eutromed

Prevención de la eutrofización por nitrógeno agrícola

LIFE+: EUTROMED

Guía de Formación

Diputación de Granada

Granada es Provincia

BonTerra Ibérica S.L.

paisajes del sur

Índice

Seminario Abril 2012 pag 8

ESTUDIO DEL SUELO Y SU CALIDAD pag 8

1. CONCEPTO DE SUELO. MORFOLOGÍA, FUNCIONES Y GÉNESIS DE SUELOS pag 8

1.1 Concepto de suelo pag 8

1.2 Morfología de suelos pag 9

1.3 Funciones de los suelos pag 12

1.4 Génesis de suelos pag 13

2. PROPIEDADES FÍSICAS Y FISICOQUÍMICAS MÁS IMPORTANTES DEL SUELO pag 25

2.1 Partículas (textura) pag 25

2.2 Agregados (estructura) pag 29

2.3 Porosidad pag 34

2.4 Agua del suelo pag 36

2.5 Propiedades Fisico-Químicas del suelo pag 42

2.6 Qué es el pH del suelo. La acidez del suelo pag 44

3. EROSIÓN DE SUELOS pag 49

3.1 Erosión de suelos. Generalidades pag 49

3.2 Fases de la erosión del suelo pag 49

3.3 Bases hidrológicas de la erosión pag 52

3.4 Tipos de erosión hídrica pag 54

3.5. Estimación de la pérdida de suelo por erosión: Usle pag 58

3.6. Conservación del suelo frente a la erosión pag 60

Seminario Diciembre 2012

LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SU UTILIZACIÓN

LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SU UTILIZACIÓN pag 62

1. LOS RECURSOS HÍDRICOS pag 62

2. RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES pag 62

3. RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS pag 63

4. EL CICLO HIDROLÓGICO pag 65

5. LOS ACUÍFEROS pag 65

6. RELACIONES ENTRE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS pag 75

7. ENTRADAS Y SALIDAS DE AGUAS DE LOS ACUÍFEROS pag 78

8. LOS ACUÍFEROS COMO EMBALSES SUBTERRÁNEOS pag 80

9. LA EXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS: ASPECTOS TÉCNICOS Y LEGALES pag 81

10. LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS pag 89

11. BIBLIOGRAFÍA BÁSICA pag 91

12. CRÉDITOS DE LAS FOTOGRAFÍAS pag 91

Seminario Junio 2013 pag 92

DESNITRIFICACIÓN Y CICLO DEL NITROGENO pag 92

1. DESNITRIFICACIÓN: ¿QUÉ ES?, PARA QUÉ SIRVE? SU INTERÉS EN LA AGRICULTURA pag 92

1.1 Ciclo del nitrógeno (N) pag 92

1.2 Alteraciones del ciclo del N pag 95

1.3 Desnitrificación pag 95

1.4 ¿Quiénes son los microorganismos desnitrificantes? pag 96

1.5 Medida de la actividad desnitrificante pag 96

1.6 Otros procesos biológicos que producen N2O pag 96

1.7 Impacto de la desnitrificación en el medio ambiente pag 99

1.8 Importancia de la desnitrificación en la salud humana pag 100

1.9 Consecuencias de la desnitrificación para la agricultura pag 102

1.10 Factores que afectan la desnitrificación pag 102

1.11 Sobre como disminuir la producción de N2O pag 110

Seminario Marzo 2014 pag 113

TECNICAS Y MATERIALES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y LA DISMINUCIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN EL OLIVAR DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA pag 113

1. INTRODUCCIÓN pag 113

2. LA EROSIÓN HÍDRICA: TIPOS, CAUSAS Y CONSECUENCIAS pag 115

3. MALAS PRÁCTICAS HABITUALES EN LA AGRICULTURA pag 119

4. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN Y CONSERVACIÓN DEL MEDIOAMBIENTE pag 121

4.1. MATERIALES PARA MUROS, ENCACHADOS Y DRENAJES pag 121

4.2. MATERIALES PARA SIEMBRAS Y PLANTACIONES pag 126

4.2.1. Siembras e hidrosiembras pag 126

4.2.2. Plantaciones pag 129

4.3. MATERIALES PARA TRATAMIENTOS COMPLEMENTARIOS O MIXTOS pag 130

4.3.1. Mantas y mallas orgánicas pag 131

4.3.2. Biorrollos pag 138

5. EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN EL PROYECTO LIFE+ EUTROMED pag 139

6. CONCLUSIONES pag 143

BIBLIOGRAFIA pag 144

Seminario Abril 2012

ESTUDIO DEL SUELO Y SU CALIDAD

Prof. Rafael Delgado Calvo-Flores

Dpto. Edafología y Química Agrícola, Facultad de Farmacia

Universidad de Granada

1. CONCEPTO DE SUELO. MORFOLOGÍA, FUNCIONES Y GÉNESIS DE SUELOS

1.1 CONCEPTO DE SUELO

¿Qué es el suelo?

Existen muchas definiciones de lo que es un suelo, su concepto. Su concepto depende de los científicos o de los técnicos que lo estudien o lo utilicen.

Figura 1.1.1. Suelo sobre materiales calizos. Sierra Elvira. Granada

Para la Edafología (Ciencia que estudia los suelos) el suelo es:

"*Un cuerpo natural organizado e independiente, con una génesis, constituyentes y propiedades, 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)*"

"*Una formación superficial, tridimensional, natural o construida por el hombre, organizada y dinámica (aunque relativamente estable a la escala humana)*" (Figura 1.1.1).

Para la Geología (Ciencia que estudia la Tierra) el suelo es:

"*El producto de la transformación de las rocas en la superficie terrestre*".

Para la Ecología (Ciencia del medioambiente) y la Zoología (Ciencia de los animales) el suelo es:

"*Un medio subterráneo donde viven multitud de organismos vivos que desarrollan una gran actividad e intervienen de forma trascendental en los ciclos de los nutrientes en la naturaleza*".

Para la Química (Ciencia de la constitución elemental de la materia) el suelo es:

"*Un sistema de tres fases, sólida, líquida y gaseosa, y sede de equilibrios químicos y fisicoquímicos*".

Para la Agricultura (Ciencia de los cultivos) y la Botánica (Ciencia de las plantas) el suelo es:

"*El soporte mecánico y nutricional (proporciona agua y nutrientes) de las plantas*".

Para la Ingeniería (Civil, Agronómica, Forestal…) el suelo es:

"*El asiento de una gran parte de las actividades humanas, principalmente la agricultura, la silvicultura y la ganadería*".

1.2 MORFOLOGÍA DE SUELOS

¿Qué forma tienen los suelos?

Los suelos cubren la mayor parte de las tierras emergidas del planeta, formando sobre ellas una especie de "piel". Esta piel, al igual que ocurre con la piel de los animales, no es igual en todos los puntos; varía de espesor, forma, color, textura, etc. El espesor de lo que podemos considerar suelo es muy variable; en la zona mediterránea no suele superar un metro y medio (Figura 1.2.1).

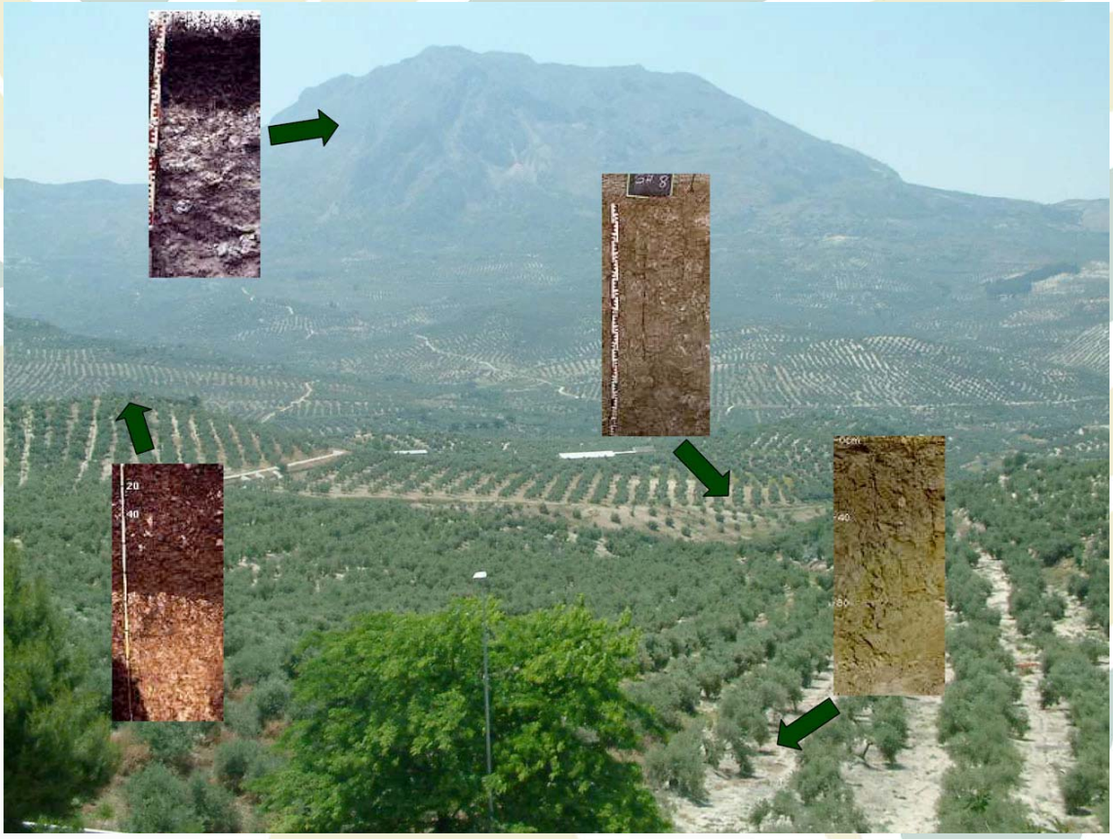


Figura 1.2.1. El suelo como una "piel de la Tierra. En distintos puntos del paisaje aparecen diferentes tipos de suelos.

Es muy importante conocer que los suelos a nivel de los paisajes forman un "continuum"; una capa continua. Es decir, pasan de unos tipos a otros sin una brusca transición. Este carácter transicional de los suelos es fundamental en los estudios edáficos, ya que es muy complicado establecer dónde termina un tipo de suelo y dónde comienza otro.

A nivel de un punto del paisaje el rasgo morfológico más característico de los suelos es que verticalmente están organizados en *horizontes*, o capas paralelas a la superficie (Figura 1.2.2). Esta organización vertical en horizontes es muy conocida por todos los estudiosos y usuarios del suelo y es un carácter fundamental que debe conocerse para muestrearlos y caracterizarlos correctamente. Igualmente debe conocerse para manejarlos.

