (fundamentales en la clasificación del suelo) y sus procesos de formación (Figura 9).

Figura 9. Esquema de los principales suelos del Pirineo mostrando los perfiles agrupados según los procesos de formación predominantes y su clasificación (GSR). © Badía y Martí

1. SUELOS ORGÁNICOS. Con acumulación de gruesas capas de materia orgánica, por ralentización de la mineralización y predominio de la humificación, por ejemplo por bajas temperaturas (horizonte fólico) y/o por anaerobiosis (horizonte hístico)

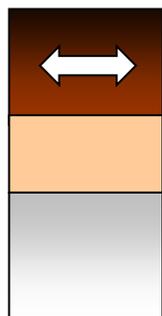


Material orgánico (Corg > 20% => MO > 40%)

HISTOSOLS, por ejemplo, en turberas (Fibric Histosols)

2. SUELOS MINERALES

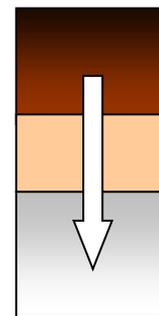
2.1. Con equilibrio entre mineralización y humificación



Horizonte Ah rico en bases (mólico)

Aceptan otros horizontes subsuperficiales (Bw, Bk)

PHAEOZEMS, CHERNOZEMS, KASTANOZEMS



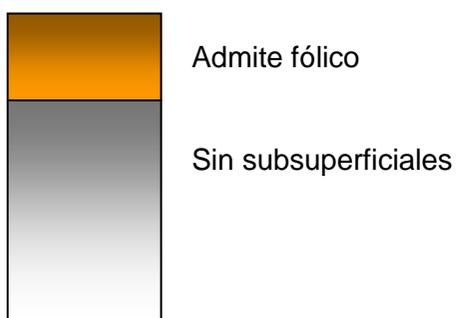
Ah pobre en bases (úmbrico)

UMBRISOLS

2.2. Con predominio de la mineralización

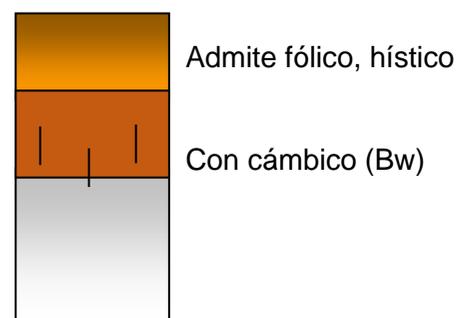
2.2.1. Alteración

Sin horizontes de diagnóstico mineral



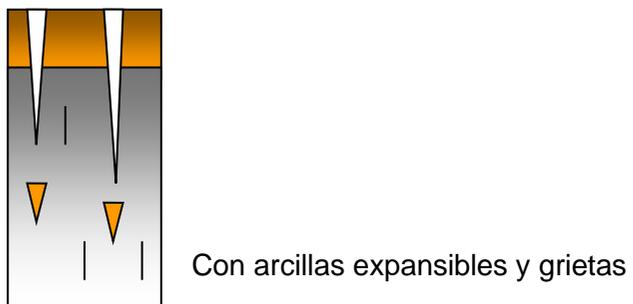
REGOSOLS

Con desarrollo estructural y otros síntomas de evolución



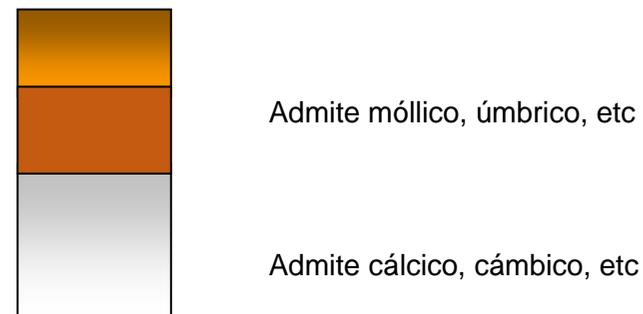
CAMBISOLS

Argiloturbación (Vertisolización)



VERTISOLS

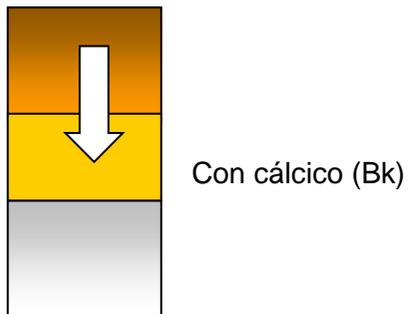
Con material volcánico (propiedades ándicas o vítricas)



ANDOSOLS

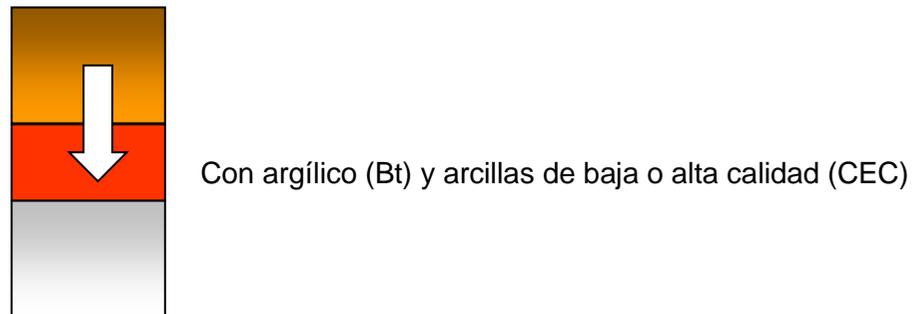
2.2.1. Translocaciones

De carbonatos (Carbonatación)



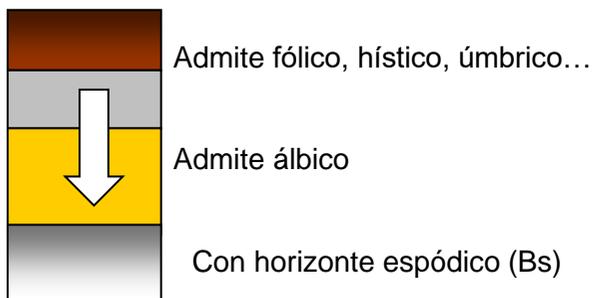
CALCISOLS

De arcilla (Argiluvación)



LIXISOLS, LUVISOLS

De C orgánico, Fe y Al (Podzolización)



PODZOLS

4. Grupos de Suelos de Referencia en el Pirineo

Los factores formadores presentan una variabilidad espacial que va a tener su reflejo en la variabilidad de distintos grupos de suelos (Tabla 2).

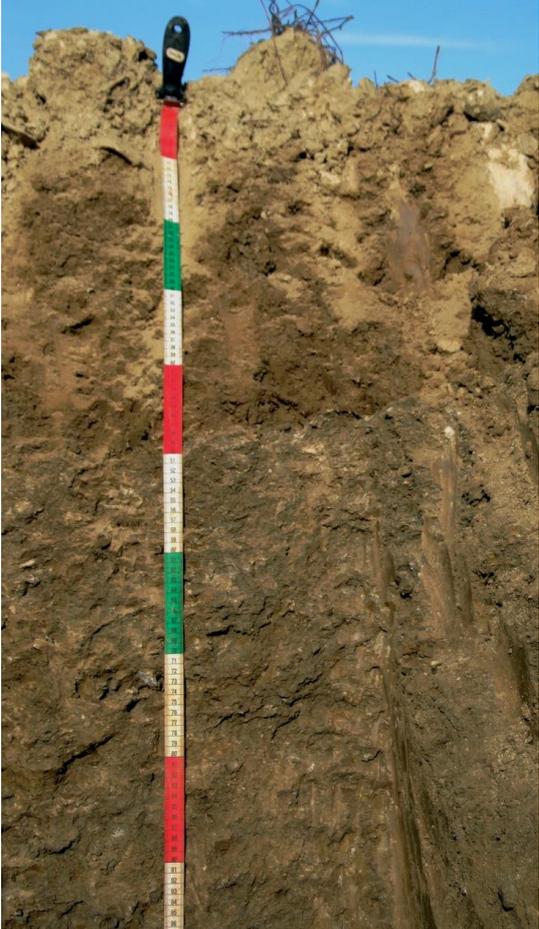
Tabla 2. Distribución de los principales tipos de suelos (GSR) a lo largo del Pirineo y su abundancia relativa (***, **, *)

GSR	Calificadores	Pirineo Axial y Sierras Interiores			Sierras Exteriores	Depresión Media
		Pirineo Atlántico	Pirineo Central	Pirineo Mediterráneo		
		Del Atlántico al río Veral	Del Veral al Ter	Del Ter al Mediterráneo		
LEPTOSOLS***	Dystric					
	Eutric					
	Calcaric					
CAMBISOLS*	Dystric					
	Eutric					
	Calcaric					
PHAEOZEMS**	Leptic					
UMBRISOLS*	Leptic					
REGOSOLS*	Calcaric					
CALCISOLS*	Petric/Haplic					
FLUVISOLS*	Calcaric					
HISTOSOLS*	Dystric					
ANDOSOLS*	Vitric/Leptic					
PODZOLS*	Albic					

		Vertiente norte de los Pirineos		
		Pirineo Atlántico	Pirineo Central	Pirineo Mediterráneo
GSR	Calificadores	Del Atlántico al Gave de Pau	Del Gave Pau al Río Ariège	Del Río Ariège al Mediterráneo
LEPTOSOLS***	Dystric			
	Eutric			
	Calcaric			
CAMBISOLS*	Dystric			
	Eutric			
	Calcaric			
PHAEOZEMS**	Leptic			
UMBRISOLS*	Leptic			
REGOSOLS*	Calcaric			
CALCISOLS*	Petric/Haplic			
FLUVISOLS*	Calcaric			
	Dystric			
HISTOSOLS*	Dystric			
ANDOSOLS*	Vitric/Leptic			
PODZOLS*	Albic			

A lo largo del Pirineo, como cualquier otro territorio, los perfiles de suelos varían tal y como lo hacen las condiciones del medio natural, el paisaje, ...es decir, los factores de formación. Puesto que la variabilidad no es infinita, y existen perfiles con horizontes semejantes, resulta posible agruparlos, es decir clasificarlos según su morfología y propiedades. Por lo tanto, los suelos, al igual que sucede en otras ramas de la Ciencia, se agrupan en clases. Cada clase recibe un determinado nombre y engloba aquellos suelos con propiedades similares, acotadas dentro de unos ciertos rangos. El principal interés en dar nombre a los suelos reside en poder ordenar y transmitir la experiencia adquirida en un área determinada.

Basándonos en la WRB (IUSS, 2022), se describen seguidamente los principales grupos de suelos de referencia (GSR) que podemos encontrar en el Pirineo, por orden alfabético.

CALCISOLS	
	<p>Los Calcisols (cuyo nombre deriva del latín <i>calx</i>, cal) se caracterizan por presentar una acumulación de carbonato cálcico (horizonte cálcico, k) a cierta profundidad, ya sea por translocación desde horizontes más superficiales o por aportaciones laterales de aguas ricas en bicarbonatos. La acumulación puede darse bajo varias formas: pulverulentas, nódulos con distinta morfología y dureza, cemento bajo los cantos (cemento geopetal) e incluso masas continuas que, cementadas, transforman el horizonte cálcico en petrocálcico (mallacán, caliche, tosca, taparàs): Petric Calcisol. Al horizonte cálcico y petrocálcico, les pueden acompañar otros como el cámbico y el árgico.</p> <p>Son suelos de pH básico y alta saturación de bases. La presencia de carbonatos tiene implicaciones agronómicas al aumentar la concentración de bicarbonatos que bloquean la absorción de hierro por las plantas (clorosis férrica). La abundancia de calcio provoca la retrogradación de los fosfatos.</p> <p>Se trata de suelos más propios de áreas semiáridas y subhúmedas con precipitación estacionalmente irregular pero que en el Pirineo también se localizan en glaciares al pie de las Sierras Exteriores y en antiguas terrazas aluviales, a veces encostradas (Fig. 10).</p>
Haplic Calcisol	
Typic Calcustepts	
Gracionépel, Jacetania	

CAMBISOLS		
	<p>Los Cambisols, cuyo nombre proviene del latín <i>cambiare</i>, cambiar, manifiestan cambios en profundidad, con presencia de un horizonte subsuperficial cámbico, y perfil A-Bw-C). Estos cambios se evidencian en el contenido de arcilla, carbonatos, el color y/o la estructura respecto al sustrato. Son suelos moderadamente desarrollados, profundos, con un importante contenido en minerales alterables en las fracciones limo y arena; suelen presentar una adecuada fertilidad, tanto desde el punto de vista físico como químico.</p> <p>Los Cambisols en el Alto Aragón abundan en zonas húmedas, de montaña donde, aun desarrollándose sobre material parental calizo, suelen lavarse los carbonatos del perfil. Según el contenido en bases sea más o menos elevado reciben el calificativo de éutricos o dístricos e incluso de calcárico, si aún presentan carbonatos en el perfil.</p> <p>Así los Dystric Cambisols son más frecuentes en el Pirineo Axial, sobre masas magmáticas de carácter ácido, desde La Munia hasta el valle de Boí pasando por Los Montes Malditos, Maladeta-Besiberri o la Vall d'Aran. Los CM con carácter éutrico abundan sobre calizas (Cotiella, Turbón, etc) y turbiditas (especialmente desde Pamplona a Boltaña).</p> <p>Si los ciclos de erosión y coluvionamiento no frenan su evolución, pueden ir incorporando materia orgánica en el horizonte superficial (carácter húmico) para acabar convirtiéndose en Phaeozems o en Umbrisols. Algunos Cambisoles en fondos y laderas han sido abancalados por el hombre (Escalic).</p>	
Dystric Cambisol		
Typic Haplocryept		
PN de Ordesa, Sobrabe		

FLUVISOLS



Los Fluvisols son suelos desarrollados sobre sedimentos recientemente aportados por los ríos (arenas, limos, gravas, cantos). Su nombre proviene del latín *fluvius*, fluvial. Son suelos poco desarrollados, sin horizonte de diagnóstico superficial y con sedimentos aluviales estratificados. Esta estratificación se evidencia por la presencia de capas (C) con granulometrías diferentes y/o contenidos en materia orgánica irregulares y relativamente elevados. Cada capa corresponde a un episodio de sedimentación, y nos permite interpretar la evolución histórica del río. Se trata de suelos profundos con texturas gruesas y, frecuentemente, con abundantes gravas poligénicas (esqueléticos) lo que hace muy permeables. Dada la mayoritaria litología pirenaica, su matriz suele ser carbonatada (Calcaric). En las proximidades al cauce del río pueden manifestar problemas de hidromorfía (Gleyic) por la presencia de una capa freática (Fluvisoles gléicos). En el Pirineo se encuentran en las estrechas llanuras de inundación y terrazas más próximas al cauce actual de los diversos ríos, o sea las más jóvenes, holocenas. En cuanto transcurre un cierto tiempo (terrazas aluviales más altas, más viejas) estos suelos pasan a GSR más desarrollados (Luvisols, Cambisols, etc).