Figura 1.2.2. Suelo con horizonación muy destacada. La zona de color pardo oscuro es el horizonte A, la de color pardo rojizo, horizonte B y la de colores grisáceos, horizonte C.

Los horizontes superficiales (en contacto con el aire) suelen contener más materia orgánica que los profundos, por ello suelen ser oscuros y más fértiles. En la Edafología, a estos horizontes superficiales se les designa con la letra **A**. Son las zonas del suelo con más actividad biológica.

Debajo de estos horizontes de tipo A, en muchos suelos aparecen otros de colores pardos, pardo amarillentos, pardo rojizos o de color rojo oscuro, que se generan por alteración intensa de los materiales de partida y en algunos casos, también presentan acumulación de materiales procedentes de los horizontes superficiales. Se les designa con la letra **B**. Los hay de muy diversos tipos y espesores.

A los materiales de partida fragmentados y muy poco alterados, se les designa como horizontes **C**. Es muy frecuente en la zona mediterránea que estos horizontes se acumulen los carbonatos en forma de nódulos. Muchos edafólogos no aceptan la denominación de horizonte para estos materiales de partida y los consideran simplemente capas.

En los suelos existen otros muchos tipos de horizontes y capas, pero los de tipo A, B y C, son los más importantes.

1.3 FUNCIONES DE LOS SUELOS

¿Qué funciones tienen los suelos?

El suelo es indispensable en la naturaleza y para el hombre porque desempeña cinco funciones:

1.- Regula el agua. El suelo ayuda a controlar los flujos de la lluvia, la nieve derretida y el agua de riego. El agua y los solutos disueltos en ella fluyen sobre la tierra o dentro y a través del suelo.

2.- Sostiene la vida vegetal y animal. La biodiversidad y la producción de seres vivos dependen del suelo.

3.- Permite el ciclo de los nutrientes. El carbono, nitrógeno, fósforo, y muchos otros nutrientes se almacenan, transforman y se reciclan en el suelo.

4.- Interacciona con los posibles contaminantes. La fase sólida y los microbios del suelo son los responsables de filtrar, tamponar, degradar, inmovilizar y desintoxicar los contaminantes inorgánicos y orgánicos (incluidos los organismos patógenos) de origen industrial, municipal y agrícola.

5.- Sostiene gran parte de las actividades humanas: Agricultura, Ganadería, Silvicultura, Ingeniería y Ocio. Es asiento de las ciudades y pueblos de caminos, cementerios y un sinfín de habitats de las personas.

Los suelos "saludables" (con calidad) cumplen bien las cinco funciones descritas Y no son tóxicos por contacto, inhalación o ingestión, favorecen el aire limpio y el agua limpia y generan abundantes alimentos de calidad, y todo esto lo hacen de una manera sostenible.

¿Por qué es necesario estudiar los suelos?

Porque se trata de un recurso no renovable a la escala humana, que se encuentra sometido a intensos procesos de degradación por las actividades humanas.

Podemos hablar del colapso de las civilizaciones antiguas por la degradación de sus suelos: Las *"ciudades muertas"* de Siria perecieron hace siglos, en parte por que los bosques fueron reemplazados por

olivares, según el edafólogo John Ryan. El resultado fue la erosión pluvial. *"Sin suelo que absorba la lluvia, no hay manantiales, dice Ryan. Y para dar de comer a la gente hace falta suelo y agua".*

También podemos hablar de un colapso de la civilización actual por la degradación de sus suelos: En la revista *National Geographic* se exponen las situaciones de extrema pobreza y hambruna en Haití relacionadas con la degradación irreversible de sus suelos.

1.4 GÉNESIS DE SUELOS

¿Cómo se generan los suelos?

Cuando cambian las características ambientales, cambia el suelo. Esta afirmación podemos entenderla comparando los suelos de la taiga (intenso frío, vegetación de coníferas con restos ácidos, etc), con los de las grandes praderas (clima de humedad y temperatura contrastadas y vegetación herbácea) y con los de las selva amazónica (clima cálido, mucho agua, al suelo caen abundantes restos vegetales y animales, etc.) (Figura 1.4.1)

A las características ambientales que influyen en el tipo de suelo se les denomina ***factores formadores***. Los factores formadores controlan los conocidos ***procesos edafogenéticos*** (procesos generadores de suelo) que son los procesos son que actúan dentro, y sobre, el suelo y condicionan su morfología, componentes y propiedades (Figura 1.4.2).

Factores Formadores

Desde los albores de la Edafología (recordemos, **Ciencia que estudia los suelos**), se considera que los suelos dependen de cinco características ambientales: Clima, Roca, Relieve, Organismos (Fauna y Flora) y Tiempo. Algunos consideran al Hombre como un factor independiente en la formación de los suelos, otros como un organismo más (Figura 1.4.2).

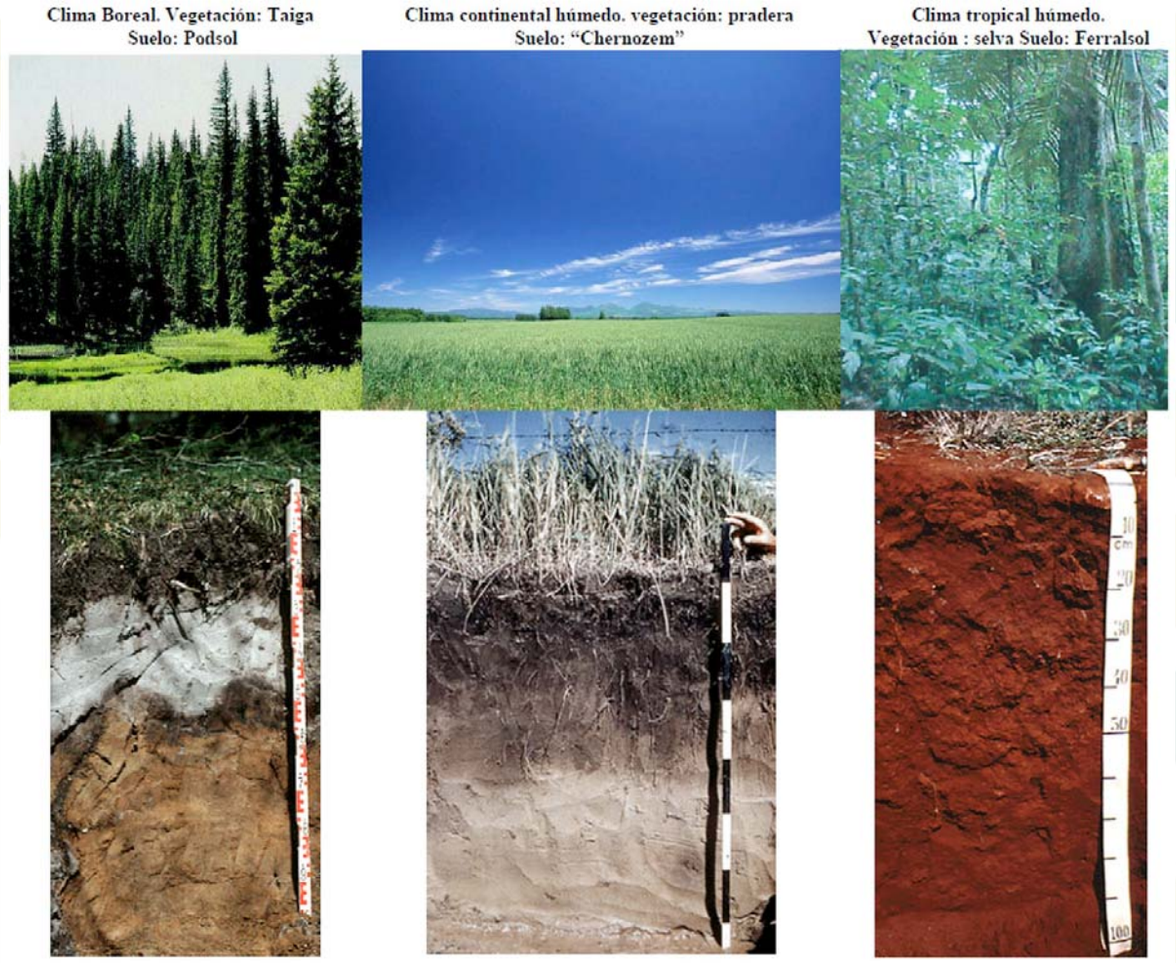


Figura 1.4.1. Los cambios en las características ambientales se corresponden con cambios en el tipo de suelo. Comparación entre los suelos de la taiga rusa, de una pradera típica norteamericana y de una selva tropical

En multitud de ocasiones, los factores de formación pueden variar con el tiempo. Así, por ejemplo, en un suelo andaluz de 15000 años de edad, las condiciones ambientales han variado espectacularmente, pues se ha pasado de unas condiciones glaciares (glaciación würm) iniciales a otras actuales mucho más templadas, propias de un clima de tipo mediterráneo.

Estos factores, Clima, Roca, Relieve, Organismos y Tiempo, no son totalmente independientes entre sí, ya que unos influyen unos sobre los otros (por ejemplo, el Clima condiciona la Flora –vegetación-).

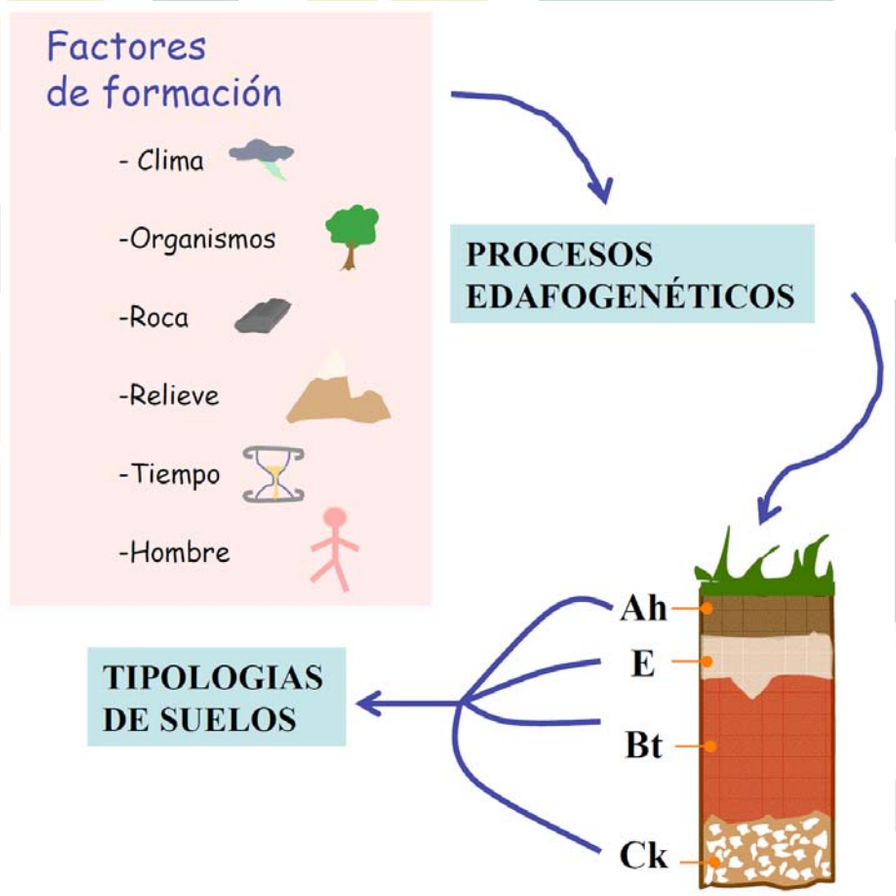


Figura 1.4.2. Esquema de la génesis de los suelos. Los factores formadores condicionan los procesos edafogenéticos y de estos dependen las características y propiedades de los suelos. Los diferentes factores y procesos dan lugar a diferentes tipologías (clases) de suelos.

Clima

El clima es el principal factor formador del suelo, ya que incide en casi todas las propiedades del mismo: el estudio de la distribución climática a nivel mundial define la distribución de los tipos de suelos a este mismo nivel.

El clima controla la llegada del agua al suelo. El agua es el principal motor de la génesis del suelo, ya que interviene directa o indirectamente en la mayoría de los procesos edafogenéticos.

Roca

El concepto geológico de suelo establecía que “el suelo es el producto de alteración de la roca”. Esta idea fue superada por Dokuchaev (Geólogo

ruso del siglo XIX, considerado el "padre" de la Edafología) con la inclusión de cuatro factores formadores adicionales. No obstante esta concepción nos indica la gran importancia que tiene la roca sobre la génesis del suelo.

En Edafología, además de roca, o roca madre, se habla de *material original*: material sobre el que en el instante cero comienzan a actuar los procesos edafogenéticos. Puede ser una roca "in situ" o una mezcla de materiales procedentes de distintas rocas.

Algunas propiedades del suelo se heredan en parte de los materiales originales, por ejemplo: granulometría, espesor, permeabilidad, color, mineralogía, elementos tóxicos, etc.

Relieve

El relieve se define como las elevaciones y desigualdades de la superficie terrestre consideradas en su conjunto. Este factor es de carácter local, ya que controla la distribución de los suelos en el paisaje, a nivel puntual.

Los principales parámetros del relieve que influyen en la formación del suelo son: a) posición fisiográfica (considera la forma del relieve y el lugar que ocupa dentro de ese relieve), b) pendiente o inclinación de la, c) altitud respecto al nivel del mar (expresada en metros, d) orientación geográfica de la superficie donde se encuentra el suelo y e) microtopografía o carácter del relieve a pequeña escala.

Organismos

El factor formador organismos (también denominado factor biótico) comprende la acción de la vegetación, la fauna y del hombre.

Es un factor con escasa independencia (no es tanto así en el caso del Hombre) pues está íntimamente ligado al clima.

Es de gran importancia ya que controla el perfil húmico y, como consecuencia, afecta a la práctica totalidad de las propiedades del suelo (estructura, porosidad, densidad aparente, pH, capacidad de cambio catiónico, etc) y a la tipología de suelo.

La acción del hombre sobre el suelo empieza a ser notoria desde el neolítico con la aparición de la agricultura. La puesta en cultivo de un suelo conlleva cambios en: la vegetación natural, el régimen hídrico, la consistencia, la estructura, la composición del suelo y en las propiedades químicas.

Tiempo

Su efecto se debe a que los procesos edafogenéticos actúan con una velocidad determinada.

El suelo se desarrolla desde el instante cero (cuando los procesos edafogenéticos comienzan a actuar) hasta la actualidad. La edad del suelo es el tiempo transcurrido desde el instante cero.

Procesos edafogenéticos

Son los procesos de carácter físico, químico, fisicoquímico o biológico que dan lugar al suelo. Existen multitud de procesos edafogenéticos, desde aquellos que son propios de un tipo concreto de suelo, hasta procesos muy generales que se producen en todos los suelos. Hay muchas formas de clasificar los procesos edafogenéticos. A continuación describiremos algunos de los que tienen lugar en el área mediterránea, aunque también se dan en otras muchas zonas del mundo.

Alteración / Arcillización

Es la transformación más o menos intensa de los minerales de las rocas (Figura 1.4.3).

Parte de los minerales de las rocas (primarios) desaparecen totalmente por la alteración. Algunos minerales primarios se conservan en el suelo con pequeñas modificaciones y se dice que son *heredados.* Otros minerales primarios se modifican intensamente para adaptarse a las condiciones del suelo y se dice que so minerales *transformados*. Algunos minerales del suelo se forman a partir de los iones que aparecen durante la hidrólisis de los minerales primarios; se les llama minerales secundarios o *neoformados.* Los minerales heredados, transformados y neoformados, suelen ser filosilicatos de pequeño tamaño (arcillas), es por ello que el proceso de alteración supone en gran medida una *arcillización.*

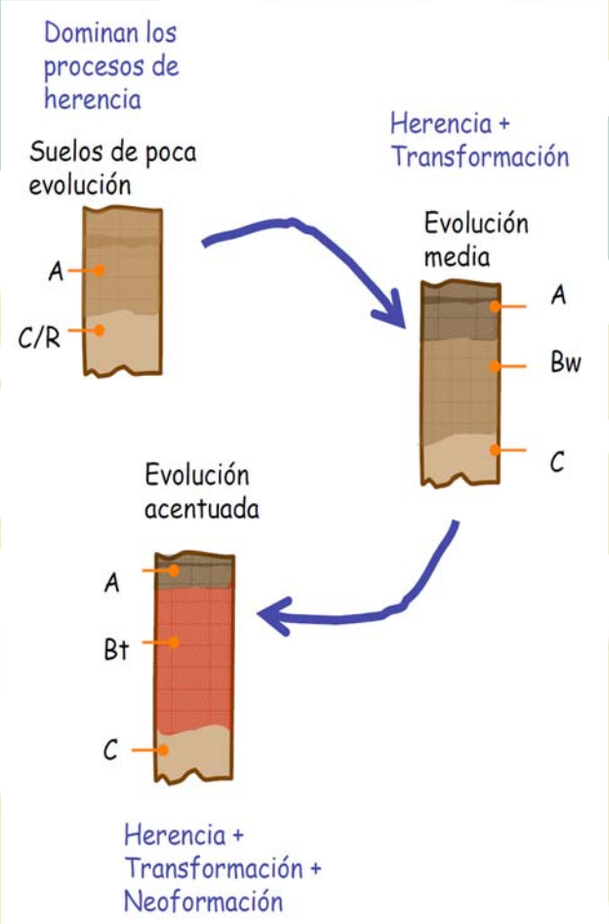


Figura 1.4.3. Proceso de, *alteración /arcillización*. En los suelos poco evolucionados dominan los procesos de herencia; en los muy evolucionados, los de transformación y neoformación.

Melanización (melanos = oscuro)

Supone incorporación y transformación de los restos orgánicos (de origen vegetal y animal en menor medida) que se incorporan al suelo como consecuencia de la actividad biológica. La mecanización cursa con un oscurecimiento del suelo que tiene lugar en la parte superficial de los suelos (Figura 1.4.4)

En los suelos de cultivo se suele dar un proceso inverso, con mineralización de la materia orgánica y clareamiento del suelo.

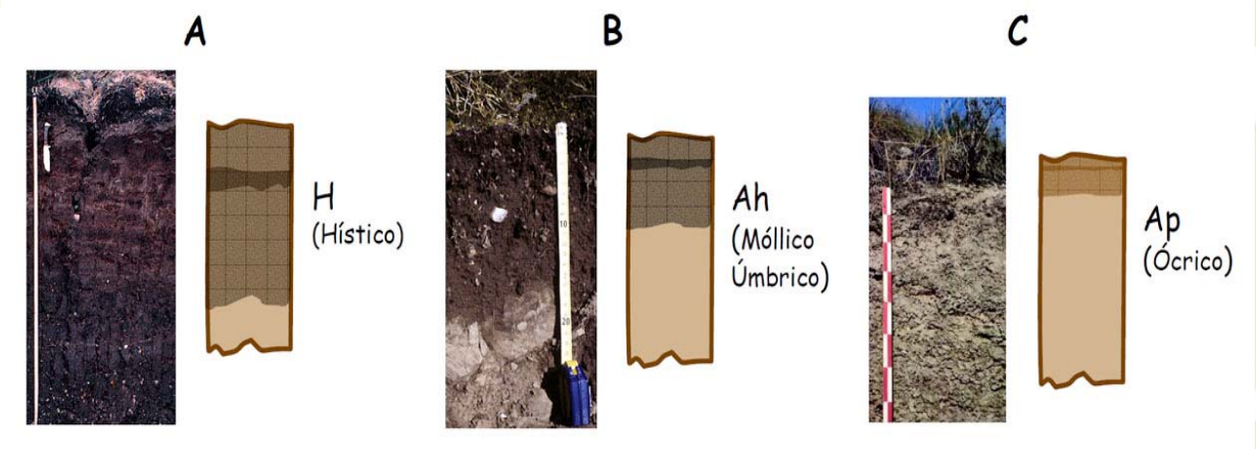


Figura 1.4.4. Proceso de melanización. A: incorporación muy intensa, en condiciones de encharcamiento, de materia orgánica poco descompuesta, que genera horizontes denominados hísticos (tipo H). Incorporación de materia orgánica en condiciones de aireación que genera horizontes denominados móllicos o úmbricos (tipo Ah). C: Desaparición de la materia orgánica en suelos de cultivo; se generan horizontes denominados ócricos (tipo Ap)

Rubefacción

Durante la alteración de los minerales primarios, el hierro que contienen se segrega como hierro amorfo. Este hierro amorfo puede cristalizar en forma de minerales hidratados (p. ej.: Goetita) que en ciertas condiciones (fuertes contrastes de humedad y elevada temperatura) se deshidratan y generan hematites (de color rojo intenso) (Figura 1.4.5).