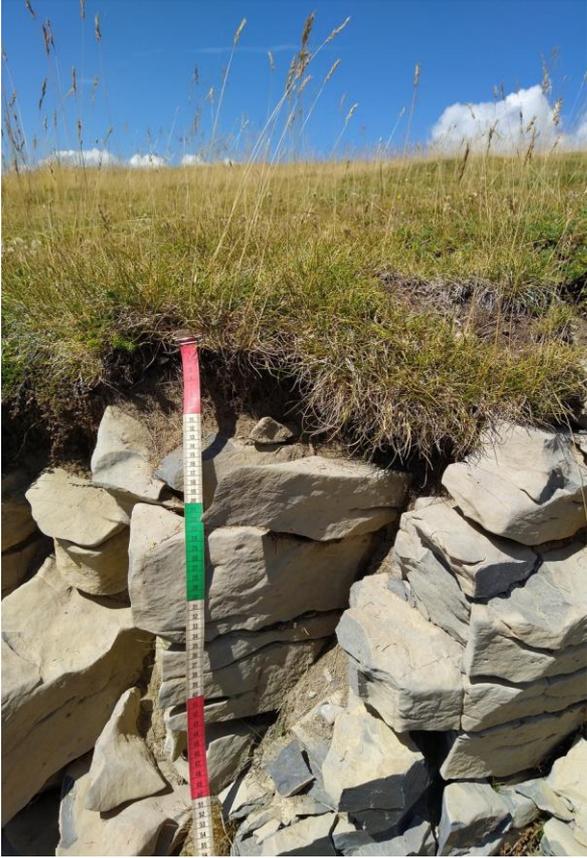
Calcaric Fluvisol

Typic Udifluent

Terraza del río Vero

HISTOSOLS	
	<p>Se trata de suelos formados por <i>material orgánico</i> pobremente aireado con un horizonte hístico (del griego <i>histos</i>, tejido). Se desarrolla en la superficie del suelo. En algunos lugares puede estar cubierto por <i>material mineral</i>.</p> <p>En estos suelos se acumula la materia orgánica (horizonte hístico, H) por el predominio de la humificación sobre la mineralización. Esto sucede por hidromorfismo pero ayudan el frío y la acidez del medio, que favorecen la acumulación de restos de musgos y plantas hidrófilas que acaban formando parte de las capas orgánicas. Son suelos que ocupan muy poca extensión, habitualmente próximos a ibones y cursos de agua, por ejemplo, encontramos Histosols en el PN de Aigües Tortes, en las proximidades de los ibones azules de Panticosa (Alto Gállego), en Aguas Tuertas (valle de Hecho, Jacetania), en el fondo del valle del Barrosa, en Bielsa (Sobrarbe).</p>
Typic Cryosaprist	
Dystric Histosol	
PN de Aigües Tortes	

LUVISOLS/LIXISOLS	
	<p>Se trata de suelos con cierto lavado (del latín <i>luere</i>, lavar), con un horizonte subsuperficial cuyo contenido en arcilla (Bt, horizonte árgico, del latín <i>argilla</i>) es claramente más alto que el de los horizontes suprayacentes. La diferencia textural puede ser debida a la iluviación de arcilla o a otras causas. Su perfil A-Bt-C, muestra mayor desarrollo que los Leptosols, Regosols, Cambisols..... Para su formación se requiere de la alternancia de un periodo lluvioso y poco cálido, que propicia la eluviación de las arcillas dispersas en el agua una vez lavados los carbonatos (si los había), con otro seco, lo que motiva su floculación y acumulación en el horizonte argílico (Bt). En los Pirineos se citan (como Arenic Hapludalfs) sobre suaves y viejas laderas de la Sierra de Urbasa (Monte Común de las Améscos, Navarra), de la conca de Tremp, o en viejas terrazas aluviales (con secuencias de horizontes como A-Bt-Ck-Ckm). Su formación es más favorable en climas mediterráneos y en los Somontanos. Sobre sustratos calizos, la iluviación de arcillas es un proceso posterior al lavado de carbonatos y no es raro identificar, especialmente en viejas superficies estables, secuencias A-Bw-Bt-Ck (Calcic Luvisols).</p>
Typic Haploxeralf	
Haplic Luvisol	
Güell, Ribagorza	

LEPTOSOLS	
	<p>Los Leptosols son suelos delgados (su nombre deriva del término griego <i>leptos</i>, delgado) porque a escasa profundidad presentan una barrera física, roca dura continua (contacto lítico) o mucha pedregosidad. Debido al escaso espesor efectivo, poseen un reducido volumen explorable por las raíces y la capacidad de retención de agua y nutrientes es baja, especialmente en los Leptosoles líticos, e hiperesqueléticos. Sus propiedades químicas, muy influenciadas por el material parental del que derivan, condicionan su calificación como calcárico, gipsífero, éutrico, dístrico,....</p> <p>Su escasa profundidad e incluso la abundancia de afloramientos rocosos (nudilítico), aparte de las bajas temperaturas, limitan su uso agrícola pero pueden admitir el pastoreo estacional o un uso recreativo.</p> <p>Su distribución está ligada a zonas con fuerte pendiente y, si bien se encuentran repartidos por todo el Pirineo, abundan en los lugares más altos y fríos del Pirineo Axial. En superficies con una cierta estabilidad geomorfológica, se evidencia una rápida descarbonatación del perfil que lleva a identificar Calcaric, Eutric o Dystric Leptosols. En condiciones más favorables se encuentran asociados con otros grupos tanto a ambos extremos del Pirineo como en cotas más bajas (Depresión Media y Sierras Exteriores).</p>
Eutric Leptosol	
Lithic Cryorthent	
PN de Ordesa, Sobrarbe	

PHAEOZEMS



El nombre de Phaeozems deriva de la combinación del vocablo latino *phaios*, oscuro, y del ruso *zemlja*, tierra oscura, orgánica. Y es que los Phaeozems son suelos caracterizados por poseer un horizonte superficial A, oscuro por su elevado contenido en materia orgánica. Esta le confiere una elevada estabilidad estructural, porosidad y fertilidad (horizonte móllico). Posee una extraordinaria actividad biológica, lo que se manifiesta en una buena integración de la materia orgánica con la mineral. Suelen desarrollarse sobre materiales de reacción básica, blandos, como los tills y los coluviones, en condiciones relativamente estables. Son frecuentes los Haplic Phaeozems en el Pirineo, bajo pastos, ya que los densos sistemas radiculares de las especies pratenses facilitan la incorporación de la materia orgánica. En estas zonas húmedas es habitual la eliminación de los carbonatos del perfil salvo que el móllico se disponga sobre sustrato calizo o laderas inestables donde pueden encontrarse Calcaric o Rendzic Phaeozems. A diferencian de los Kastanozems, no presentan carbonatos secundarios. Los Phaeozems no poseen una baja saturación de bases, lo que los diferencia de los Umbrisols, morfológicamente similares. Los Phaeozems suelen presentarse de forma discontinua en el Pirineo, alternándose con otros grupos de suelos. Así es frecuente que los Phaeozems acompañen a pastos mesófilos con bromo (*Bromus erectus*) o primaveras (*Primula intricata*) mientras que los Umbrisols se encuentran bajo los pastos acidófilos de cervuno (*Nardus stricta*) o sarrón (*Festuca eskia*), por ejemplo, en los puertos de Aisa, de Tendeñera, o de Ordesa.

Haplic Phaeozem

Typic Hapludoll

Valle del Sorrosal, Sobrabe

PODZOLS	
	<p>Se trata de suelos con un horizonte subsuperficial espódico (del griego <i>spodos</i>, ceniza) que contiene sustancias iluviales; en concreto, en la mayoría de los horizontes espódicos, suele presentar subhorizontes superiores más oscuros por la materia orgánica iluvial (Bh) mientras que los subhorizontes inferiores están coloreados por (sesqui)óxidos de hierro y aluminio iluviales (Bs). También es frecuente la presencia de horizonte eluvial (E) suprayacente (horizonte álbico) introduciéndose, con lenguas, en el horizonte espódico. Es decir, se trata de suelos con podzolización, que en su mayor desarrollo presentan una secuencia de horizontes Ah-E-Bh-Bs-C. Se trata de suelos caracterizados por una alta carga dependiente del pH, una gran superficie específica y una elevada retención de agua. Su desarrollo se favorece sobre rocas muy permeables, pobres en minerales alterables, pobres en arcillas y en bases, por ejemplo: granito, areniscas cuarcíticas... Las condiciones de clima húmedo y vegetación acidificante favorecen la podzolización. Estas condiciones se dan de forma excepcional en Navarra y el Pirineo Catalán, en concreto se han descrito en la Sierra de Urbasa (Navarra), en la Vall d'Arán, La Cerdanya, o el Pallars Sobirà (Catalunya).</p>
Alfic Haplorthod	
Albic Podzol	
PN de Urbasa-Andía	

UMBRISOLS	
	<p>Se trata de suelos con un horizonte úmbrico (del latín <i>umbra</i>, sombra), un horizonte superficial, comúnmente de gran espesor, de color oscuro, con una saturación de bases baja y un contenido de materia orgánica de moderado a alto. Bajo el A úmbrico, puede aparecer un horizonte B cámbico (Cambic Umbrisol) conformando una secuencia A-Bw-C. Morfológicamente son similares a los Phaeozems ya descritos, pero desde el punto de vista químico son suelos ácidos, más pobres en nutrientes. Por ello, los Umbrisols en el Pirineo se encuentran bajo los pastos acidófilos de cervuno (<i>Nardus stricta</i>) o sarrón (<i>Festuca eskia</i>), o bien bajo bosques de coníferas (<i>Pinus sylvestris</i>, <i>Pinus mugo</i>).</p> <p>Los Umbrisols se desarrollan más fácilmente sobre materiales de reacción ácida, como granitoides y pizarras, del Pirineo Axial, como en otras montañas alpinas.</p>
Typic Humicryept	
Cambic Umbrisol	
Lles, La Cerdanya	

OTROS GRUPOS

Aparte de los GSR descritos en formato ficha, algunas cartografías, describe varias manchas de Vertisols; en concreto en la Depresión media intrapirenaica sobre margas azules del eoceno luteciense de la Cuenca de Jaca-Pamplona. Su presencia requiere de confirmación. En la zona se han descrito algunos procesos propios de la vertisolización como la apertura y cierre de grietas verticales profundas desde la superficie del suelo, debido a los ciclos de secado y humectación pero sin cumplir todos los requisitos de los Vertisols, En concreto, se trata de suelos con perfil A-Bi-C, con elevado contenido en limos y arcillas, con cierta capacidad expansiva pero sin arcillas de tipo esmectítico (Badía et al, 2015). Se describen en las cuencas del río Aragón, del Cinca-Ésera y del Elorz (Noaín) donde alternan con Regosols y Calcisols. Si no cumplen como Vertisols sí se verifica, al menos, un carácter protovértico (Badía et al, 2015). En el portal de IDENA se identifican zonas donde se asocian Vertic Haploxerepts (<https://tinyurl.com/2y2zt15w>; <https://tinyurl.com/22d7rv6m>) con Typic Calcixerepts (<https://idena.navarra.es>).

Por otro lado, sobre materiales volcánicos, se han descrito Andosols, con distribución limitada al Pirineo Oriental, por ejemplo, Vitric Andosols en la Garrotxa (Girona).



Figura 10. Sobre las viejas terrazas del río Aragón, los originales Fluvisols, de unos pocos miles de años, han evolucionado a Calcisols, a veces encostrados (Luvic Petric Calcisols) e incluso a Calcic Luvisols (con horizonte árgico sin carbonatos y cálcico muy profundo). Al fondo, cara sur del pico Bisaurín.

5. La cartografía de suelos en España y el Pirineo en particular

A pesar de la demanda creciente de información de suelos, tanto el ámbito estatal, como regional y local, la inexistencia de una Agencia Española de Suelos, coordinadora de la elaboración de una cartografía de suelos en España, ha supuesto que la obtención de dicha información haya sido muy heterogénea entre Comunidades y presente dificultades de armonización. Así se indica en la propuesta INFORCAS, elaborada por la SECS y la oficina de la FAO en España (SECS-FAOES 2017), en la que se recoge la situación de la información cartográfica de suelos en España (Tabla 3).

Tabla 3: Información cartográfica de suelos existente en España (Fuente: SECS-FAOES, 2017)

Escala	Territorio	Observaciones
1:1.000.000:	España	Inventario muy general
1:250.000	Provincias pirenaicas y otras	Elaborada por el CSIC. Antigua (1961). Es la escala recomendada a nivel de país
1:100.000	Andalucía, Murcia y Valencia	La escala no se corresponde con la densidad de observaciones presentadas
1:50.000	Andalucía; Aragón (Monzón), (DGA, 1996); Castilla la Mancha, reciente (6,2 %); Castilla y León, reciente (7,5 %); Cataluña, reciente (0,5 %); El Hierro, antigua (100 %); Fuerteventura, antigua (100 %); Galicia, reciente (30,5 %); Madrid (100 %); Navarra, antigua (UN, 100 %); Valencia (28,5 %)	Recubrimiento incompleto
1:25.000:	Asturias (45 %); Castilla y León, reciente (1 %); Cataluña, reciente (22 %); Navarra, reciente (GN, 44 %) y País Vasco (58 %).	

A mediados del siglo pasado XX, en España se hizo un esfuerzo por caracterizar y cartografiar los suelos a nivel estatal, y, por tanto, a una escala muy general. De esos años (1966) se deriva el mapa de suelos de España a E.1:1.000.000, elaborado por la Comisión de Cartografía Agrobiológica, constituida por un nutrido grupo de edafólogos españoles, del Instituto de Edafología y Agrobiología, del CSIC (Fig. 11), disponible en el portal del *European Soil Data Centre* (ESDAC). A esa misma escala, en el año 2005 el IGN edita un mapa de los suelos de España, basada en la *Soil Taxonomy System* (Fig. 12).