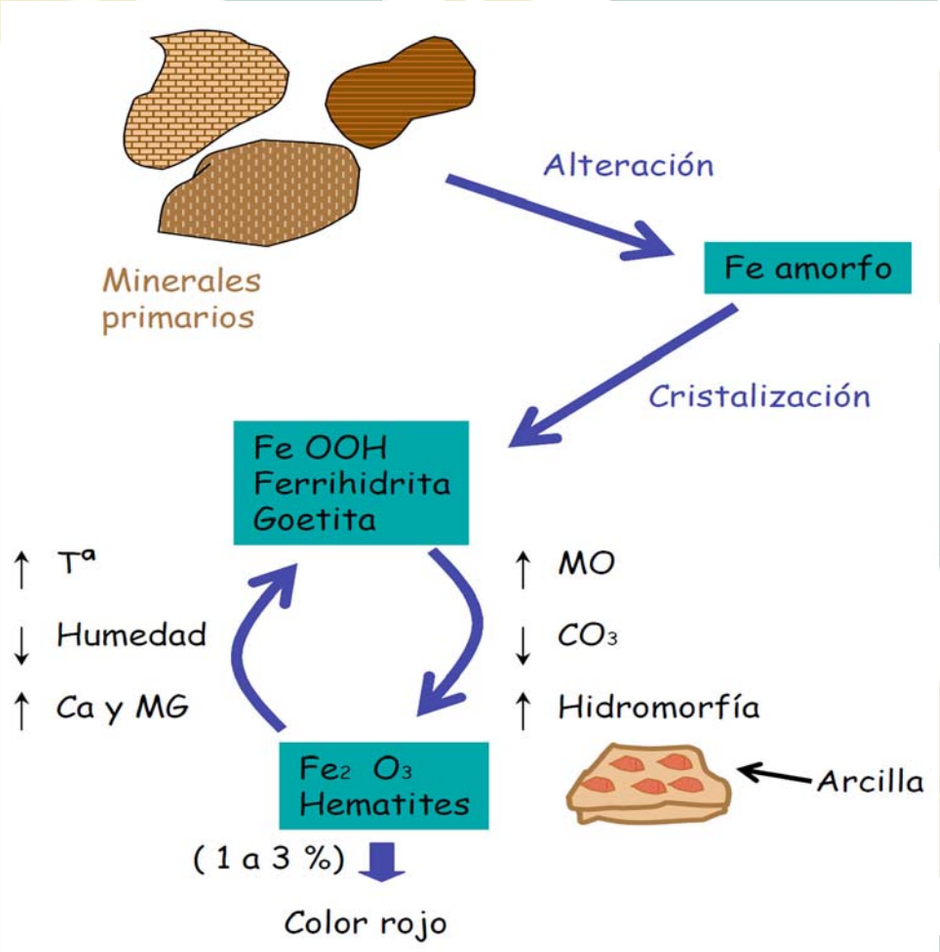


Figura 1.4.5. Proceso de rubefacción

Lavado - precipitación

Los carbonatos (CO_3^{2-}), el yeso ($SO_4Ca.2H_2O$) y otras sales más solubles (p. ej.: Cl-), se disuelven en los horizontes superiores del suelo y pueden precipitar en los horizontes profundos, donde se acumulan en forma de nódulos o costras que pueden endurecerse. También, estas sales pueden perderse fuera del sistema suelo (Figura 1.4.6).

Cuando afecta a los carbonatos, se denomina: *decarbonatación-carbonatación*. A los horizontes donde se acumulan los carbonatos precipitados se les denomina: *cálcicos* o *petrocálcicos* (duros) y en términos coloquiales se les conoce como lastras, costras o caliches.

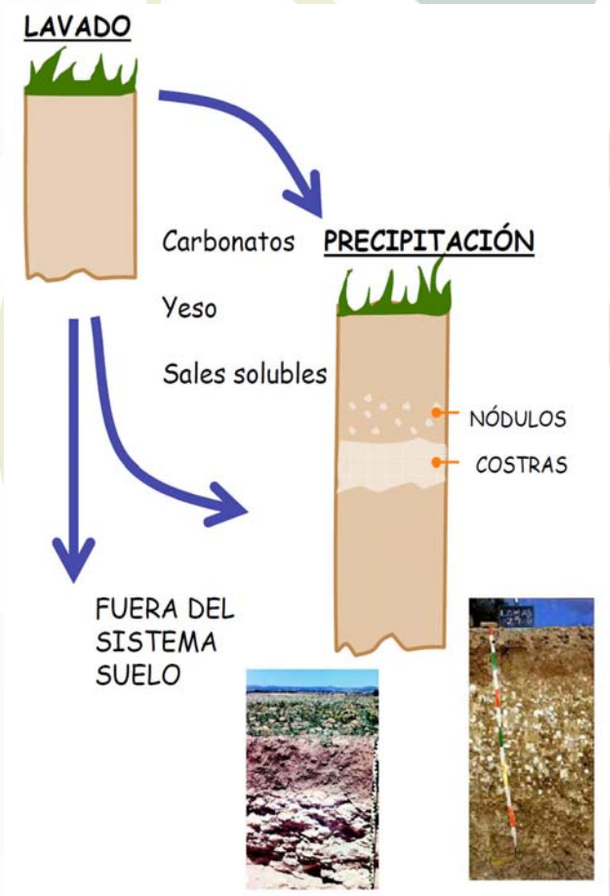


Figura 1.4.6. Proceso de lavado-precipitación

Ilimerización

Los minerales de la arcilla más finos, formados por arcillización en los horizontes superiores, sufren un proceso de lavado (eluviación) y se acumulan en la parte inferior del suelo, generando un tipo de horizonte (iluvial) denominado *argíllico*. (Figura 1.4.7)

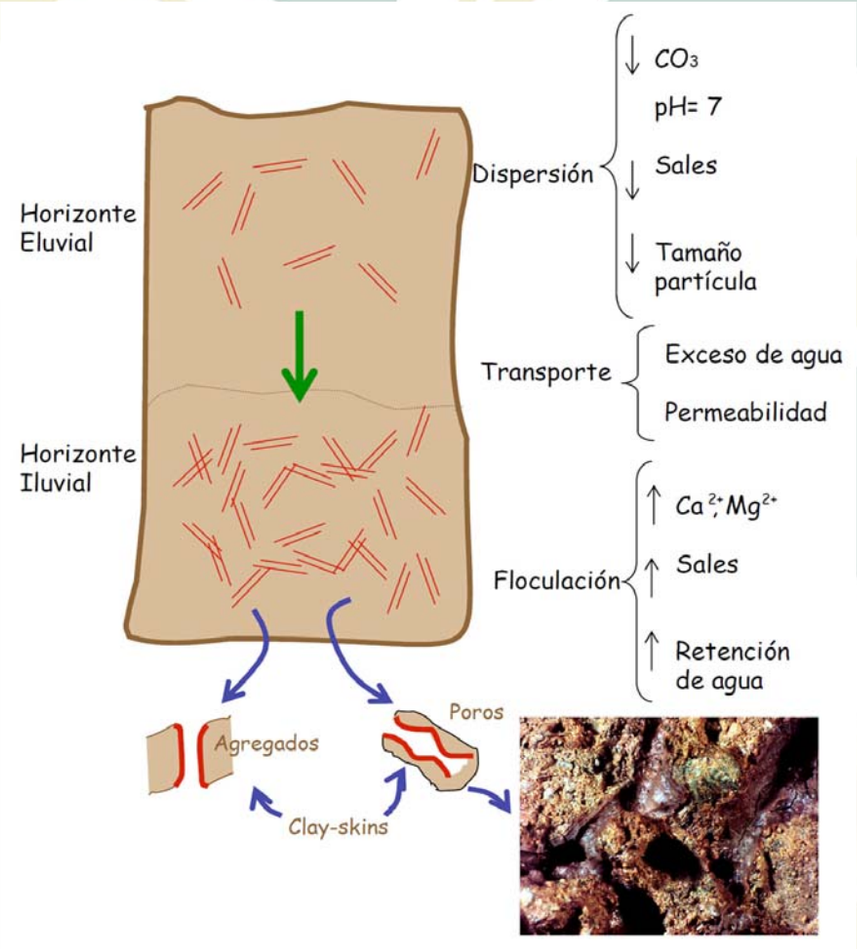


Figura 1.4.7. Proceso de ilimerización

Vertisolación

Proceso típico de suelos muy arcillosos, en clima contrastado (estaciones secas y húmedas). El suelo se homogeniza por mezcla de los materiales de la superficie con los de las partes profundas (Figura 1.4.8). Genera suelos denominados vertisoles, que son profundos, de color oscuro, aunque no muy ricos en materia orgánica, a los que se les abren grandes grietas en la estación seca.

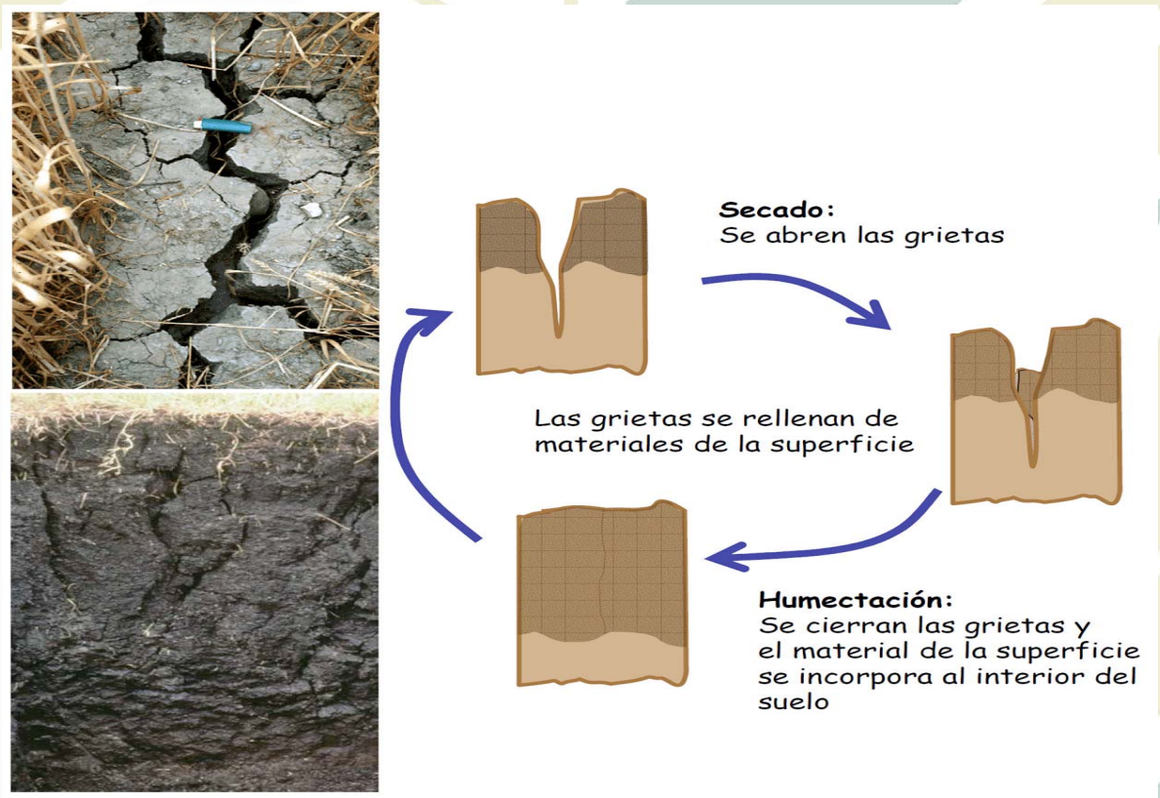


Figura 1.4.8. Proceso de vertisolación

Erosión - Acumulación

Los materiales de la parte superficial del suelo son arrastrados por el agua o el viento y acumulados por deposición en la superficie de otros suelos; aunque gran parte de esos materiales son arrastrados por las corrientes de agua hasta los océanos (Figura 1.4.9). Se trata de procesos destructores (principalmente) de suelo.

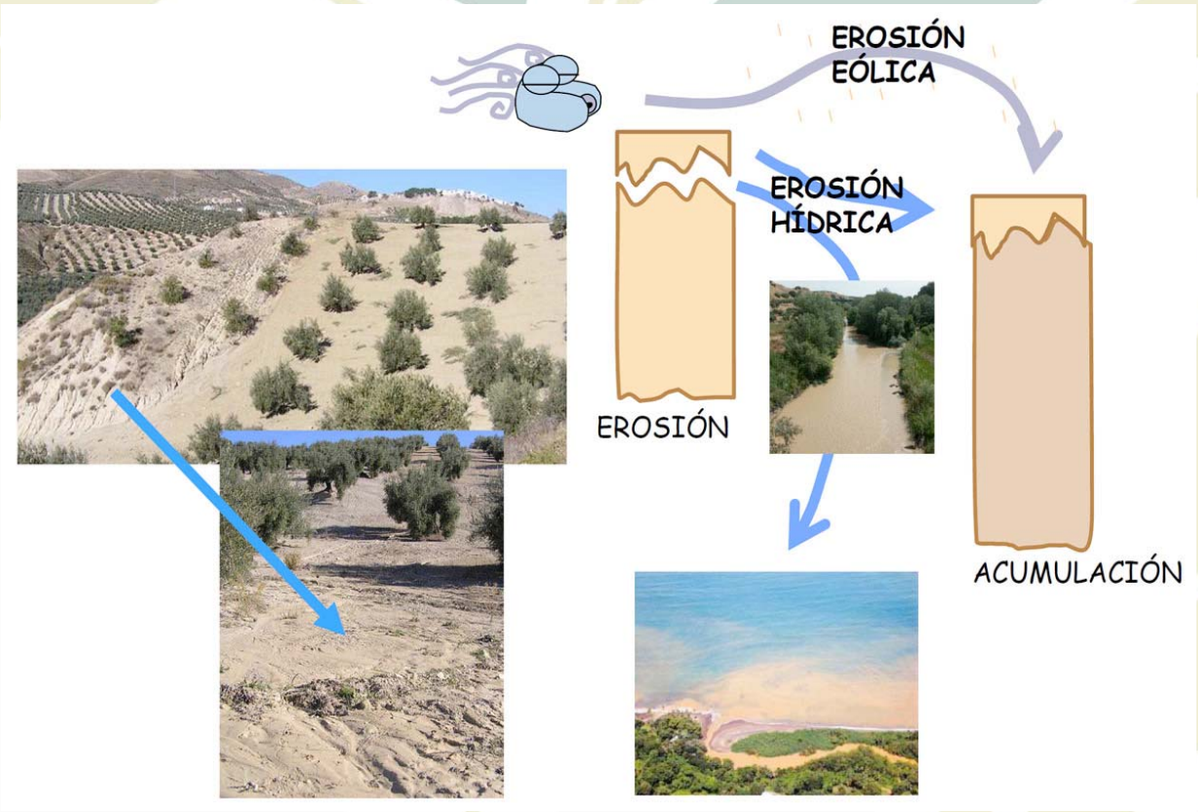


Figura 1.4.9. Proceso de Erosión - Acumulación

2. PROPIEDADES FÍSICAS Y FISICOQUÍMICAS MÁS IMPORTANTES DEL SUELO

2.1 PARTÍCULAS (TEXTURA)

¿Cuáles son las principales partículas del suelo?

Si hacemos un hoyo en el suelo de cualquier campo y tomamos un terrón y lo desmenuzamos con las manos y lo tamizamos (lo pasamos por una criba) veremos que está compuesto de distintos tamaños de partículas (Figura 2.1.1).

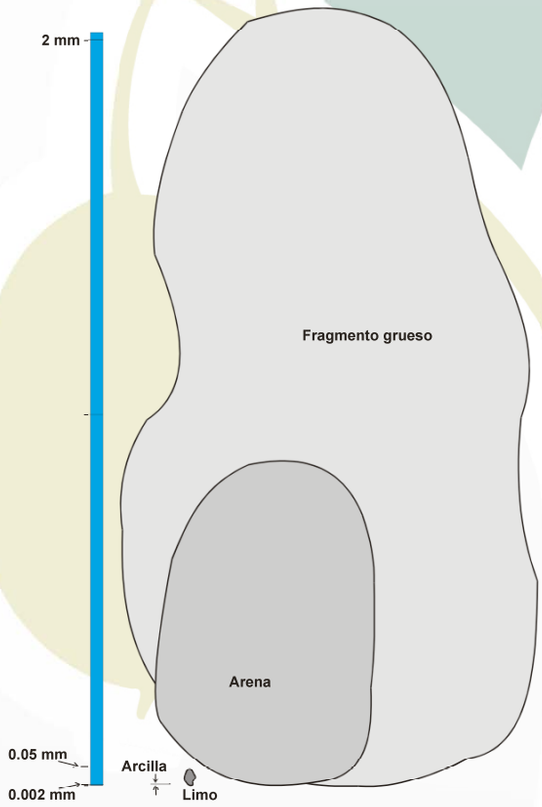


Figura 2.1.1 Tamaños de partículas del suelo (nótese que la barra vertical tiene una dimensión máxima de 2 milímetros)

En orden decreciente (desde mayor a menor tamaño) tendremos partículas tamaño piedra (tan grandes como la palma de la mano) partículas más pequeñas (tamaño arena de la playa) y pasando por partículas de tamaño intermedio (como las de la harina) llegaríamos a partículas pequeñísimas e invisibles al ojo humano.

Dado este amplio rango de tamaño, no hay la menor duda de que suelos con una alta proporción de partículas grandes (piedras) no tendrán las mismas características (propiedades de fertilidad física y química para el cultivo y la erosión) que aquellos con mayor cantidad de partículas pequeñas.

De este modo las partículas minerales del suelo pueden agruparse en 4 amplias clases, que reciben los siguientes nombres de acuerdo a los límites de tamaño:

1 PIEDRAS Y GRAVAS: > 2 mm

2 ARENA: 2 – 0.02 mm

3 LIMO: 0.02 - 0.002 mm

4 ARCILLA: < 0.002 mm

Para separar todas estas partículas recurrimos a tamices (cribas) y suspensión en agua.

Lo más normal es comenzar empleando un tamiz de luz de malla (tamaño del orificio de la criba) de 2 mm. Las piedras y gravas no pasarán por esa malla y el resto de partículas menores sí pasarán (desde arena hasta arcilla).

La porción del suelo que pasa que pasa a través del tamiz de 2 mm se llama “tierra fina”.

La tierra fina se divide así en 3 fracciones de tamaño de partícula: Arena, limo y arcilla.

Una manera fácil de determinar las proporciones de arena, limo y arcilla en el laboratorio es haciendo un análisis mecánico, pesando una determinada cantidad de tierra fina y ponerla en una botella con agua agitando para formar una suspensión. Como la densidad de todas las partículas minerales del suelo es parecida (aproximadamente, 2.5 g / cm^3) el grado en que se van depositando o sedimentando en el fondo de la botella viene determinado por su tamaño. En el mismo momento que dejamos de agitar la suspensión será homogénea y si vertiéramos un

poco del líquido en una taza tendríamos arena, limo y arcilla. Pero si dejamos pasar 5 minutos y vertemos de nuevo una porción en la taza, solo tendríamos limo y arcilla, y si dejáramos en reposo la botella unas 8 horas (en función de la temperatura) y tomáramos una muestra de los primeros centímetros superiores únicamente habrá arcilla, porque el resto de arena y limo han sedimentado. Si esas tacitas dejamos que se evapore el agua y después las pesamos como sabemos que la primera muestra tenía arena, limo y arcilla, y la segunda solo limo y arcilla y la última solo arcilla, podemos calcular el porcentaje de cada muestra por diferencia.

Textura del suelo

La proporción de arena, limo y arcilla en la tierra fina es la TEXTURA del suelo. Se expresa en porcentaje y se representa en un triángulo textural (Figura 2.1.2).

Así un suelo puede tener un 30% de arena, un 50% de limo y un 20% de arcilla, significando que 100 gramos de tierra fina de un suelo tienen 30 g de arena, 50 g de limo y 20g de arcilla.

Los suelos pueden de este modo clasificarse en varias clases o grupos texturales como puede verse en el triángulo.

De este modo llevaríamos esos porcentajes al triángulo textural y clasificaremos ese suelo en función de su textura. Los suelos que tienen una proporción equilibrada se llaman de textura franca. Si predomina un porcentaje elevado de uno de sus constituyentes el calificativo de ese suelo: es arcilloso, o arenoso o limoso.