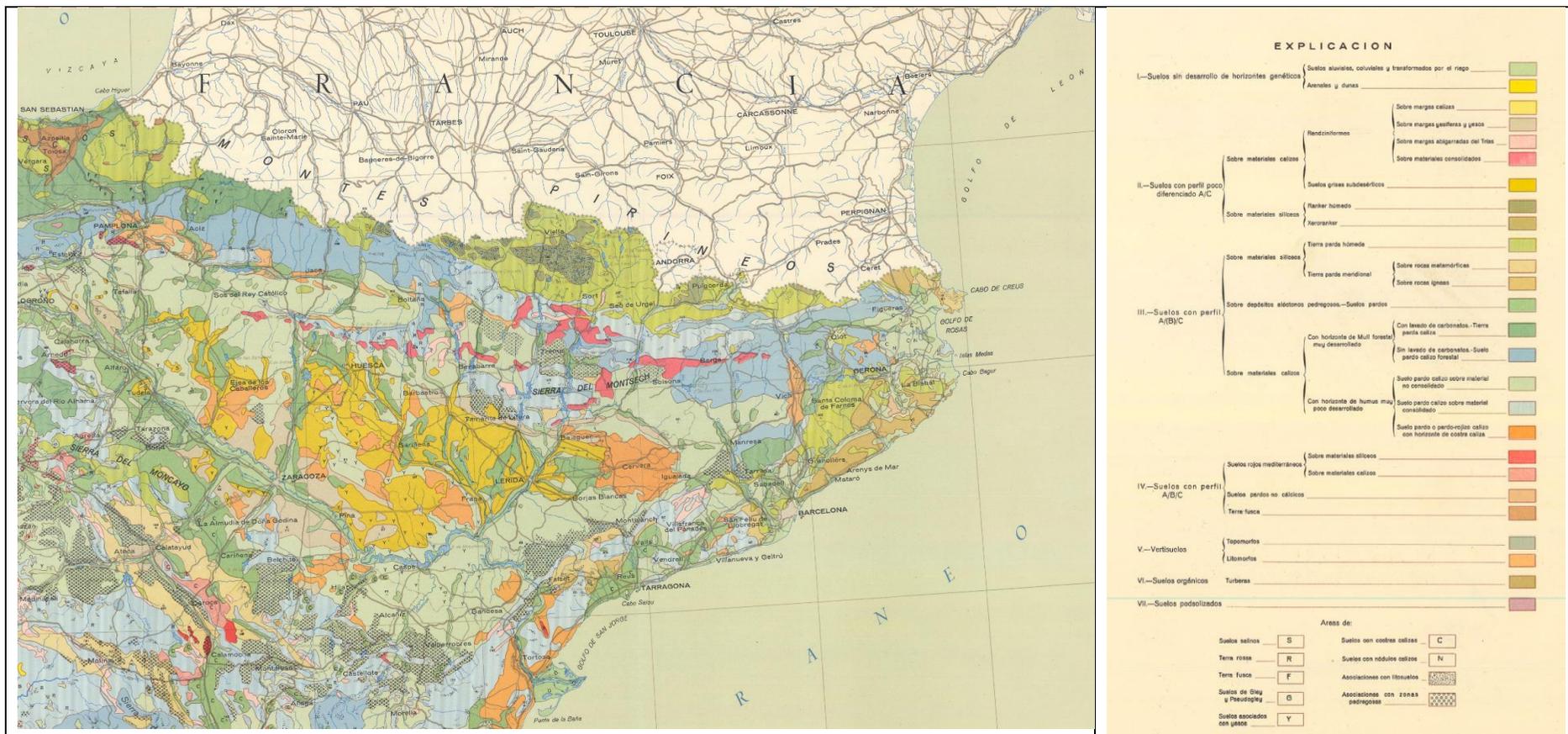


Figura 11. Suelos en el NE de España según el mapa histórico E.: 1:1:000.000 de la Comisión de Cartografía Agrobiológica (CSIC, 1966).

En el ESDAC (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/>) también podemos encontrar un mapa de suelos de Europa derivado de un proyecto colaborativo entre los países miembros de la UE y otros países vecinos, con participación del Centro Común de Investigación (JRC, Joint Research Centre). Deriva de un mapa a E.1:1.000.000 y representa los principales grupos de suelos de referencia (GSR) de la WRB (IUSS). En el Pirineo (Fig. 13), a la escala publicada, tan solo cinco GSR-WRB están representados: Cambisols (naranja), Fluvisols (azul), Leptosols con Regosols (gris) y Umbrisols (verde). En el margen izquierdo del Ebro, sorprende por su superficie, una mancha de Solonchaks, desde el somontano de Huesca hasta la confluencia Cinca-Segre.

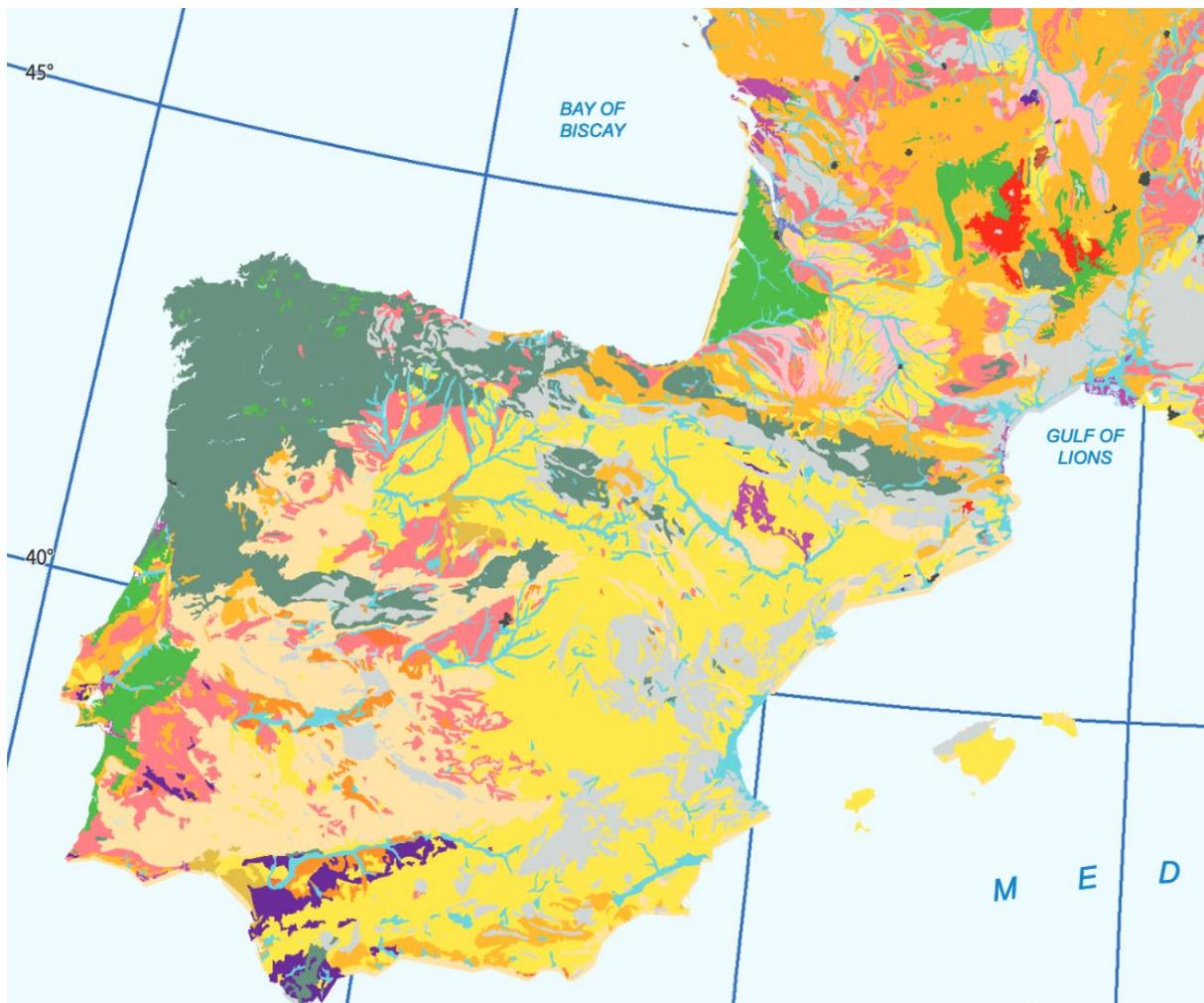


Figura 13. Extracto del mapa de los suelos de Europa (JRC-EU, 2010).

Para que la cartografía de suelos sea útil a nivel de ordenación territorial es necesario que su escala de publicación sea detallada (Badía et al., 1995). En algunas regiones pirenaicas se está llevando a cabo la cartografía detallada de los suelos, por ejemplo, en España, bajo el impulso de sus respectivos gobiernos regionales destacan: Navarra (Fig. 14) y Catalunya (Fig. 15).

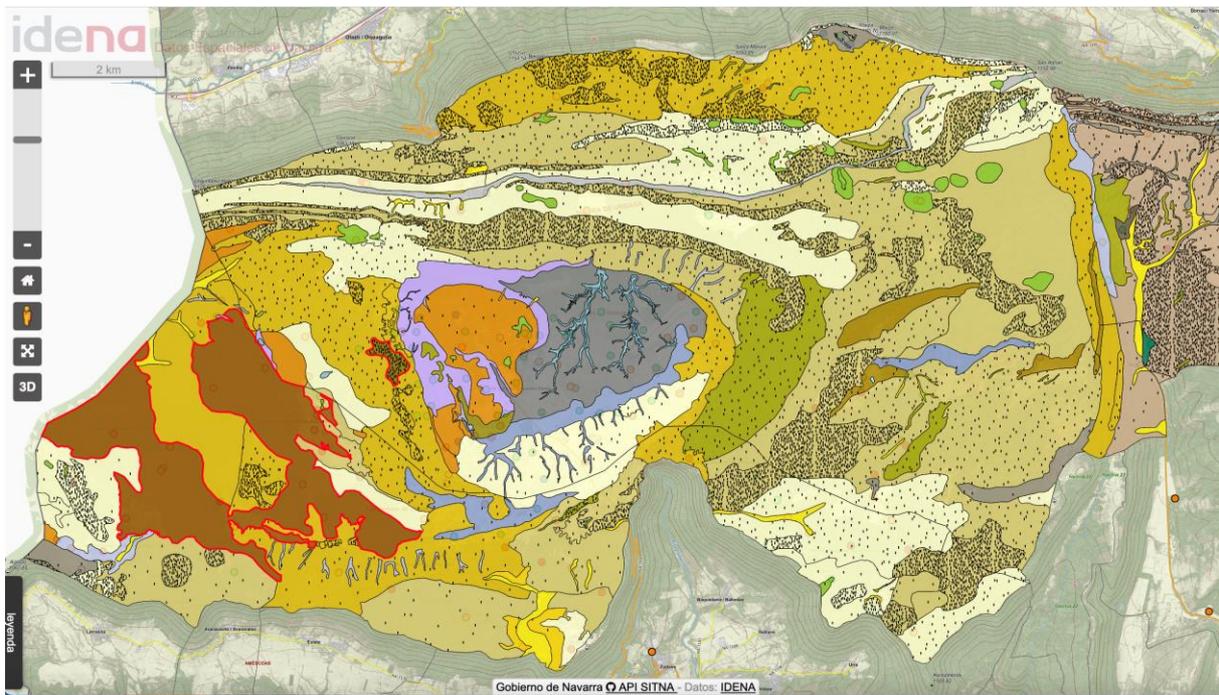


Figura 14. Extracto del mapa de los suelos de Navarra E.1:25.000. Ver detalles de la leyenda en: <https://tinyurl.com/23dszcdl>

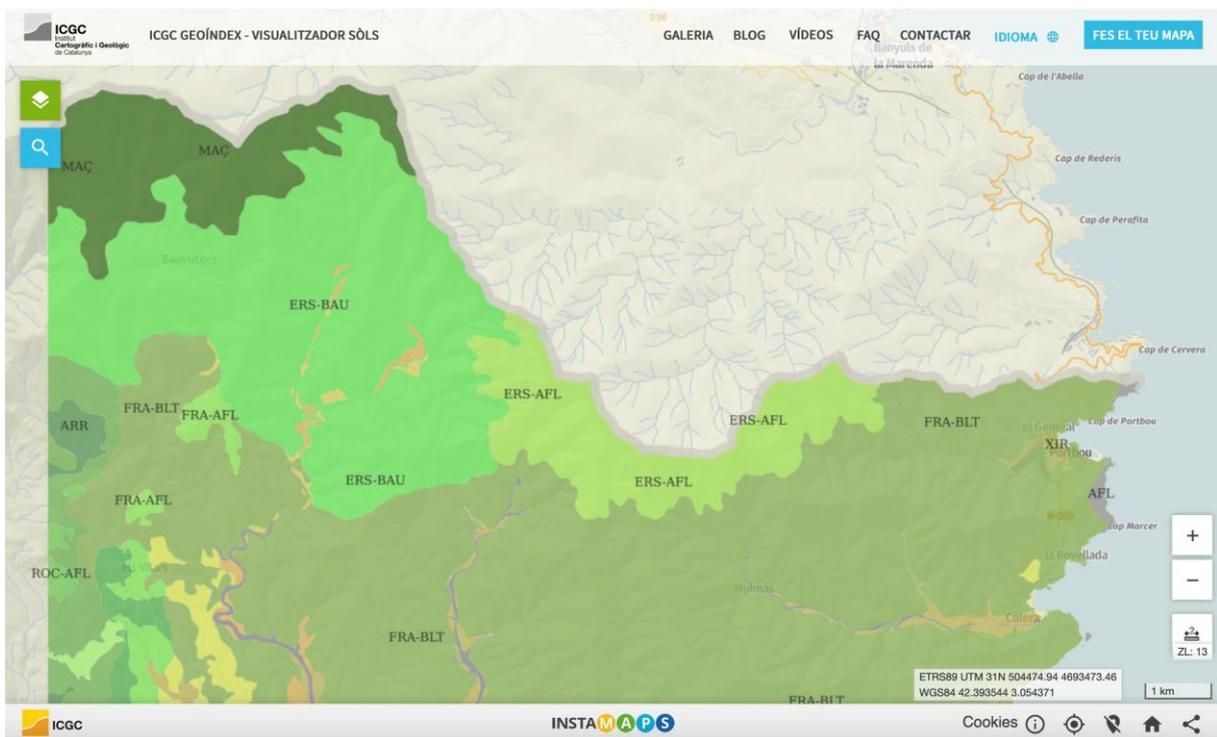


Figura 15. Extracto del mapa de los suelos del Pirineo catalán oriental E.1:25.000. Ver detalles en: <https://www.instamaps.cat/#/>

Puesto que estos mapas son de tipo básico, sus unidades cartográficas se fundamentan en una taxonomía de suelos, sea la WRB o la STS (o el RPF, en Francia). Pero a partir de ellos se pueden obtener mapas de propiedades y mapas temáticos. De hecho, ambos visores ofrecen mapas de clases agrológicas (en desarrollo). Consúltese el visor correspondiente para identificar las unidades cartográficas en las citadas regiones. En el caso del Pirineo francés, existe la cartografía

de suelos a una escala de 1:250.000 al igual que, prácticamente, toda la Francia continental (Fig. 16). En este caso, sus unidades cartográficas se basan en su propia taxonomía de suelos, el Référentiel Pédologique (AFES, 2008).