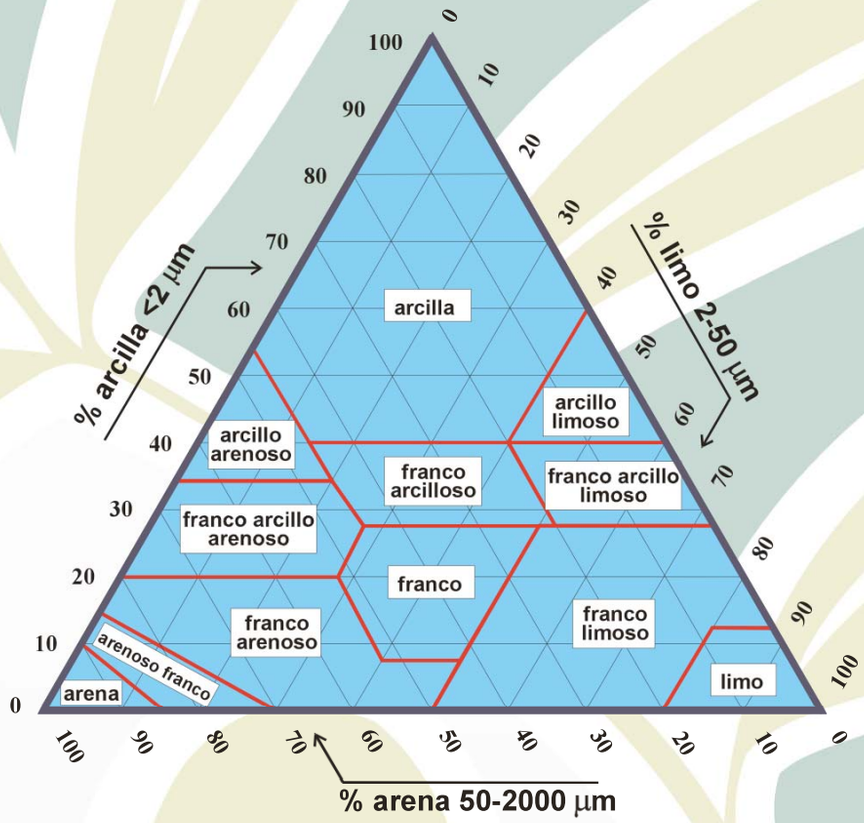


Figura 2.1.2. Triángulo textural de los suelos. Las doce Clases Texturales

¿Por qué es tan importante la Textura?

Hay dos razones por las cuales la textura es una propiedad fundamental del suelo.

Una de ellas es el tamaño de partícula. Puede haber una diferencia de hasta mil veces en el tamaño de arena y arcilla; es decir, las partículas de la arena ser mil veces mayores que las de la arcilla. Esto significa que los espacios porosos entre las partículas de arena son muy grandes comparados con los que dejen las partículas de arcilla (Figura 21.3). Estos espacios o poros son muy importantes para muchos procesos del suelo.

Podemos ilustrar las relaciones entre tamaño de partícula y poros comparando los grandes huecos o espacios que dejaran un montón de ladrillos puestos al azar con los minúsculos huecos o poros dejados por un montón de cemento. Un granito de cemento equivaldría a una partícula de limo o arcilla y un ladrillo equivaldría a la arena.

En resumen, en los suelos arenosos los huecos entre granos individuales crean un entramado de grandes poros y en suelos donde la cantidad de arcilla se incrementa, también lo hace el número de pequeños poros.

La importancia de los poros en el suelo podemos entenderla con la capacidad de almacenamiento de agua, que variará considerablemente en función de la textura del suelo.

Suelos arenosos con grandes poros drenan rápidamente el agua, mientras que suelos arcillosos retienen mucha agua.

En función de la textura habrá suelos poco o nunca encharcados, o muy encharcados, después de una lluvia intensa.

El número de poros que están llenos de agua en cualquier momento o época del año afecta a una serie de propiedades del suelo, tal como el intercambio de gases con la atmósfera, la cantidad de agua almacenada en el suelo y la cantidad disponible para las plantas.

Otra razón de la importancia de la textura es que tiene implicaciones importantes para la fertilidad de los suelos. Se debe a que la proporción de arena, limo y arcilla junto con la cantidad de materia orgánica determinan la capacidad del suelo para almacenar y suministrar nutrientes a las plantas.

2.2 AGREGADOS (ESTRUCTURA)

¿Qué es la ESTRUCTURA del suelo?

La estructura del suelo es la manera de agruparse las partículas de arena, limo y arcilla para formar unas unidades más grandes llamadas agregados (Figura 2.2.1).

Esta sería una definición incompleta, pues no hemos tenido en cuenta otros componentes del suelo como la materia orgánica, el aire y el agua.

La estructura responde a la realidad de que los constituyentes del suelo –materia orgánica y mineral, agua y aire- no están mezclados de una forma irregular, sino que juntos forman un cuerpo organizado con una estructura definida y unas propiedades físicas y químicas.

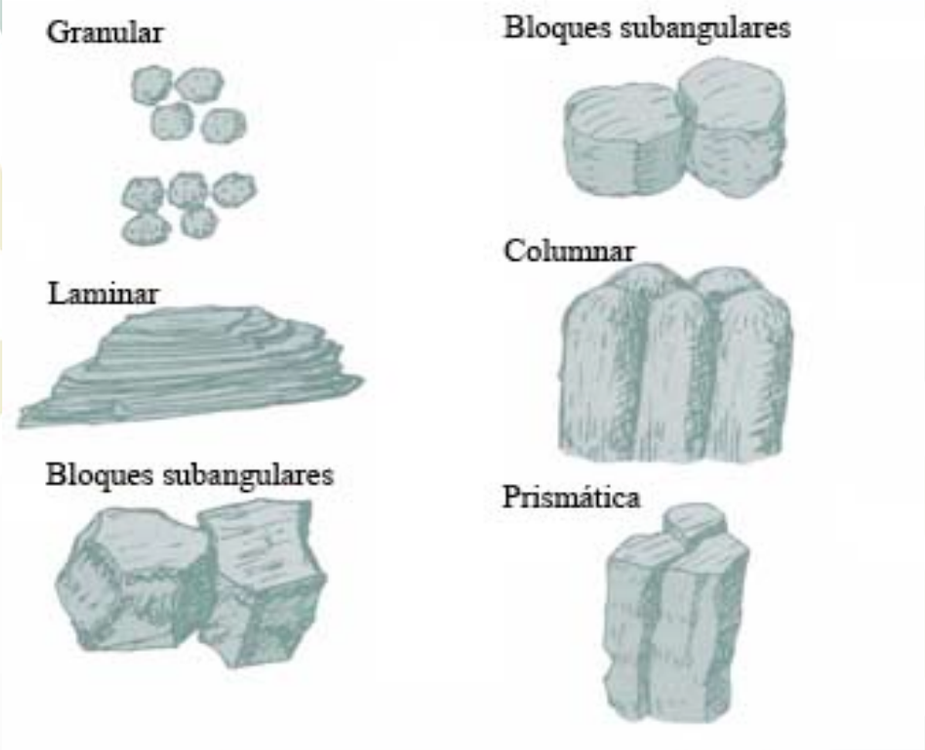


Figura 2.2.1. Distintos tipos de agregados estructurales

De acuerdo con lo visto en el apartado anterior, si comparamos el número de poros grandes y pequeños en dos suelos con texturas muy contrastantes, uno con textura arcillosa y otro con textura arenosa, el suelo arenoso debería tener una mayor cantidad de poros grandes. Pero, por la presencia de la estructura, esto es correcto en solo algunos casos, a menudo el número de grandes poros es mayor en suelos que tienen texturas arcillosas.

Esto puede parecer confuso y aún contradictorio a primera vista, pero tiene una fácil explicación, por el hecho de que hasta ahora, hemos considerado los efectos de la textura de una manera aislada. Ahora tenemos que considerar o tener en cuenta como las partículas individuales se ordenan para formar agregados estructurales.

Resumiendo, las partículas del suelo pueden existir de dos formas: o como simples granos sueltos sin estructura, a modo de una densa masa desestructurada; o como agregados de varios tamaños. Y es así como la formación de los agregados del suelo modifica las características básicas texturales del suelo, particularmente el número de grandes poros.

Cuando usamos el término estructura del suelo, en un sentido amplio y a nivel de lo que podemos reconocer con el ojo humano, nos estamos refiriendo al tamaño, forma y estabilidad de los agregados del suelo (Figura 2.2.1). Los agregados pueden ser muy grandes (varios centímetros) o pequeños (pocos milímetros). Los agregados pueden dividirse por tamaño en microagregados, cuando su tamaño es menos de 250 micras (la cuarta parte de un milímetro), y macroagregados mayores de esa cifra. Según la forma de los agregados la estructura puede ser: laminar, prismática, columnar, en bloques subangulares o angulares, granular y migajosa. Los agregados pueden estar bien o mal desarrollados, ser más estables ante la destrucción o menos. La estabilidad de los agregados es una importante propiedad. para la erosión del suelo.

El grado de desarrollo de la estructura (Figura 2.2.2) se describe según los siguientes criterios:

1) Sin estructura

a. Granos de arena sueltos, con muy poca presencia de partículas de las fracciones finas.

b. El suelo forma una estructura continua, maciza. No muestra fisuras o superficies de debilidad. Los fragmentos se rompen según la dirección de la fuerza que se aplique.

2) Suelo estructurado, formando agregados

a. Grado de desarrollo débil. Las superficies de debilidad de los agregados están poco definidas. Cuando se separan los agregados siguiendo estas superficies de debilidad, cae abundante material suelto.

b. Grado de desarrollo moderado. Los agregados están bien diferenciados y poseen una duración moderada.

c. Grado de desarrollo fuerte. Los agregados están separados por superficies de debilidad bien definidas, de modo que cuando se separan no cae material suelto y vuelven a encajar entre sí perfectamente. Los agregados son duraderos y el nivel de organización es elevado.

Los efectos de la estructura del suelo podemos ilustrarlos volviendo al ejemplo que usamos para la textura, cuando comparábamos el tamaño

de los poros de una pila de ladrillos y el de un montón de cemento. ¿Qué sucede al tamaño de los huecos entre partículas si primero mezclamos el cemento con agua para formar por ejemplo 4 bloques de hormigón? Pues, estos bloques serán más grandes que los ladrillos y por lo tanto los poros serán mayores. Y los granos de arena (equivalentes a los ladrillos) por mucho que los mezclemos con agua nunca darán bloques mayores, porque no tienen facilidad para pegarse, y sin embargo las partículas de arcilla (equivalentes al cemento) si tienen facilidad para agregarse. Es la tendencia a formar mayores unidades estructurales (agregados) lo que cuenta para la presencia de grandes poros en suelos arcillosos.

En suelos que no forman agregados, las partículas texturales pueden existir como partículas individuales (en cuyo caso se dice que la estructura es de grano suelto osimple) o en el otro extremo como una masa o bloque compacto (y la estructura se denomina masiva). Es en estos dos casos extremos en donde las características físicas del suelo están muy relacionadas con su textura.

En los demás casos la estructura del suelo resulta de la manera en que partículas minerales y orgánicas de forma irregular se ordenan unas con otras para dar agregados.

Figura 2.2.2. Distintos Grados de estructura

¿Cómo se forman los agregados del suelo?