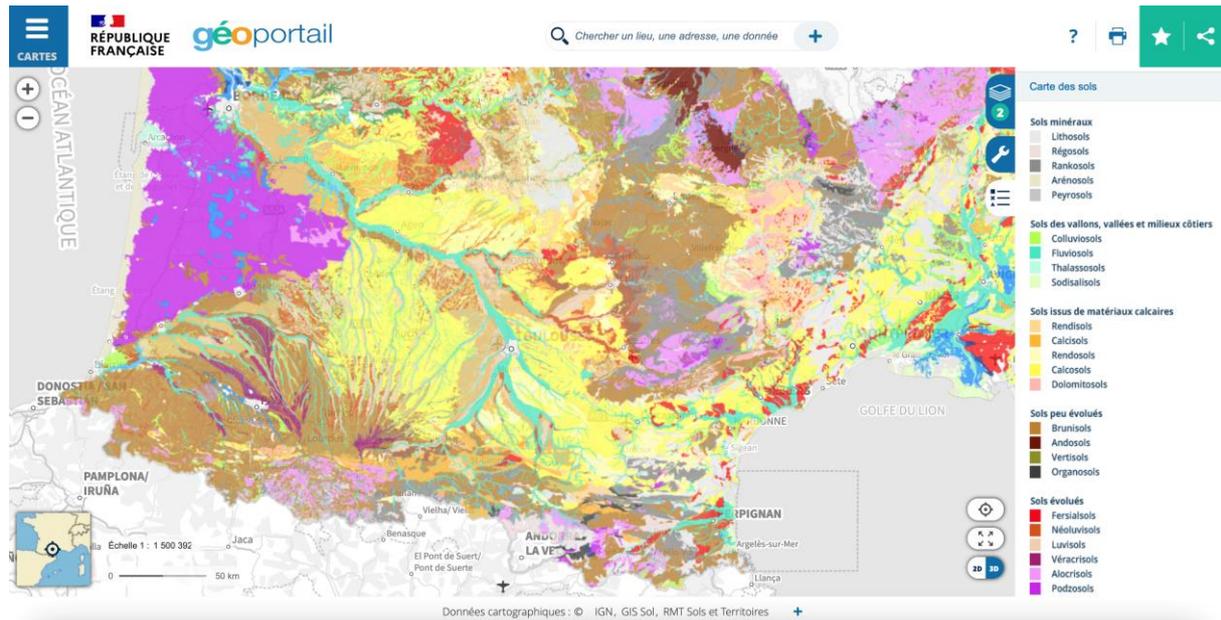


Figura 16. Extracto del mapa de los suelos del Pirineo francés. Ver detalles en: <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols>

En Francia, se eligió la escala de 1/250.000 para cubrir más rápidamente el territorio con un mapa de suelos. Este mapa (Fig. 17) representa unidades cartográficas, que se componen de unidades tipológicas no dibujadas pero descritas en una base de datos nacional DONESOL. Hay un mapa por región; Luego se hizo un esfuerzo de síntesis y armonización para producir un mapa único de Francia. Una escala aún mayor, 1/500.000 para cada región (Aquitania, Occitania), cubre todo el macizo pirenaico, pero apenas se utiliza. También hay algunos estudios más detallados. Se trata de estudios realizados en el marco de trabajos de investigación, por ejemplo, sobre el modo de distribución de los suelos en las rocas calizas del macizo de Pierre St Martin, o el modo de distribución de los suelos en los macizos graníticos de Cauterets o de Néouvielle; Pero estos estudios no proporcionan un mapa de suelos, sólo perfiles de suelo, su funcionamiento y su distribución en un paisaje de referencia. Más recientemente se han realizado dos estudios del Sector de Referencia en la zona de los Pirineos centrales (2023). Se trata de estudios detallados a 1/25000 que nos permiten afinar nuestro conocimiento sobre los suelos de montaña. Están diseñadas como zonas de taller.

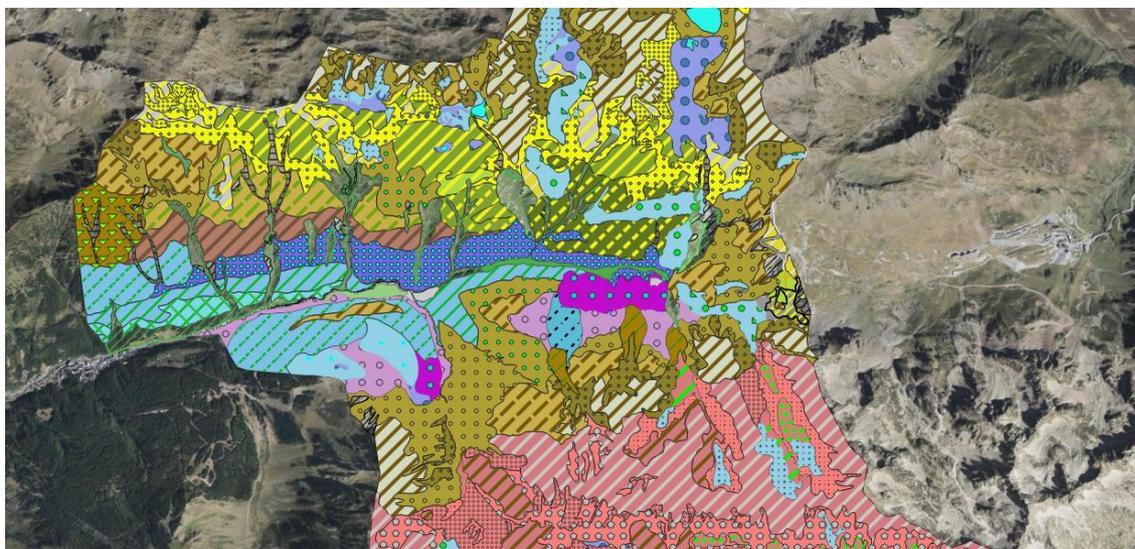


Figura 17. Extracto del mapa del sector de referencia TOPSOL. A la derecha esta la estación de esquí de Mongie. Fuente: Rigou, L. et al, (2022).

El macizo de los Pirineos franceses también incluye varias estaciones de la Red de Medición de la Calidad del Suelo "RMQS". Las observaciones realizadas en estas estaciones alimentan la base de datos DONESOL pero también una biblioteca de suelos instalada en Orleans (Conservatorio Europeo de Suelos CEES).

6. Los suelos del Pirineo frente al cambio climático

El cambio climático está provocando alteraciones significativas en los suelos del Pirineo, afectando a sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que pone en riesgo las múltiples funciones y servicios ecosistémicos que ofrece y, por tanto, el mantenimiento de la vida en la Tierra y en la salud de los ecosistemas. En algunos casos son modificaciones peculiares respecto a suelos de otras regiones del mundo (Smith et al., 2024). Revisemos algunos de los efectos del calentamiento global en los suelos del Pirineo:

Los suelos y el ciclo del agua

Los efectos del cambio climático serán especialmente críticos tanto sobre los suelos como sobre la flora, la fauna, los recursos forestales y los hídricos. En las montañas, la tasa de calentamiento puede suponer una reducción del agua disponible para las plantas. Una mayor cubierta arbustiva y arbórea a nivel de cuenca (agua verde) reduce la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, también llamada agua azul (Comín y Martínez-Rica, 2007). Localmente, un mayor requerimiento de producción de nieve artificial para el esquí intensivo puede competir por el aprovechamiento de las aguas.

Además, debe recordarse que la influencia de las áreas de montaña excede ampliamente la de sus límites geográficos; en términos generales, se considera que *más de la mitad de la humanidad depende de un modo u otro de los recursos y servicios que*

proporcionan las montañas. En concreto, la cordillera Pirenaica sostiene extensos regadíos en su vertiente sur. A modo de ejemplo, de Oeste a Este...el agua del río Irati (embalse de Itoiz) riega el sur de Navarra, el agua del río Aragón (embalse de Yesa), por el Canal de Bardenas, riega las Cinco Villas, con agua del río Gállego, a través del Canal de Monegros y del Cinca, se riegan suelos de Monegros (*sensu lato*); con el agua de los ríos Ésera y Noguera Ribagorzana, a través del Canal de Aragón y Cataluña se riega parte del Bajo Cinca y el Segrià; el Noguera Ribagorzana, a través del canal Algerri-Balaguer, alcanza La Noguera, con el agua el Noguera Pallaresa, se riega la Plana d'Urgell. En la vertiente norte también existen extensos regadíos en la cuenca del Garona alimentados con agua de los Pirineos. El río Garona nace en el noroeste del Pirineo catalán, en la comarca del Valle de Arán, y desemboca en el océano Atlántico, en el estuario de La Gironda (Francia). Además, con las presas hidroeléctricas construidas en las cuencas de estos ríos, se produce gran parte de la energía que consume la zona (Fig. 18). Se estima que el cambio climático reducirá drásticamente el potencial hidroeléctrico de los ríos de montaña, en concreto, en países como España, se espera una reducción de hasta un 25% de dicho potencial (Nogués-Bravo et al, 2007).

“Más de la mitad de la humanidad depende, de un modo u otro, de los recursos y servicios que proporcionan las montañas”

(Martin F. Price, Director of the Centre for Mountain Studies)



Figura 18. Embalse de Respomuso (t.m. Sallent de Gállego, Valle de Tena, Alto Gállego), a unos 2100 metros de altitud, construido a mediados del siglo XX, ocupando el cono de deyección del Circo de Piedrafita.

Aparte de estos cambios en los volúmenes en la reserva hídrica global, la modificación de la disponibilidad hídrica y el aumento de las temperaturas modificará los ciclos biogeoquímicos;

en concreto, la descomposición de la materia orgánica (MO), ralentizada sin disponibilidad hídrica, se acelerará en los momentos de una mínima humedad con las temperaturas por encima de lo habitual. Es bien conocida la correlación entre contenido en MO y muchas otras propiedades como la compactación, el intercambio de gases y agua, y, por tanto, la fertilidad del suelo.

Los usos del suelo en las montañas influyen en la disponibilidad y calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

Cambios en la cubierta vegetal, incendios y erosión

La tasa de calentamiento en las montañas en particular se está traduciendo en un ascenso de las isotermas, que se estima puede alcanzar los 400-500 metros de altitud. Ello está suponiendo cambios en la distribución altitudinal y en el periodo vegetativo de las especies debido al aumento térmico en el suelo y a la reducción de agua disponible para las plantas. Así, la cota en la que puede encontrarse el arbolado (*timber-line*) va ascendiendo, en especial para el pino negro (*Pinus uncinata*) y el pino royo (*Pinus sylvestris*). Y es previsible que plantas de las altas cumbres del Pirineo pierdan su biotopo, al faltarles las condiciones ambientales adecuadas para su desarrollo (Gómez et al., 2020). A la vez el incremento térmico, junto a cambios socio-económicos, favorecen la sucesión secundaria con sustitución de la cubierta herbácea ganada al bosque por vegetación arbustiva y arbórea. Los resultados obtenidos por el grupo Geoforest (IUCA-Unizar) muestran que, en la última década, la tasa de matorralización de pastos ha alcanzado las 6000 ha/año. Y desde los años 80, el 66% de los pastos, prados y campos agrícolas de la cordillera Pirenaica se han visto invadidos por matorrales, con una mayor afectación en el centro-oeste respecto al Pirineo oriental (Gelabert et al., 2021). Uno de los principales arbustos colonizadores de pastos de puerto en el Pirineo central, especialmente en solanas, es el erizón (*Echinopartum horridum*), planta almohadillada, espinosa, leguminosa y micorrízica, endémica del Pirineo y el macizo central francés (Fig. 19).



Figura 19. Matorralización de pastos mesófilos por erizón en la Ralla de Salz, Nerín (Sobrarbe)

La invasión de los pastos por este tipo de espinal en el Pirineo está tratando de ser controlada mediante su quema prescrita o su desbroce mecánico desde hace unas décadas, pero no siempre con éxito (Alados, et al, 2019; Alfaro et al, 2023; Mora et al, 2022; Quintana et al., 2024).

El incremento de las temperaturas y la variabilidad en los patrones de precipitación puede intensificar la erosión hídrica, que a su vez reducirá la capacidad de los suelos para retener humedad y nutrientes esenciales. Y es que la reducción de la cubierta nival y una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, como precipitaciones torrenciales, incrementan la vulnerabilidad a deslizamientos y la inestabilidad de las laderas. En el Pirineo Central la pérdida de suelo por dichas fluctuaciones climáticas se hace evidente en numerosas laderas afectadas por deslizamientos. Es habitual observar cómo suelos desarrollados, ácidos, con cervunal (*Nardus stricta*), se alternan con afloramientos de rocas o con suelos de menor desarrollo y espesor con tasca eutrófila de *Bromus erectus* (Badía et al., 2020; Fillat et al., 2008); es decir el mosaico que se observa en las comunidades vegetales pascícolas es fruto de cambios en el suelo. Es decir, la erosión del suelo provoca un rejuvenecimiento del suelo que se traduce en cambios en la composición florística y en el valor nutricional de los pastos de verano (Armas et al., 2020).

Otro fenómeno que puede estimular la erosión del suelo es la eliminación de la cubierta por grandes incendios forestales (Fig. 20).



Figura 20. Efecto del incendio estival de espinal de erizón en las laderas de Punta Mondoto (Nerín), a los pocos días de producirse (año 2017).