Mediante dos procesos: agregación y estabilización. Los agregados se forman cuando el suelo está sujeto a cambios de volumen por hinchamiento y contracción, penetración de las raíces o heladas. Todos estos procesos tienden a romper la masa continua del suelo en unidades discretas. Las partículas coloidales del suelo arcilla y humus tienden a establecer uniones formándose agregados organominerales que son la génesis de los agregados estructurales del suelo.

Se dice que los agregados son estables cuando son capaces de resistir presiones causadas por procesos tales como compactación y repentino humedecimiento. El humedecimiento repentino es un proceso importante en romper agregados inestables porque cuando los agregados secos son repentinamente expuestos al agua , los poros cercanos a la superficie del agregado se llenan de agua atrapando aire en su interior, la presión resultante puede a veces romper el agregado si éste es inestable mientras que si está fuertemente compactado resiste.

Macroagregados y microagregados

Recordemos que los agregados pueden dividirse por tamaño en microagregados, cuando su tamaño es menos de 250 micras (la cuarta parte de un milímetro), y macroagregados mayores de esa cifra.

Los microagregados son estabilizados por la materia orgánica humificada persistente o madura mientras que los macroagregados se estabilizan por materia orgánica transitoria o temporal no humificada completamente. Además hay otros agentes cementantes como carbonatos, óxidos e hidróxidos que tienden a la preservación de los agregados del suelo, y así a la conservación de la estructura.

2.3 POROSIDAD

¿Qué es la POROSIDAD? El AGUA del suelo

Antes de tratar del agua en el suelo es preciso hablar de la porosidad del mismo, que va íntimamente unida a la circulación del agua.

Los efectos combinados de la textura y estructura del suelo determinan el rango del tamaño de los poros dentro del suelo (Figura 2.3.1)

Sabemos qué es la estructura del suelo, pero cómo podemos describirla. Pues midiendo su densidad. Lo aclaramos con un ejemplo. Supongamos que tenemos dos volúmenes iguales de suelo, pero uno tiene pocos poros y mucha masa, y el otro muchos poros y menos masa. Quién pesará más, aquel que tenga menos poros y más cantidad de partículas de suelo lógicamente. Esto significa que podemos calcular la razón (cociente) del peso al volumen para calcular la cantidad de espacio poroso en un suelo. A esta propiedad se le llama la densidad aparente. Suelos con alta densidad tienen menos espacio poroso. La formación de macroagregados estables con muchos poros grandes es la razón de que suelos con altos contenidos en arcilla tengan a menudo densidades aparentes menores que las de suelos arenosos.

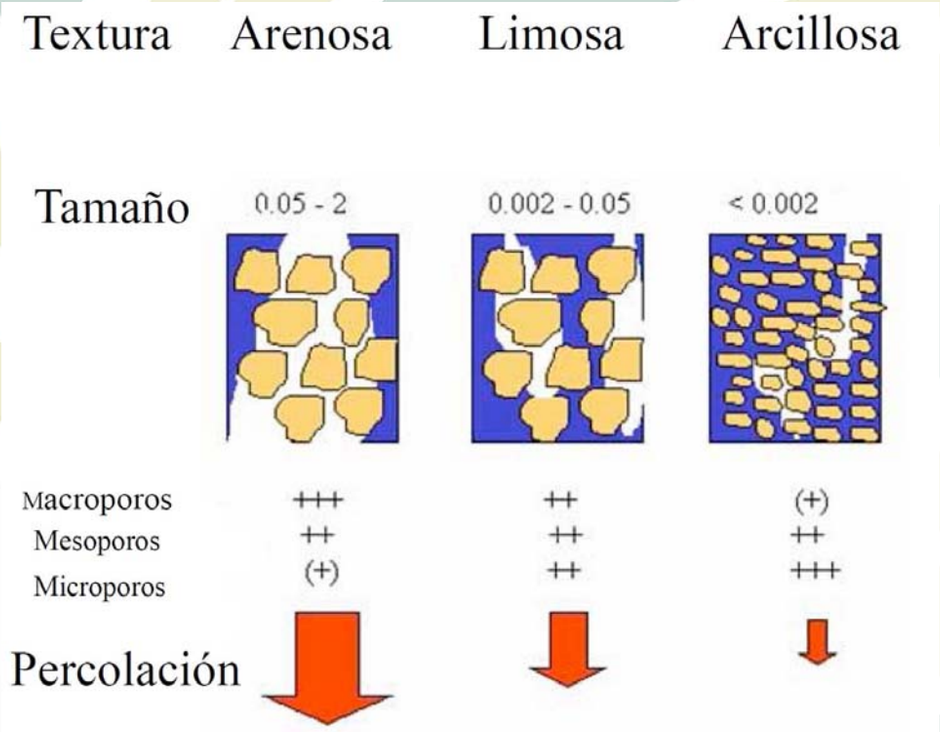


Figura 2.3.1. Relación entre textura, tamaño de poros y percolación del agua. A mayor tamaño de la flecha, mayor percolación

La densidad aparente es fácil de determinar, así podemos poner un cilindro hueco de acero de un volumen conocido dentro del suelo, sacarlo con el trozo de suelo, quitar la masa de suelo, secarla y pesarla. La densidad aparente es el cociente de dividir la masa del suelo por el volumen del cilindro. Supongamos que sale 1.4 g/cm^3 , significa que hay 1.4 gramos de partículas en un centímetro cúbico de suelo. La porosidad del suelo puede calcularse usando la medida de la densidad aparente y la densidad media de las partículas del suelo que es sobre 2.7 g/cm^3 . Supongamos que la porosidad es del 48%, significa que el 52% del volumen del suelo está ocupado por partículas del suelo.

Valores de 35-50% de porosidad son típicos de suelos arenosos, y de 40-60% para arcillosos.

La situación ideal para el crecimiento de la planta es tener una combinación de microporos (poros pequeños menores de media micra), mesoporos (poros intermedios, de 0.5 a 50 micras) y macroporos o poros de transmisión (mayores de 50 micras). Los micro y mesoporos almacenarán agua y los macro gases.

2.4 AGUA DEL SUELO

El suelo actúa como reservorio o depósito de agua para el consumo de las plantas

El agua del suelo puede provenir de distintas fuentes (Figura 2.3.2):

1. Agua de precipitación. Representa la principal parte del agua aportada en la mayoría de los ecosistemas. Su aporte puede ser periódico o concentrarse en determinadas épocas.

2. Agua de origen subterráneo (freática).

3. Nieblas, humedad atmosférica. Consiste en un aporte muy débil, pero que en algunos casos constituye la única aportación de agua durante la época seca como ocurre en lugares cercanos a la costa.

4. Agua de riego. Repone el agua extraída por las plantas y la evaporada por la superficie del suelo.

Una vez en el suelo, el agua puede seguir distintas trayectorias.

1. Agua de escorrentía. Circula sobre y a través de los horizontes superiores, de manera paralela a la superficie del suelo. La escorrentía se forma tras el inicio de la lluvia sobre la superficie del suelo cuando existe una cierta pendiente, aunque sea muy baja. Para que se forme la escorrentía es necesario que el agua precipitada en un intervalo de tiempo determinado sea superior a la cantidad que el suelo puede absorber, bien por causa de sus características físicas, o bien porque se halle ya saturado por agua.

2. Agua gravitacional. Es el agua que se infiltra por efecto de la fuerza de la gravedad a través de los macroporos y mesoporos del suelo (poros superiores a 10 µm de diámetro). Circula en sentido vertical, oblicuo (si existe cierta pendiente), o en otro sentido , debido al entramado poroso del suelo que muestra una distribución caótica. Cuando la permeabilidad de los horizontes inferiores del suelo es muy baja, el agua gravitacional puede acumularse formando una capa de agua "suspendida" o "colgada" de carácter temporal.

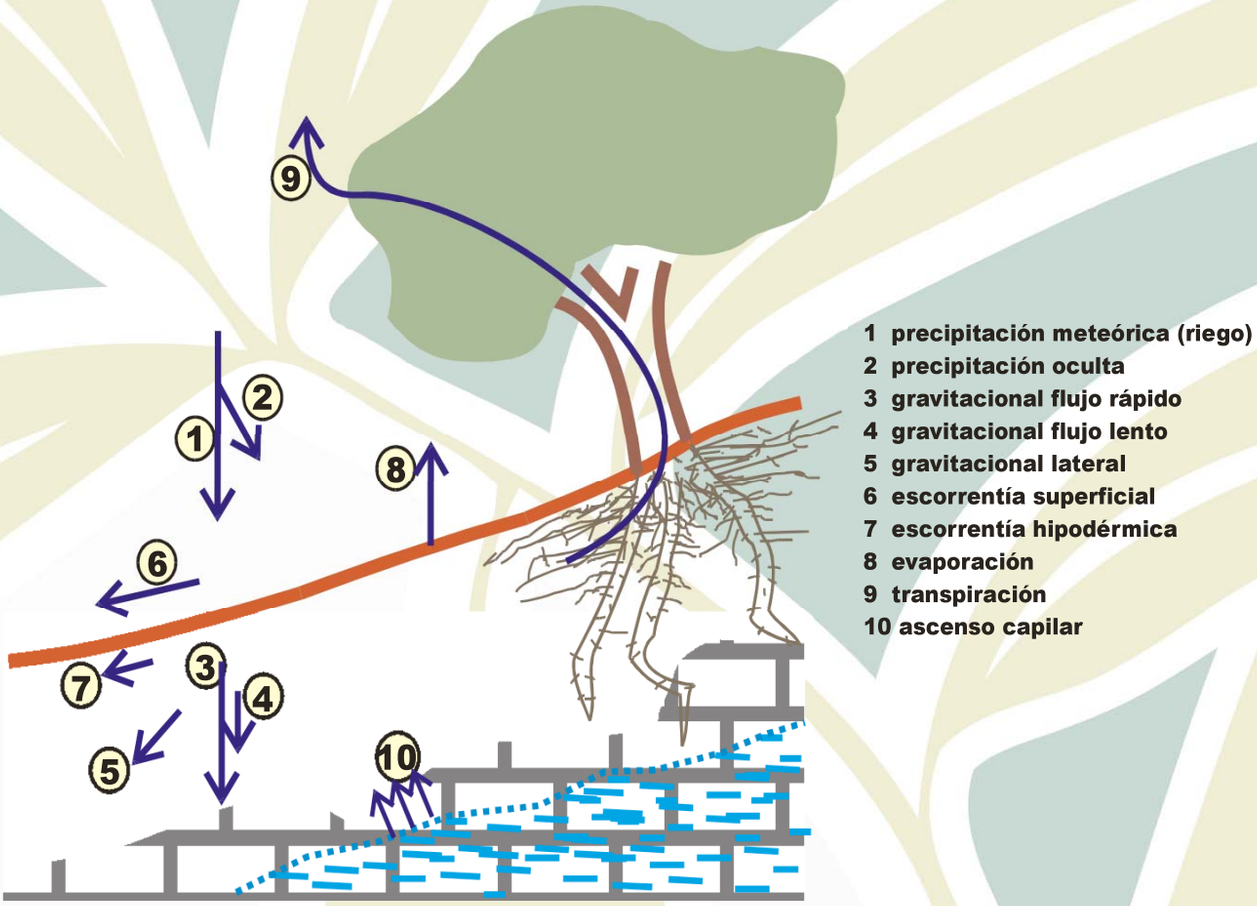


Figura 2.3.2. Distintas fuentes de agua en el suelo. Posibles "caminos" que recorre dentro de él

Existen dos tipos de agua gravitacional:

a. Agua gravitacional de flujo rápido. Circula a través de los poros de diámetro superior a 50 µm de diámetro durante las primeras horas después de la lluvia.

b. Agua gravitacional de flujo lento. Circula durante varias semanas después de la lluvia a través de los poros de diámetro comprendido entre 50 y 10 µm.