Se espera que el cambio climático aumente la duración y los riesgos de la temporada de incendios a nivel mundial, especialmente en el sur de Europa, asociados a olas de calor y sequías (Andela et al., 2017; Dupuy et al., 2020). Además de ese efecto indirecto, los incendios más severos tienen un efecto directo, térmico, inmediato, como es la oxidación de la materia orgánica del suelo y la alteración de su estabilidad estructural (McGuire et al., 2024). Obviamente, con los incendios forestales no solo se libera carbono del suelo a la atmósfera, sino aquel que estaba retenido en el conjunto de la biomasa del ecosistema forestal. Con esas pérdidas, se crea un ciclo de retroalimentación que conlleva a una mayor degradación del suelo y una recuperación del ecosistema cada vez más limitada (Neary, 2009).

Mientras los Pirineos actúen como sumideros de carbono, contribuirán a contrarrestar el efecto emisor que ejercen sus regiones vecinas que dependen de ellos para mantener la neutralidad climática.

Ante la creciente irregularidad pluviométrica y el incremento térmico, con la correspondiente mayor vulnerabilidad del arbolado frente a plagas (procesionaria), sequía e incendios, debe estimularse la gestión forestal y las prácticas agrosilvopastorales que minimicen dichos riesgos. En este sentido, el mantenimiento de la ganadería extensiva, trashumante, permite controlar la invasión del matorral como el aprovechamiento del recurso pastable en los puertos de montaña (Fig. 21).



Figura 21. Rebaño de oveja bearnesa en los puertos d'Ossau, en los Pirineos Atlánticos.

El sellado y ocupación de suelos de calidad

Un exceso de la presión humana puede contribuir a la degradación funcional del suelo y representan una amenaza tanto para la resiliencia ecológica de los ecosistemas pirenaicos como para su uso tradicional. En concreto, la actividad deportiva, masiva y continua, en determinados caminos y sendas de montaña (y sus alrededores), puede provocar su degradación, sea por compactación o por erosión, por encajamiento o laminar (Fig. 22). Un ejemplo paradigmático es el PN de Ordesa, visitado por unas 600.000 personas al año en sus diversos sectores, casi la mitad en el propio valle de Ordesa (además de los sectores de Pineta, Añisclo y Escuaín). El elevado impacto generado por el alto número de visitas va a regularse a través de un nuevo Plan de Movilidad Sostenible que entrará en vigor en 2025.



Figura 22. Efecto del pisoteo (*trampling effect*), fuera de pistas que genera la pérdida de suelo y el afloramiento del sistema radicular.

El sellado del suelo (por la construcción de vías de comunicación, de instalaciones relacionadas con el urbanismo, con el turismo...) elimina o reduce drásticamente muchos de sus servicios ecosistémicos. Aunque el Pirineo no es un área especialmente urbanizada, existe una tendencia a incrementarse con el tiempo. El sellado elimina o aísla (con asfalto u hormigón) la superficie del suelo sobre el que se construyen edificios y otras infraestructuras

(carreteras, etc.). Este proceso es irreversible dado que altera de forma permanente el estado natural del suelo y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos esenciales: aísla el suelo de la atmósfera, impide la infiltración de agua de lluvia y el intercambio de gases entre el suelo y el aire. El sellado del suelo aumenta el riesgo de inundaciones, reduce la infiltración de agua, reduce la capacidad del suelo para absorber y almacenar carbono, aumenta las temperaturas en las áreas urbanas y reduce la biodiversidad (Fokaides et al., 2016). Existe una creciente ocupación de espacios por parte de las instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas que tienen el objetivo de alcanzar un sistema energético neutro, con energías 100% renovables para contrarrestar la emisión de gases de efecto invernadero en el horizonte 2050. Esa ocupación implica que suelos agrícolas muy productivos, con el cambio de uso, dejen de serlo. Por ello, algunas administraciones (por ejemplo, la Generalitat de Catalunya con el Decret Llei 16/2019, de 26 de noviembre) tratan de proteger los suelos más productivos frente a otros usos como los parques solares. En resumen, con ese decreto se restringe el cambio de uso en terrenos de las clases agrológicas I y II y se limitan las superficies a ocupar en los terrenos con las clases III y IV a un máximo de la superficie agrícola del término municipal (el 10% de la superficie agrícola de secano y el 5% en regadío).

La mecanización de la extracción de madera, cada vez más común en España, es uno de los principales factores de compactación de los suelos. El uso de maquinaria en las labores forestales está generando problemas crecientes de erosión y compactación de suelos en los Pirineos. El peso elevado de los equipos forestales aumenta significativamente la carga por rueda, lo que incrementa el riesgo de daños durante las actividades de extracción de madera. Este proceso de compactación edáfica dificulta el desarrollo de la vegetación, al reducir la porosidad del suelo y empeorar la aireación, la retención de agua y el crecimiento radicular (Aroca Fernández et al., 2019),

La gestión territorial sostenible, que requiere conocer la calidad del suelo, es crucial para preservar los mejores suelos frente a otros usos, garantizar un entorno de vida saludable y abordar el cambio climático.

La biodiversidad del suelo

La Plataforma Intergubernamental sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES) ha advertido recientemente (11ª sesión plenaria, 12/2024) que la biodiversidad en términos generales está disminuyendo entre un 2 y un 6% por década, en todos los indicadores evaluados durante los últimos 50 años (<https://www.ipbes.net/events/ipbes-11>). Y la biodiversidad del suelo no es una excepción. Los cambios en las condiciones climáticas, en la cubierta vegetal y el manejo del suelo están reduciendo la biodiversidad que es capaz de albergar el suelo. Recordemos que ¼ parte de

la diversidad de la Tierra está en el suelo y que en un solo gramo de suelo podemos encontrar millones de microorganismos (Badía, 1995; Mathieu, 2009). Junto a los microorganismos (bacterias, hongos, algas), diversos grupos taxonómicos de la fauna están también presentes en los suelos de forma habitual, especialmente las lombrices de tierra, fundamentales para la salud del suelo. A modo de ejemplo, en prados de Fragen (Pirineo Central) se estimó la existencia en torno a 1,25 millones de lombrices por hectárea (Antoñanzas, 2002). En este trabajo, se identificaron dos géneros mayoritarios (*Lumbricus* sp. y *Allolobophora* sp.) con similar abundancia. Además, se demostró como la gestión de los prados afectaba a la biomasa de las lombrices (Fig. 23).



Figura 23. La abundancia de lombrices es habitualmente considerada un indicador de la salud del suelo.

En 2015, NEIKER-Tecnalia creó unas nuevas 'Tarjetas de salud' para conocer el estado de los ecosistemas agrícolas donde los parámetros biológicos del suelo adquieren gran trascendencia (<http://www.soilmicrobialecolgy.com/services/>). Teniendo en consideración esta misma idea, es decir valorando las propiedades biológicas tanto como las físicas y químicas, el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA) y la Fundación Ibercivis, financiados por la FECYT, llevaron a cabo el proyecto de ciencia

ciudadana “Vigilantes del Suelo” (<https://ibercivis.es/ibercivis-cita-vigilantes-del-suelo-ciencia-ciudadana/>), donde también las lombrices eran protagonistas (Fig. 22).

Una primera evaluación de la biodiversidad del suelo a nivel europeo se abordó en 2018 (LUCAS), donde se recopilaban 880 muestras de suelos (que se ampliaron a 1500 en 2022); la primera aproximación se estableció mediante metabarcodificación de ADN (Köninger et al., 2023; Labouyrie et al., 2023). Este análisis indicaba, sorprendentemente, que se encontraba una mayor biodiversidad en las tierras de cultivo que los pastizales y los bosques. Dadas las limitaciones de ese método, la biomasa microbiana (Cmic) y la respiración basal (bSR) en muestra fresca, van a usarse como Indicador biológico de la salud del suelo en la Unión Europea (Smith et al., 2021) y se plantea hacer su seguimiento en relación con la directiva de resiliencia (Comisión Europea, 2023). Ambas determinaciones (bSR y Cmic) se llevan realizando en el Pirineo Central desde el siglo pasado (Badía y Martí, 1999). En estos trabajos, ya se observó como el contenido de materia orgánica del suelo se correlaciona positivamente tanto con la actividad microbiana (bSR) como con la cantidad de microorganismos (Cmic) o biomasa microbiana (Tabla 4).

Tabla 4: Principales propiedades biológicas de suelos bajo prados y pastos con diferente manejo (Fragen, Pirineo Central). Media de 10 réplicas (n=10) por parcela (4).

Parcela/uso:	MO (%)	bSR (mg CO ₂ /100 g ss)	nSR (dia ⁻¹) = C.M.	Cmic (F-E)	Cmic (F-I)	Cmic/Corg (%)
Prado intensivo (11)	6,00 b	13,46 b	1,05 b	161,6 a	132,5 b	3,82 a
Prado extensivo (31)	3,83 c	11,87 b	1,48 a	22,48 d	50,1 d	2,33 b
Pasto en uso (13)	3,53 c	12,47 b	1,71 b	36,93 c	71,7 c	3,60 a
Pasto abandonado (32)	8,70 a	18,05 a	1,00 b	60,03 b	152,9 a	3,10 ab

Abreviaturas: MO, materia orgánica, bSR, respiración basal (CO₂ acumulado en un periodo de incubación de 30 días); FI (método fumigación-incubación); FE (método fumigación-extracción).

Nota: Tanto en el prado intensivo (perfil 11), con riego y purín de vacuno, como el prado extensivo (perfil 31), en seco y fertilización mineral 0-14-7, la vegetación pertenece a la Asociación *Rhinanto-Trisetum flavescens*; el pasto (perfil 13) a la As. *Euphrasio-Plantaginetum media* y el pasto abandonado (perfil 32) con la As. *Buxo-Rubetum ulmifolii*. Más info en: Badía y Martí (1999).

En los Pirineos franceses, la evaluación de la biodiversidad del suelo es reciente y aún incompleta. Se está implementando gradualmente, por ejemplo a través del programa RMQS-Biodiv pilotado por INRAe Infosol; Todavía afecta sólo a estaciones aisladas repartidas por todo el macizo.

El permafrost

El permafrost es un suelo o cualquier depósito superficial que permanece permanentemente congelado durante por lo menos dos años consecutivos (<https://cit.iec.cat/DMCSE>). Este fenómeno es propio de zonas de elevada latitud, como las regiones árticas, pero en los

Pirineos puede encontrarse a cotas altas, por encima de los 2.700 metros de altitud. La extensión del permafrost en los Pirineos es muy discontinua y se encuentra limitada al piso nival y la parte superior del piso alpino, en laderas con pendientes suaves y con baja exposición solar, sea en laderas umbrías o en zonas de acumulaciones de bloques y rocas, que actúan como aislantes térmicos (Serrano et al., 2001). En concreto, el OPCC-CTP (2018) destaca la presencia de permafrost en los macizos del Aneto, Vignemale, Posets (OPCC-CTP, 2018). Sabiendo que este concepto de permafrost incluye tanto suelos como depósitos rocosos, debe citarse que en el proyecto Permapyrenees (Interreg-POCTEFA) se identifican áreas heladas en un mapa interactivo (<https://permapyrenees.eu/ca>). En este proyecto se monitorean 7 zonas con permafrost distribuidas tanto en la parte francesa como en la española ya la andorrana de los altos Pirineos, estudiando su evolución temporal (Tabla 5). Los resultados preliminares de dicho proyecto muestran que el permafrost en los Pirineos está fragmentándose y disminuyendo incluso con ligeros incrementos de las temperaturas. El deshielo del permafrost está activando algunos procesos geomorfológicos como deslizamientos de ladera, inestabilidad del terreno y desprendimientos de rocas (OPCC-CTP, 2018); estos procesos van a comportar la desaparición del suelo, si es que había podido formarse en tan extremas condiciones.

En los Pirineos Centrales, Bartolomé et al (2023) citan la presencia de permafrost en la cueva de Devaux (Gavarnie) pero en este caso, más que suelos helados, se trata de masas de hielo acumulado, que, según estos autores alcanzaría unos 200 metros de espesor. La evaluación de cambios de dicho espesor, a lo largo del tiempo, puede servir para cuantificar los efectos del calentamiento global.

Tabla 5: Características de las zonas de estudio del proyecto Permapyrenees (Interreg-POCTEFA), monitorizadas para el seguimiento de la evolución del permafrost.

Zona de estudio		Altitud (m)	Orientación predominante	Tipo de Permafrost	Características geológicas
Ardiden	Lac Grand	2460	Norte	Discontinuo	Granito, gneis y rocas metamórficas
Vignemale	Coll de Cerbillona	3198	Norte	Discontinuo	Granito, gneis y rocas metamórficas
Monte Perdido	Pico de Marboré	3251	Norte	Discontinuo	Calcáreas, dolomías y rocas sedimentarias
Maladeta	Pico Coronas	3297	Norte	Discontinuo	Calcáreas, dolomías y rocas sedimentarias
Bissiberri	Bissiberri	2600	Norte	Discontinuo	Pizarras, cuarcitas y rocas metamórficas
Pica d'Estats	Clot de Broate	2800	Nordeste	Discontinuo	Granito y rocas metamórficas

Circ de Pressons (Andorra)	Clot de la Menera	2492	Nordeste	Discontinuo	Calcáreas y rocas sedimentarias
----------------------------	-------------------	------	----------	-------------	---------------------------------

Los suelos orgánicos (Histosols)

Los suelos orgánicos (Histosols) en los Pirineos se distribuyen de manera fragmentada y se caracterizan por alta su vulnerabilidad a los efectos del cambio climático; su presencia va ligada a la ralentización de la mineralización del carbono por ausencia de oxígeno, en condiciones de encharcamiento, además de las bajas temperaturas propias de la alta montaña. Los Histosols, aunque minoritarios en la cordillera pirenaica, desempeñan un papel fundamental en la regulación del ciclo hidrológico y en el secuestro de carbono en otras latitudes. El cambio climático, con un aumento térmico y una reducción del nivel freático, va a suponer la liberación de carbono y metano, dos gases de efecto invernadero, contribuyendo a un ciclo de retroalimentación positiva que acelera el calentamiento global y el proceso de deshielo (Serrano et al., 2001). Además de aumentar la emisión de dichos gases de efecto invernadero, la merma o desaparición de los Histosols supondrá la pérdida de la biodiversidad que llevan asociada.. A pesar de su importancia ecológica, la superficie exacta de las turberas pirenaicas aún no ha sido totalmente delimitada, lo que subraya la necesidad de futuras investigaciones para comprender mejor su distribución y estado de conservación (OPCC-CTP, 2018). En este sentido, el proyecto REPLIM, asociado al Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC), ha desarrollado una red de observatorios para monitorizar lagos y turberas en el Pirineo (Fig. 24).



Figura 24: Localización de las turberas y lagos de montaña monitorizados en el proyecto REPLIM (<https://sitios.csic.es/web/ipe-instituto-pirenaico-de-ecologia/proyecto-replim>)

Los resultados obtenidos en este proyecto inciden en la ya conocida función de las turberas como sumidero de carbono. Aunque las variaciones mensuales e interanuales de CO_2 y CH_4 son muy significativas, se ha puesto en evidencia como las sequías reducen significativamente la capacidad de las turberas para secuestrar carbono. Aunque las emisiones de metano fueron relativamente bajas, su contribución al balance total no es despreciable. Este estudio destaca la importancia de preservar y monitorear continuamente estos ecosistemas sensibles, esenciales para el ciclo global del carbono, ante el cambio climático (Garisoin et al., 2024).

La cartografía de turberas en Navarra se llevó a cabo en el marco del proyecto LIFE TREMEDAL, con el objetivo de disponer de información actualizada y homogénea para la Región Biogeográfica Atlántica de la Península Ibérica y su zona de transición. Esta cartografía incluye datos sobre la presencia y distribución de las turberas, así como la tipificación y caracterización de los hábitats asociados. Los resultados obtenidos en este proyecto están disponibles en el siguiente enlace: Informe [LIFE TREMEDAL](#). El objetivo principal del proyecto ha sido mejorar la conservación de los hábitats turbosos e higrófilos de interés comunitario y aumentar su resiliencia frente a condiciones adversas, en 25 sitios de la

Red Natura 2000 ubicados en Galicia, Asturias, Castilla y León, País Vasco y Navarra. (Fig. 25).



Figura 25. Acción del proyecto LIFE Tremedal-Cartografía y seguimiento de hábitats de turberas de Navarra.

7. Aspectos legislativos relacionados con los suelos

Los diversos países europeos están adoptando directivas y normativas de la Comisión Europea y del Parlamento, fruto de la creciente preocupación por el suelo. Pero, para transcribirlas al ordenamiento jurídico estatal (español o francés, por ejemplo), y hacerlas cumplir, es imprescindible disponer de información de suelos. Sirva como ejemplo la estrategia europea “De la Granja a la Mesa” donde se plantea la fertilización racional de los cultivos para lograr la sostenibilidad productiva y ambiental de la agricultura. En este sentido, el 27 de diciembre de 2022, el Consejo de Ministros del Estado Español aprobó, a propuesta del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, un real decreto con medidas sobre la nutrición sostenible de los suelos agrarios que han sido recientemente actualizadas (27 de agosto de 2024).

Aunque en España no ha habido redes activas de monitoreo del suelo, y los recursos destinados al estudio de suelos han disminuido históricamente, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación español acaba de impulsar un análisis del contenido de carbono en los suelos agrícolas de todo el país. Esta iniciativa implica el análisis de suelos de 16.000 parcelas agrícolas cada 2 años, lo que indica un tamaño de muestra significativo. El propósito de este ejercicio es evaluar los resultados de la nueva PAC recientemente implementada (Arias-Navarro et al, 2024).

“Hemos legislado cómo debe ser la calidad del aire que respiramos o el agua que bebemos, pero no hemos legislado como tiene que ser la salud del suelo a pesar de ser la base de todo ecosistema”

Jorge Mataix-Solera, Presidente de la SECS, EFE-Verde (2024)

Por su parte, Francia cuenta con un sistema integral de monitoreo de la calidad del suelo (Réseau de mesures de la qualité des sols), por el que lleva a cabo muestreos, mediciones y observaciones del suelo cada 15 años en 2240 sitios en todo el país desde el año 2000. Este enfoque sistemático garantiza la evaluación y el monitoreo periódicos de las condiciones del suelo. La legislación de aspectos relacionados con el suelo lleva un importante avance en Francia (Fig. 26) en temáticas tan variadas como la conservación, restauración, sellado, contaminación, etc, tal y como se recoge en la aplicación SoilLEX del portal de suelos de FAO (<https://www.fao.org/soils-portal/es/>).

France - Country Profiles

Soil conservation

- Code Forestier partie législative (nouveau). Date of text: 26-01-2012 (National)
- Code de l'environnement (Partie législative). Date of text: 18-11-2000 (National)
- Code rural et de la pêche maritime (Partie législative). Date of text: 01-01-1979 (National)
- Décret n° 2005-117 relatif à la prévention de l'érosion et modifiant le code rural. Date of text: 07-02-2005 (National)

Soil restoration

- Code Forestier partie législative (nouveau). Date of text: 26-01-2012 (National)
- Code de l'environnement (Partie législative). Date of text: 18-11-2000 (National)

Soil erosion

- Décret n° 2005-117 relatif à la prévention de l'érosion et modifiant le code rural. Date of text: 07-02-2005 (National)
- Code Forestier partie législative (nouveau). Date of text: 26-01-2012 (National)

Nutrient Imbalance

- Arrêté du 23 octobre 2013 modifiant l'arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. Date of text: 01-08-2005 (National)
- Code rural et de la pêche maritime (Partie législative). Date of text: 01-01-1979 (National)

Soil sealing

- Code rural et de la pêche maritime (Partie législative). Date of text: 01-01-1979 (National)

Soil pollution

- Arrêté du 22 août 2002 portant création d'un groupe de travail relatif aux sites et sols pollués dans le cadre du Conseil supérieur des installations classées. Date of text: 22-08-2002 (National)
- Code de l'environnement (Partie législative). Date of text: 18-11-2000 (National)

Figura 26: Instrumentos jurídicos relacionados con el suelo y gobernanza del suelo (SoiLEX – FAO) <https://www.fao.org/soils-portal/soilex/country-profiles/details/es>

En relación a la protección de los suelos de calidad en Francia, existen las siguientes disposiciones: las zonas agrícolas cuya conservación sea de interés general, ya sea por la calidad de su producción, por su situación geográfica o por su calidad agronómica, pueden ser clasificadas como **zonas agrícolas protegidas** (ORDONNANCE n°2015-1174 du 23 septembre 2015 - art. 9). Éstas se delimitan a través de varias vías: por decreto prefectoral adoptado a propuesta o previo acuerdo del consejo municipal de los municipios interesados; a propuesta del órgano deliberante del establecimiento público competente en materia de plan urbano local o de esquema de coherencia territorial, previo dictamen de la cámara de agricultura, del Instituto Nacional de Origen y Calidad en las zonas de denominación de origen controlada y de la comisión departamental para la orientación de la agricultura y tras una encuesta pública realizada en las condiciones previstas en el Capítulo III del Título II del Libro

I del Código de Medio Ambiente. La existencia de pequeñas parcelas arboladas en el interior de dicha zona no constituye un obstáculo para esta delimitación. Ver: (https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006071367/LEGISCTA000006167970/?anchor=LEGIARTI000031219324#LEGIARTI000031219324).

En este mismo sentido, desde el Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació, de la **Generalitat de Catalunya** se pretenden proteger los suelos más productivos (clases agrológicas I a IV) frente a la instalación de placas fotovoltaicas. Como se adelanta en apartados previos, el Decreto aprobado (Decret Llei 16/2019, de 26 de noviembre), dicho de forma resumida, es muy restrictivo con la instalación de placas fotovoltaicas en los terrenos con las mejores clases agrológicas (I y II) y moderadamente restrictivo para las clases III y IV; en concreto, para estas última admite ocupar un máximo de la superficie agrícola del término municipal (el 10% de la superficie agrícola de secano y el 5% en regadío).

El **Gobierno de Navarra** ha creado un protocolo para identificar suelos agrarios aptos para energías renovables, protegiendo los de alto valor productivo. Este protocolo diferencia entre tierras de secano y regadío, considerando de alto valor los secanos con rendimiento superior a 2,2 Tn/Ha. Solo los secanos con rendimientos inferiores podrán acoger instalaciones de energías renovables. En el caso de los suelos de regadío, el Plan Foral de Regadíos actúa como principal herramienta de protección, considerando protegidas las superficies incluidas, salvo los suelos de clase IV. Además, la **Ley Foral 1/2002, de 7 de marzo**, garantiza la protección de los suelos de regadío durante 15 años desde su puesta en riego. Por otro lado, el **Decreto Foral Legislativo 1/2017, de 26 de julio**, establece que no se pueden desarrollar grandes proyectos fotovoltaicos en tierras agrícolas fértiles de alta productividad. Estas normativas contribuyen a asegurar el uso sostenible del suelo en Navarra, promoviendo la protección de suelos agrícolas de alto valor.

Siguiendo con las iniciativas y estrategias que la Unión Europea ha desarrollado en las últimas décadas para abordar la crisis climática, la pérdida de biodiversidad y la degradación ambiental, destacan: el Pacto Verde Europeo (2019), que establece la hoja de ruta hacia la neutralidad climática para 2050, y la Ley de Restauración de la Naturaleza (2023). Otras políticas relacionadas incluyen la Estrategia de Biodiversidad (2020), la Ley del Clima (2021) y la propuesta de la Ley de Vigilancia del Suelo (a aprobar en 2025), todas ellas enfocadas en la restauración de ecosistemas, la protección de la biodiversidad y la promoción de una economía circular. Este marco legislativo no solo busca mitigar los efectos del cambio climático, sino también garantizar la resiliencia de los sistemas naturales y sociales frente a desafíos futuros, como la seguridad alimentaria y los desastres naturales, subrayando el compromiso de Europa con un desarrollo ambientalmente sostenible y socialmente equitativo.

El Pacto Verde Europeo fue lanzado en 2019 como una estrategia integral para convertir a Europa en el primer continente climáticamente neutro para 2050. Entre sus objetivos destacan: Lograr una economía circular limpia y sostenible, alcanzar la neutralidad climática para 2050 y reducir las emisiones en un 55 % para 2030, en comparación con los niveles de 1990. Las medidas clave de esta iniciativa incluyen la implementación de políticas para la descarbonización de sectores como la energía, el transporte y la industria, el impulso de las energías renovables, y la promoción de la eficiencia energética.

En el año 2020, se adopta la Estrategia de Biodiversidad para 2030, que forma parte del Pacto Verde, y se centra exclusivamente en la protección y restauración de la biodiversidad en Europa. Esta Estrategia establece objetivos específicos para revertir la pérdida de biodiversidad, como la ampliación de áreas protegidas y su mejor gestión, la restauración de ecosistemas degradados y la reducción del uso de pesticidas y fertilizantes. También subraya la necesidad de aumentar la financiación, así como integrar la biodiversidad en políticas sectoriales como la agricultura y la pesca, y fomentar la educación y sensibilización pública sobre su valor, con el fin de garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas y las actividades humanas. Además, establece un marco para abordar los impactos de la pérdida de biodiversidad en la salud, el medio ambiente y la economía, mientras contribuye a los objetivos del Pacto Verde Europeo.

En 2021, como parte de las misiones dentro del Horizonte Europa, se lanza la Misión "Pacto por el Suelo para Europa" La Misión lidera la transición hacia suelos sanos mediante la financiación un ambicioso programa de investigación e innovación con un fuerte componente de ciencias sociales. Además, establece una red de 100 laboratorios y áreas-faro para cocrear conocimientos, probar soluciones y demostrar su valor en condiciones reales. Por otra parte, también pretende desarrollar un marco armonizado para la vigilancia del suelo en Europa y sensibilizar a la población sobre la importancia vital de los suelos, para liderar la transición hacia suelos sanos a una escala temporal media (hasta 2030). Esta misión propone los siguientes objetivos: reducir la desertificación, conservar las reservas de carbono orgánico del suelo, detener el sellado del suelo y aumentar la reutilización de los suelos urbanos, reducir la contaminación del suelo y mejorar la restauración, prevenir la erosión, mejorar la estructura del suelo para mejorar su biodiversidad, reducir la huella mundial de la UE en los suelos y mejorar la alfabetización sobre suelos en la sociedad

En este mismo año, se promulga la Ley del Clima de la UE como un paso crucial para consolidar legalmente los objetivos climáticos del Pacto Verde. Esta ley, establece un marco legal para alcanzar la neutralidad climática en la Unión Europea para 2050, y su principal objetivo es hacer vinculante el compromiso de la UE con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar la sostenibilidad a largo plazo del continente en términos climáticos, reforzando el compromiso de la UE con el Acuerdo de París. Esta ley, también

establece un objetivo intermedio de reducción de emisiones del 55% para 2030 en comparación con los niveles de 1990, como parte de la Estrategia de Neutralidad Climática.

En 2023, la Comisión Europea presentó la Ley de Vigilancia del Suelo, cuyo propósito es abordar la degradación del suelo y garantizar su protección sostenible a largo plazo. Esta legislación incluye un sistema armonizado de monitoreo de suelos en la UE, la identificación de suelos degradados y el desarrollo de planes de restauración, la prevención de la urbanización descontrolada y la contaminación del suelo, así como la promoción de prácticas agrícolas sostenibles. Esta ley también reconoce la importancia del suelo en la captura de carbono y en la lucha contra el cambio climático

Por su parte, la Ley de Restauración de la Naturaleza, la primera de su tipo en Europa, aprobada en el año 2023, es un componente esencial de la Estrategia de Biodiversidad para 2030. Esta legislación establece objetivos vinculantes para restaurar ecosistemas degradados como humedales, ríos, bosques y ecosistemas marinos, incrementar la biodiversidad y fortalecer los servicios ecosistémicos, como la purificación del agua, la polinización y la protección contra inundaciones y mitigar el cambio climático limitando el calentamiento global a 1,5 °C. Esta ley se alinea con los compromisos climáticos y de biodiversidad establecidos previamente en el Pacto Verde Europeo.

Tabla 5: Acciones y Normativa Europea para la protección del suelo:

	Estrategia de Protección del Suelo	Misión "Pacto por el Suelo para Europa"	Ley de Vigilancia del Suelo	Ley de Sanidad del Suelo	
Nombre	Estrategia de Protección del Suelo de la UE	Misión Pacto por el Suelo para Europa	Directiva relativa a la Vigilancia y Resiliencia del Suelo (COM(2023) 416)	Ley de Sanidad del Suelo (propuesta 2024)	
Carácter	Político, vinculante	no	Político, marco de acción	Jurídico, marco técnico	Jurídico, vinculante
Enfoque	Visión integral hasta 2050	Restauración y gestión sostenible del suelo hasta 2030. Participación ciudadana y proyectos locales	Monitoreo de la salud del suelo	Restauración y estándares de salud	
Fecha	2021	2021	5 de julio de 2023	2024	

Objetivos principales	<ul style="list-style-type: none"> - Proteger los suelos frente a amenazas como desertificación y contaminación. - Integrar el suelo en otras políticas (clima, biodiversidad, agricultura). - Garantizar que todos los suelos estén en buen estado para 2050. 	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer un sistema de monitoreo continuo de suelos. - Crear distritos edáficos en los Estados miembros para recopilar datos homogéneos. - Detectar riesgos y apoyar políticas basadas en datos 	<ul style="list-style-type: none"> - Promover la conciencia sobre la importancia del suelo. - Colaboración entre Estados miembros. - Innovación en gestión y monitorización del suelo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Introducir un marco legal para definir y restaurar suelos en mal estado. - Lograr estándares mínimos de salud del suelo en toda la UE. - Apoyar la neutralidad climática y la biodiversidad.
------------------------------	---	---	---	--

La Unión Europea se compromete a mejorar la salud del suelo en beneficio de las personas, los alimentos, la naturaleza y el clima, reconociéndolo como un recurso natural finito y no renovable, con una función esencial en la regulación de varios servicios ecosistémicos, como el almacenamiento, filtrado y transformación de sustancias, incluidos agua, nutrientes y carbono y su importancia estratégica para la mitigación y adaptación al cambio climático, la producción agrícola, la seguridad alimentaria y la preservación de la biodiversidad. Alineada con los objetivos del Pacto Verde Europeo, la UE ha diseñado diversas estrategias y marcos normativos para abordar los desafíos relacionados con la degradación del suelo y fomentar prácticas agrícolas sostenibles, que quedan resumidos en la tabla anterior (Tabla 5).

Otras leyes de protección del suelo en España:

Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. Esta ley sustituye parcialmente a la anterior **Ley 22/2011**, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, y adapta la legislación española a las normativas europeas más recientes sobre la gestión de residuos, la prevención de la contaminación y la restauración de los suelos contaminados.

- **Artículo 20** (Zonas de especial protección): La ley establece criterios especiales para la protección de suelos en zonas que están bajo mayor riesgo de contaminación, como los espacios naturales protegidos, suelos agrícolas y áreas de alto valor ecológico.
- **Artículo 23** (Restauración de suelos contaminados): La ley introduce una normativa más clara sobre la identificación de los suelos contaminados y la responsabilidad de su restauración, considerando los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

- **Artículo 24** (Plan de restauración de suelos contaminados): Regula los procedimientos específicos para la restauración de suelos contaminados, estableciendo planes de actuación a nivel local y nacional

Algunos aspectos de la política de protección del suelo en Aragón:

4/2009, 22 de junio, Ordenación del Territorio de Aragón

Ley que hace referencia a la protección del suelo, aunque su enfoque principal es la ordenación del territorio, el uso sostenible del suelo y el desarrollo equilibrado del territorio en la comunidad autónoma de Aragón.

- **Artículo 6** (Objetivos de la ordenación territorial): La ley establece como objetivo la protección y conservación de los suelos agrícolas y naturales. Esta protección se logra mediante el desarrollo de políticas que favorezcan la utilización responsable del suelo, evitando la sobreexplotación o la ocupación de terrenos con valor ecológico, agrícola o paisajístico.
- **Artículo 7** (Zonas de protección especial): Se identifican y protegen zonas de alto valor natural o agrícola, donde el uso del suelo está sujeto a restricciones para garantizar la conservación del patrimonio natural, la biodiversidad y la calidad del suelo.

11/2014, 4 de diciembre, Prevención y Protección Ambiental de Aragón

Esta ley tiene como objetivo establecer un marco normativo para la prevención de riesgos ambientales y la protección de los recursos naturales, incluyendo el suelo, en la comunidad autónoma de Aragón.

- **Artículo 4** (Principios generales de la prevención): El suelo se menciona como un componente esencial en el enfoque de la ley hacia la protección ambiental, estableciendo la necesidad de prevenir su degradación.
- **Artículo 16** (Zonas protegidas y espacios naturales): En este contexto, se protege el suelo de las zonas que tienen un alto valor ecológico, como los espacios naturales protegidos, los humedales o las áreas agrícolas de alto valor.

8. Take-home message

A lo largo de este trabajo, se ha explorado en detalle el estado actual de los suelos del Pirineo, poniendo de manifiesto tanto los avances como las carencias existentes en la información, protección y divulgación de estos recursos edáficos. En este sentido, *conocer el suelo para protegerlo* es un principio clave que debe guiar las acciones futuras. Se proponen acciones concretas para superar las lagunas de información, fortalecer la protección frente a amenazas

y mejorar la divulgación del conocimiento generado, con el fin de garantizar que tanto la sociedad como los profesionales del sector estén mejor preparados para afrontar los retos del futuro. Por ello, se proponen algunos pasos que conduzcan a una mejora del conocimiento del suelo en el Pirineo (Fig. 27).



Figura 27. Pasos para ampliar el conocimiento de los suelos pirenaicos.

1. Información:

Con lo descrito en los apartados anteriores, puede concluirse que conocemos los aspectos generales del suelo del Pirineo, pero con carencias en cuanto al conocimiento de la distribución de los diferentes grupos de suelos, información que, además, es muy dispar entre regiones. El material disponible hasta la fecha se encuentra bajo diferentes formatos, escalas y leyendas, según la región o país. Por ello, se proponen algunos pasos que conduzcan a una mejora del conocimiento del suelo en el Pirineo, como la recopilación de la información disponible e incorporarla a bases de datos con formatos actualizados. Existen vacíos por completar en algunas regiones, por lo que sería necesario estimular a las instituciones correspondientes a que potencien los equipos de trabajo existentes y creen los equipos que no existan todavía. Estos equipos deberían trabajar a largo plazo bajo un paraguas institucional, con una metodología y un lenguaje edafo-taxonómico común para futuros trabajos y reciclando la información generada hasta la actualidad.

Acciones necesarias:

Dentro de la mejora de la información, sería relevante establecer indicadores comunes que faciliten la comparación entre las distintas regiones del Pirineo, tanto a nivel de propiedades

físicas del suelo como de su estado de conservación. Además, sería importante realizar una investigación específica sobre los suelos de montaña, dada su particularidad y vulnerabilidad frente a factores climáticos y humanos. Este enfoque garantizaría que se esté trabajando con datos relevantes y consistentes para una gestión adecuada.

2. Protección y Vulnerabilidad:

Dentro de los mapas taxonómicos de base, deberían derivarse mapas temáticos de propiedades específicas de los suelos (como el contenido en carbono, clases agrológicas, etc.) para dar más accesibilidad a la información existente y ampliar el público objetivo, mejorando así el conocimiento y la gestión de los recursos edáficos. Esto también servirá para dar respuestas más precisas a los compromisos de cada Estado con las futuras políticas europeas sobre el suelo. Además, es fundamental que los equipos de trabajo sean multidisciplinares y cuenten con buenos conocedores de la Edafología, ya que el conocimiento en esta área se está perdiendo debido a la alarmante merma de la docencia sobre el suelo. Las etapas previas de formación no tratan adecuadamente el suelo, como concluye el Libro Blanco (SECS, 2017), que señala que el "suelo" no es objeto de estudio en la Enseñanza Secundaria Obligatoria en España. Por tanto, sería necesario impulsar políticas que refuercen la formación en Edafología desde la educación secundaria y universitaria, para asegurar que el futuro manejo y protección de los suelos sea adecuado.

Acciones necesarias:

Es importante integrar en esta sección la necesidad de abordar la vulnerabilidad de los suelos del Pirineo frente a diversas amenazas, como la erosión, la pérdida de biodiversidad o los efectos del cambio climático. Las acciones de protección pueden incluir monitoreos continuos, medidas de conservación activa y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles, así como políticas públicas que favorezcan la preservación del suelo en las áreas más sensibles de la región. La protección también debe considerar la creación de planes de manejo para las áreas más vulnerables, con énfasis en la prevención de la degradación.

3. Divulgación:

Con el conocimiento generado, deberá realizarse un esfuerzo adicional para divulgarlo a todos los niveles, remarcando que el suelo es vital para la supervivencia de la humanidad en el planeta Tierra. Algunos ejemplos de publicaciones y otros recursos exitosos para la divulgación del suelo, los podemos encontrar en la SECS. Por ejemplo, el cómic "Vivir en el suelo", publicado en 2015 y traducido a diez idiomas, y el "Manual con experimentos didácticos para la educación pre-universitaria", creado también en 2015 con motivo del Año

Internacional del Suelo. Además, es necesario impulsar actividades de difusión en cada región pirenaica, tal como se ha hecho en Aragón en los últimos años, mediante jornadas y cursos organizados por diversas instituciones, dirigidos a un público diverso. Ejemplos de ello son las jornadas y cursos en la Sede Pirineos de la Universidad Internacional Menéndez y Pelayo (UIMP), los cursos extraordinarios de la Universidad de Zaragoza en Jaca, las charlas anuales sobre el suelo con motivo del Día Mundial del Suelo, y las jornadas sobre "Conservación y Rehabilitación de suelos" en el Instituto de Estudios Altoaragoneses (Diputación de Huesca). Además, herramientas como la aplicación EDAFOS y el programa iARASOL son ejemplos de recursos interactivos que facilitan el acceso al conocimiento sobre los suelos de manera didáctica y accesible para todos.

Acciones necesarias:

Es fundamental involucrar a las comunidades locales en la conservación del suelo a través de actividades participativas, como talleres prácticos, recorridos educativos y proyectos de ciencia ciudadana. La divulgación también debe incluir a los profesionales que trabajan directamente con los suelos, como los agricultores, ingenieros agrónomos y planificadores urbanos. Para ello, podrían diseñarse materiales específicos y cursos de formación dirigidos a estos grupos, con el objetivo de aplicar los conocimientos adquiridos en la gestión sostenible de los suelos. Además, las plataformas digitales, redes sociales y aplicaciones móviles, como EDAFOS, son herramientas clave para llegar a un público amplio, especialmente a las nuevas generaciones.

9. Bibliografía

- AFES, Association française pour l'étude du sol (2008). Référentiel Pédologique. Denis Baize, Michel-Claude Girard, coordinateurs. Éditions Quæ. 435 pp.
- Alfaro-Leranz, A., Badía-Villas, D., Martí-Dalmau, C., Emran, M., Conte-Dominguez, A.P., Ortiz-Perpiñà, O. (2023). Long-term evolution of shrub prescribed burning effects on topsoil organic matter and biological activity in the Central Pyrenees (NE-Spain). *Science of the Total Environment* 888: 163994. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163994>
- Antoñanzas Alasán, A. (2002). Identificación y distribución de lombrices de tierra en prados pirenaicos: factores ecológicos y de gestión. TFG EPS Huesca.
- Arias-Navarro C., Baritz R., Jones A., Eds. (2024). *The State of the Soils in Europe. Fully evidenced, spatially organised assessment of the pressures driving soil degradation.* EU. 157 pp.
- Armas-Herrera, C.M., Badía-Villas, D., Mora, J.L., Gómez, D. (2020). Plant-topsoil relationships underlying subalpine grassland patchiness. *Science of the Total Environment* 712: 134483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134483>
- Aroca Fernández, M. J., Bravo Fernandez, J. A., Garcia Viñas, J. I., Fernandez Yuste, J. A., & Serrada Hierro, R. (2019). Compactación en suelos forestales: ¿ mejor pezuñas o neumáticos?. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 3(45), 37-58
- Badía, D. (1995). *Biología del suelo*. *Georgica*, 4: 235-259.
- Badía, D.; Martí, C.; Serreta, A. (1995). La cartografía de suelos como información de base en los estudios de ordenación territorial. *Mapping*, 21: 26-32
- Badía, D., García-González, R., Martí, C. (2002). Clasificación de suelos en pastos alpinos de Aisa y Ordesa (Pirineo Central). *Edafología*, 9: 11-22.
- Badía, D., Martí, C. (1999). *Suelos del Pirineo Central: Fragen*. Editan INIA-CPNA-Unizar. Huesca. 190 pp.
- Badía, D., Martí, C. (2006). La diversidad edáfica en el Altoaragón, *Naturaleza Aragonesa*, 17: 39-46.
- Badía, D., Martí, C., Andreu, C. (1990). El sòl com a eina didàctica. *Dovella*, XII: 7-13.
- Badía, D., Martí, C., Sánchez, J.R., Fillat, F.; Aguirre, J., Gómez, D. (2008). Influence of livestock soil eutrophication on floral composition in the Pyrenees Mountains. *Journal of Mountain Science*, 5: 63-72. Doi:10.1007/s11629-008-0063-6
- Badía, D., Fillat, F., Aguirre, J., Gómez, D., Sánchez, J.R., Martí, C. (2008). Soil chemistry in long-term livestock camping areas in Pyrenean summer pastures. *Agrochimica* vol. 52: 3, 189-199.

- Badía, D., Fillat, F. (2008). Descripción del marco físico: geología, clima y suelos, pp. 37-59. En: Pastos del Pirineo, F. Fillat, R. García-González, D. Gómez, R. Reiné. Ed. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 319 pp. Madrid.
- Badía, D. (2008). El suelo como herramienta didáctica, II Seminario del Geoparque de Sobrarbe: Investigación geológica y recursos didácticos. Boltaña, 24-26 de Octubre de 2008. <http://www.icog.es/files/geoparque/4.pdf>
- Badía, D., Martí, C., Palacio, E., Sancho, C., Poch R.M. (2009). Soil evolution over the Quaternary period in a semiarid climate (Segre river terraces, northeast Spain). *Catena*, 77: 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.12.012>
- Badía, D., Martí, C., Casanova, J., Gillot, T., Cuchí, J.A., Andrés, R. (2015). Quaternary soil chronosequence study on the terraces of the Alcanadre River (semiarid Ebro Basin, NE Spain). *Geoderma*, 241-242: 158-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.017>
- Badía, D., Ortiz, O., Martí, C. (2017). Experimentos didácticos con el suelo para la educación pre-universitaria, 41 pp. ISBN 978-84-16723-24-9.
- Badía, D., et al (2009). Itinerarios edáficos por el Alto Aragón. Cuadernos Altoaragoneses de Trabajo. 28, 189 pp. I.E.A., Huesca.
- Badía, D., Orús, D., Doz, J.R., Casanova, J., Poch, R.M., García González, M.T. (2015). Vertic features in a soil catena developed on Eocene marls in the Inner Depression of the Central Spanish Pyrenees). *Catena* 129, 86–94 [doi:10.1016/j.catena.2015.03.006](https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.03.006)
- Badía, D. (2016). ¿Para qué estudiar el suelo? *Lucas Mallada*, 18: 9-27. Huesca.
- Badía-Villas, D., Buendía-García, L., Longares-Aladrén, L.A., Martí-Dalmau, C., Peña-Monné, J.L., González-Pérez, J.A., Gómez-García, D. (2020). Soil-geomorphology relationships determine the distribution of the main subalpine grasslands in the Central Pyrenees (NE-Spain). *Science of the Total Environment* 734: 139121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139121>.
- Bartolomé, M, G. Cazenave, M. Luetscher, C. Spötl, F. Gázquez, A. Belmonte, A. V. Turchyn, J. I. López-Moreno, and A. Moreno (2023). *Mountain permafrost in the Central Pyrenees: insights from the Devaux ice cave*. *The Cryosphere*, 17: 477-497. DOI: 10.5194/tc-17-477-2023.
- Belmonte Ribas, A. (2022). Guía geológica del Pirineo, 2º ed. 192 pp. Ed. Pirineo. Huesca.
- Bitterlich, W.; Badía, D.; Martí, C.; De Siena, C. (1999). Physical and chemical soil properties, pp. 109-111. In: *Land-Use Changes in European Mountain ecosystems*. Ecomont: Concepts and results. Cernusca, A., Tappeiner, U.; Bayfield, N. eds. Blackwell Science Ltd. Berlin. ISBN: 3-8263-3289-X.
- Cernusca, A., Tappeiner, U.; Bayfield, N. eds. (1999). *Land-Use Changes in European Mountain ecosystems*. Ecomont: Concepts and results. Blackwell Science Ltd. Berlin. ISBN: 3-8263-3289-X.

- Comín J. P. Martínez-Rica, J.P. 2007. Los Pirineos en el Contexto de las Montañas del Mundo: Rasgos Generales y Peculiaridades. *Pirineos*, 162: 13-41.
- Duclos, G. (1994). Atlas des Sols de la Region Provence, Alpes, Côte d'Azur. Ministère de l'Agriculture et de la Peche & SCP. 955 pp. France.
- European Commission (2023). *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on Soil Monitoring and Resilience (Soil Monitoring Law) (2023/0232 (COD))*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52023PC0416>.
- Fillat, F., García-González, R., Gómez, D., Reiné, R. (2008). Pastos del Pirineo. Ed. CSIC-DPH. 319 pp.
- Fokaides, P. A., Kylili, A., Nicolaou, L., Ioannou, B. (2016). The effect of soil sealing on the urban heat island phenomenon. *Indoor and Built Environment*, 25(7), 1136–1147. <https://doi.org/10.1177/1420326X16644495>
- Garisoain, R., Jacotot, A., Delire, C., Binet, S., Le Roux, G., Gascoin, S., et al. (2024). *Mountain peatlands and drought: Carbon cycling in the Pyrenees amidst global climate change*. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 129, 1-18. DOI: 10.1029/2024JG008041.
- Gelabert, P.J., Rodrigues, M., de la Riva, J., Ameztegui, A., Sebastià, M.T., Vega-García, C. (2021). LandTrendr smoothed spectral profiles enhance woody encroachment monitoring. *Remote Sensing of Environment*, Volume 262, 112521.
- Generalitat de Catalunya-EGAM (2022). Criteris ambientals en els projectes de Plantes Solars Fotovoltaïques. Departament d'Acció climàtica, alimentació i agenda rural. 49 pp.
- Guerra, A., Monturiol, F. (1970). *Mapas de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño*. Ed. CSIC. Madrid.
- Gómez, D., Ferrández, J.V., Bernal, M., Campo, A., Retamero, J.R.L., Ezquerro, V. (2020). Plantas de las cumbres del Pirineo: Flora del piso Alpino. Ed. Prames, 587 pp.
- Instituto Geográfico Nacional (1992). *Atlas Nacional de España: Edafología*. Ed. Dirección General del IGN. Madrid.
- Ibarra, P. (2004). La diversidad edáfica del territorio aragonés. En: J.L. Peña, L.A. Longares y M. Sánchez (eds.), *Geografía física de Aragón*. Universidad de Zaragoza e Institución Fernando El Católico. Zaragoza.
- Iñiguez, J., Sánchez-Carpintero, I., Val, R., Vitoria, G., Peralta, J. (1990). *Mapa de suelos de Navarra*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra. Pamplona.
- IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
- Martí, C., Badía, D. (1995). Characterization and classification of soils along two altitudinal transects in the Eastern Pyrenées. *Soil Research and Rehabilitation*, 9: 367-383.

- Mathieu, C. (2009). Les principaux sols du monde. Ed. TEC & DOC. 233 pp. Paris.
- McGuire, L. A., Ebel, B. A., Rengers, F. K., Vieira, D., C. S., & Nyman, P. (2024). Fire effects on geomorphic processes. *Nature Reviews Earth and Environment*, 5, 486–503. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00557-7>.
- Mora, J.L., Badía-Villas, D., Gómez, D. (2022). Fire does not transform shrublands of *Echinopartum horridum* (Vahl) Rothm. into grasslands in the Pyrenees: Development of community structure and nutritive value after single prescribed burns. *Journal of Environmental Management*, 315, 115125. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115125>
- Neary, D. G. (2009). Post-wildland fire desertification: Can rehabilitation treatments make a difference? *Fire Ecology*, 5(1), 129–144. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0501129>
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M.B. Errea, M.P., Martínez-Rica, J.P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change*, 17, 420-428, doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.11.007
- OPCC-CTP (2018). El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación. Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos. 150 pp. ISBN: 978-84-09-06268-3.
- Orús, D.; García, M.T.; Martí, C.; Badía, D. (2011). Toposecuencia edáfica sobre margas eocenas en la Cuenca de Jaca. *Actas 28 Reunión de Ciencia del Suelo. Catalunya*, 4 al 7 de Setiembre de 2011, pp. 10
- Otal, C.; Badía, D.; Fillat, F. (2005). Génesis y clasificación de una catena de suelos en pastos subalpinos de Linás de Broto (Pirineo Central). *Georgica*, 11: 67-78.
- Permapyrenees. (2024). *Mapa interactiu de permafrost als Pirineus*. Recuperado de <https://permapyrenees.eu/ca>.
- Porta, J. (1987). *Introducció al coneixement del sòl: Sòls dels Països Catalans*. Ed. Associació d'Enginyers Agrònoms de Catalunya. Barcelona.
- Porta, J., López-Acevedo, Marta, Poch, R.M. (2020). *Edafología: Uso y Protección de Suelos*. Ed. Mundi-Prensa. 849 pp.
- Quintana, S., Badía, D. Martí C. (2024): Comparison of the effects on soil of brush removal by clearing or burning 2-years after application in southern Pyrenees. *SJSS* (in press).
- Regués, D., Badía, D., Echeverría, M.T., Gispert, M., Lana-Renault, N., León, J., Nadal-Romero, E., Pardini, G., Serrano-Muela, P. (2017). Analysing the effect of land use and vegetation cover on soil infiltration in three contrasting environments in northeast Spain. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43: 141-169. DOI: <http://doi.org/10.18172/cig.3164>.
- Ruellan, A., Dosso, M. (1993). *Regards sur le sol*. Les éditions Foucher, París. 192 pp.
- SECS-FAOES (2017). *Propuesta del Programa Información Cartográfica de Suelos Españoles*, INFORCAS.es. Madrid: Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, 150 p.

- RIGOU L, DUPIN B, FRANKL, STOKES A : TOPSOL, un Secteur de Référence pédologique dédié à la connaissance et à la restauration des sols de montagne. Poster presentado en el seminario R.E.V.E.R. n°12, Bagnères de Bigorre, 2022.
- SECS (2017). Libro Blanco sobre el tratamiento del suelo en los libros de texto de Enseñanza Secundaria Obligatoria y de Bachillerato en España. 2ª Edición. Lleida: Diputació de Lleida. Memoria, 76 p. + Anejos.
- Serrano, E; C. Agudo, R. Delaloyé and J. J. González-Trueba (2001). Permafrost distribution in the Posets massif, Central Pyrenees, Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography, 55:4, 245-252, DOI: 10.1080/00291950152746603
- Smith, L. C., Orgiazzi, A., Eisenhauer, N., Cesarz, S., Lochner, A., Jones, A., Bastida, F., Patoine, G., Reitz, T., Buscot, F., Rillig, M. C., Heintz-Buschart, A., Lehmann, A., Guerra, C. A. (2021). Large-scale drivers of relationships between soil microbial properties and organic carbon across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 30(10), 2070– 2083. <https://doi.org/10.1111/geb.13371>
- Smith, P., M. Poch, R.M., Lobb, D.A., Bhattacharyya, R., Alloush, G., Eudoxie, G.D., Anjos, L.H.C., Castellano, M. Ndzana, G.M., Chenu, C., Naidu, R., Vijayanathan, J., Adele M. Muscolo, A.M., Studdert, G.A., Rodriguez-Eugenio, N., Calzolari, C., Amuri, N., Hallett, P. (PDF) *Status of the World's Soils*. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 49:73–104 ([https://www.researchgate.net/publication/385065480 Status of the World's Soils](https://www.researchgate.net/publication/385065480_Status_of_the_World's_Soils))
- Soil Survey Staff (1999). *Soil Taxonomy System: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2on. edition. USDA. Washington.

ANEXO 1: Repositorios de datos de suelos

<p>Centro Europeo de Datos del Suelo (ESDAC): https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas.</p>	<p>Dispone, a nivel de la UE, de datos de múltiples componentes, propiedades y procesos relacionados con el suelo, como: erosión, contenido en carbono orgánico, compactación, sellado, salinización, biodiversidad, nutrientes, contaminación, infiltración, etc. Estas bases de datos van actualizándose con cierta frecuencia. También dispone de mapas de suelos históricos de diversos municipios y regiones de España, y el mapa de suelos de Europa a nivel de GSR-WRB (JRC-EU, 2010) de escala muy general. Incluye los datos de los diferentes muestreos del Proyecto LUCAS (entre 2009 y 2022) para diferentes propiedades (textura, pH, nutrientes, carbono orgánico, CIC...) del horizonte superficial del suelo (0-20 cm)</p>
<p>Información mundial sobre el suelo (ISRIC): https://www.isric.org/</p>	<p>El Centro Internacional de Referencia e Información de Suelos (ISRIC) reúne en su Biblioteca una colección de unos 10.000 mapas (digitalizados) y 17.000 informes y libros sobre suelos del mundo, disponibles mayoritariamente en línea. Recientemente coordinan una iniciativa (2023-2025) con la que están secuenciando el ADN de su colección de suelos de referencia, que incluye muestras de unos 1.100 perfiles de suelos recopilados en todo el mundo durante las últimas seis décadas.</p>
<p>Sistema de datos e información sobre el suelo de la FAO (SDAIS): https://www.fao.org/soils-portal/es/</p>	<p>Portal que contiene información sobre diferentes aspectos del suelo; pretende divulgar la importancia que tiene el suelo, como recurso vital y finito, entre los encargados de formular políticas sobre la gobernanza del suelo, los planificadores del desarrollo territorial, los científicos, los funcionarios de extensión agrícola y otros profesionales, así como a los estudiantes de grados afines a la Ciencia del suelo. Incluye la aplicación SoilLEX, donde se recoge la legislación relacionada con el suelo para la mayoría de los países del mundo ordenados por temáticas: conservación, restauración, sellado, contaminación, etc.</p>
<p>Sistema Nacional de Información sobre Ocupación del Suelo: SIOSE https://www.siose.es/presentacion</p>	<p>Es el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España, integrado dentro del Plan Nacional de Observación del Territorio (PNOT) y cuya Dirección Técnica del proyecto es asumida por el IGN-CNIG. Tiene el objetivo de generar una base de datos de Ocupación del Suelo para toda España para satisfacer las necesidades y los requerimientos de la Unión Europea, la Administración General del Estado y las comunidades autónomas.</p>

<p>OpenLandMap https://openlandmap.org/</p>	<p>Se trata de una aplicación que permite el seguimiento dinámico anual de la ocupación del suelo a nivel mundial.</p>
<p>Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA): https://www.gmba.unibe.ch/</p>	<p>Es una plataforma para la colaboración internacional e interdisciplinaria en materia de evaluación, conservación y gestión sostenible de la biodiversidad de las montañas. La GMBA (por sus siglas en inglés: Evaluación Mundial de la Biodiversidad de las Montañas) sigue cinco prioridades: conectar a los científicos, desarrollar herramientas e infraestructuras de datos, co-crear conocimiento, divulgación y desarrollo de capacidades.</p>
<p>ICIFOR https://www.inia.es/serviciosyrecursos/recursosdocumentales/visualizadorescartograficos/visordecarbono/Paginas/Home.aspx</p>	<p>El visor consiste en una serie de mapas superpuestos que permiten la comparación de las cantidades de C en el horizonte orgánico (hojarasca) y en el suelo en España. Se ha incluido también la capa del Mapa Forestal de España, siendo ésta visible a partir de una escala 1:320.000. A esa misma escala se ofrece la cuantificación del servicio de almacenamiento de Carbono: ICIFOR (INIA-CSIC).</p>
<p>IDENA https://tinyurl.com/25s5ofq5</p>	<p>Portal de datos espaciales de Navarra que incluye el visor del mapa de suelos (1:25.000) con unidades cartográficas en Soil Taxonomy System (STS).</p>
<p>ICGC https://www.icgc.cat/ca/Ambits-tematics/Territori-sostenible/Sols</p>	<p>Portal de datos suelos de Catalunya que incluye el mapa de suelos tanto a escala 1:250.000 (en STS y WRB) como a E.1: 25.000, además de diversas bases de datos. https://www.icgc.cat/ca/Territori-sostenible/Sols/Mapa-de-sols-125000-continuu</p>
<p>Référenciel pédologique https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/bases-donnees/referentiel-regional-pedologique</p>	<p>La Référenciel Regional Pédologique (RRP) es un producto cartográfico del IGCS (Inventario, Gestión y Conservación de Suelos), destinado a identificar, definir y localizar los principales tipos de suelo de la Francia continental, y caracterizar sus propiedades de interés para la agricultura y el medio ambiente a E. 1: 250.000). Los datos son accesibles en el Geoportal de la República Francesa: https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/carte-des-sols</p>