3. Agua retenida. Es el agua que ocupa los mesoporos y microporos del suelo, donde las fuerzas capilares ascendentes son más fuertes que la gravedad.

a. Agua capilar. Es el agua retenida en los mesoporos, y que es utilizable por las plantas.

b. Agua higroscópica o residual. Es el agua que queda retenida en los microporos, formando una película muy fina que recubre la pared de las partículas del suelo.

Está tan fuertemente retenida que no es absorbible por las raíces.

La división del agua del suelo en agua gravitacional, capilar o higroscópica, tal como hemos visto no es una clasificación apropiada, porque no permite predecir el comportamiento del agua. Cuando el agua se infiltra en el suelo el frente de humectación penetra hacia el interior del perfil. La velocidad a la cual el agua percola a través del suelo se calcula a través de la conductividad hidráulica, que indica cuan fácilmente el agua se mueve a través del perfil del suelo. Esto variará entre diferentes tipos de suelos, porque el flujo del agua depende de dos propiedades contrapuestas. Por un lado la presión generada por el agua en el suelo y por otro la resistencia que oponen las partículas del suelo al flujo del agua. El componente de la presión depende de varios factores como la altura y la presión generada por el peso de la columna de agua sobre el frente de humectación. Y la resistencia al flujo en el suelo depende también de tres factores: como de bien estén interconectados los poros, la distribución del tamaño de los poros y del contenido de agua del suelo. Así en suelos que tienen muchos poros pequeños rellenos de aire el movimiento del agua puede ser muy lento y en otros suelos que tienen grandes poros ya llenos de agua el movimiento es más rápido.

Tamaño de poros y retención de agua

En la actualidad, se recurre preferentemente al concepto de estado energético del agua, que predice el comportamiento del agua del suelo. Como se ha dicho el agua en el suelo ocupa total o parcialmente los poros, esta agua se adhiere con más o menos fuerza a las partículas sólidas. Para que las plantas extraigan esta agua tienen que ejercer un esfuerzo de succión, para vencer esa fuerza de adherencia.

En el suelo, el agua está sometida a diferentes campos de fuerzas, como la acción de la gravedad y a las fuerzas capilares, osmóticas o de absorción, que condicionan el movimiento o la retención del agua en el suelo.

Vamos a ver primero la retención de agua por el suelo y después el movimiento.

La fuerza con que el suelo retiene al agua depende de la cantidad de agua retenida y de la superficie específica de las partículas del suelo. Según esto, el agua del suelo se puede dividir en tres estados o fases (Figura 2.3.3).

1. La capacidad de campo. Es la máxima cantidad de agua retenida por el suelo (agua capilar y agua higroscópica) después de la saturación. Su medición debe hacerse en el campo, después de un período lluvioso y tras haber dejado escurrir el agua gravitacional durante dos o tres días. Es decir cuando los poros de transmisión se han vaciado de agua. (El agua gravitacional sería aquella que se perdería en este período)

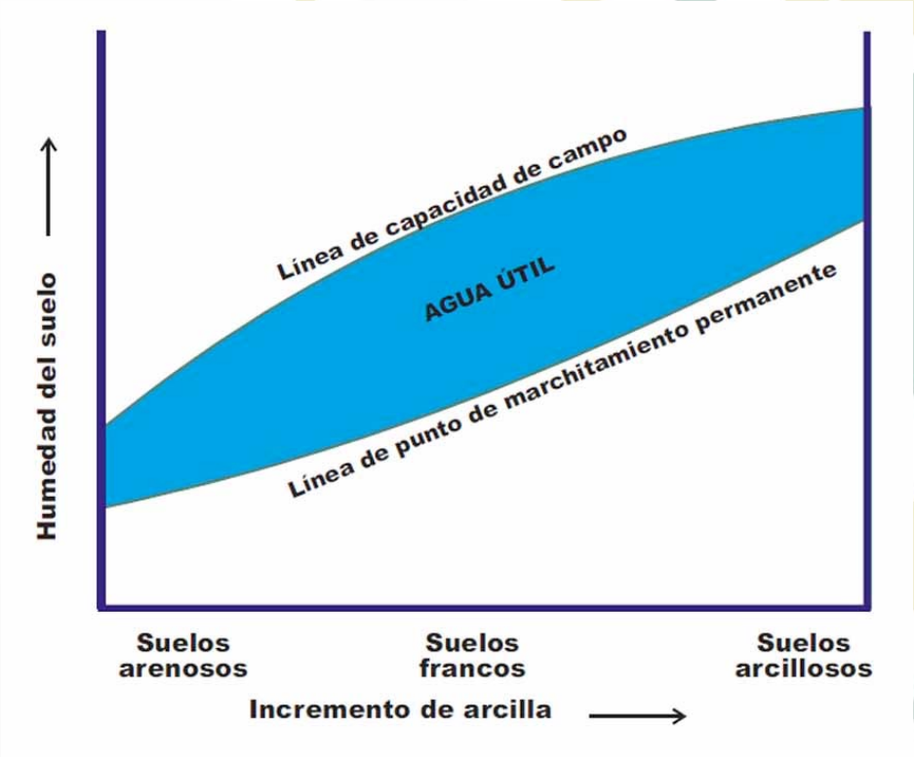


Figura 2.3.3. Esquema de las fases del agua en el suelo

2. El punto de marchitamiento permanente. A partir de la capacidad de campo, el suelo va perdiendo agua por evaporación y la que las plantas absorben. Cuanto menos agua quede, más fuertemente retenida por las partículas del suelo, hasta que llega un momento en que la fuerza de succión de la planta es inferior a la fuerza de retención y las plantas se marchitan. Corresponde al valor máximo de agua

higroscópica, agua no absorbible por las raíces. Cuando el contenido de agua es igual o menor al punto de marchitamiento, las plantas no tienen agua disponible y mueren. El punto de marchitamiento depende de la textura y la porosidad, y, por lo tanto, es diferente para cada tipo de suelo.

3. El agua útil o disponible. Es la cantidad de agua almacenada en el suelo después del período de lluvias, y su valor es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente (Figura 2.3.3).

El efecto de las fuerzas capilares es especialmente importante en los climas áridos, donde la evapotranspiración potencial es muy alta y se forma un gradiente muy acentuado en la interfase suelo / atmósfera. Los horizontes más profundos suelen mantener un contenido en humedad más elevado que los superficiales, ya que no sufren la evaporación o la absorción realizada por las plantas.

Ahora pasamos a ver el movimiento del agua en el suelo donde tiene más importancia la estructura del suelo que la textura. Esto es una consecuencia de lo anteriormente explicado.

Los procesos implicados en este movimiento son:

1) Infiltración. La infiltración consiste en la penetración del agua de lluvia o riego en el suelo. El grado de infiltración de un suelo depende de la permeabilidad del suelo, la que a su vez está condicionada por la porosidad, la estructura o el grado de humedad. Cuando se aplica agua a una parte del suelo como es el caso del riego por surcos el movimiento del agua se produce tanto en sentido vertical como horizontal.

La velocidad de infiltración se mide en milímetros de altura de agua infiltrada por hora y es diferente en función de la textura. Así en suelos arenosos es de más de 30, en suelos franco- arenosos de 20 a 30, en los de textura franca de 10 a 20 y en los arcillosos de menos de 5 mm de altura de agua por hora .

2) Redistribución. Cuando cesa la lluvia o el riego, antes de que tengan lugar los fenómenos de absorción radicular y evaporación, el agua del suelo presenta una dinámica de dos velocidades como se ha dicho anteriormente:

a. Cuando el suelo está aún saturado, el agua de los macroporos circula rápidamente y se pierde por drenaje o percolación.

b. Cuando se alcanza la capacidad de campo el agua circula por los mesoporos y microporos, de manera más lenta, al estar retenida por fuerzas capilares.

3) Desecación. Una vez que el agua se ha redistribuido, comienza el proceso de desecación debido al consumo realizado por las plantas y a la evaporación.

Las principales fuerzas o causas que originan los movimientos son la gravedad (descendente) y la capilaridad con desplazamientos desde abajo hacia arriba y en todas las direcciones inclinadas posibles.

La superficie del suelo, al secarse progresivamente, forma una capa o costra seca que protege a los horizontes inferiores de la desecación. Ese fenómeno se conoce como self-mulching, y es característico de suelos cultivados sin laboreo mecánico y en condiciones de gran aridez, y se llega a interrumpir el movimiento ascendente. El self-mulching contribuye a estabilizar el grado de humedad del suelo, pero disminuye la infiltración por formar esa costra y, consecuentemente, favorece la escorrentía y la aparición de los procesos de erosión. El mantenimiento de los residuos de la cosecha o de la vegetación espontánea self-mulching artificial de gran calidad.

2.5 PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DEL SUELO

A diferencia de los animales las plantas son inmóviles. Y tienen que nutrirse de los elementos químicos que estén almacenados y retenidos en el suelo y puestos a disposición de las raíces cuando el suelo esté húmedo. El suelo sirve de soporte y de fuente de nutrientes para las plantas.

Pero junto a estos efectos beneficiosos, el suelo puede actuar como fuente de acidez y contaminantes. El potencial de un suelo para almacenar "químicos" depende de su textura (principalmente arcillas) y de su contenido en materia orgánica. Las principales partículas para almacenar nutrientes son las partículas de naturaleza coloidal tales como la arcilla y el humus. A estas partículas finas se les llama complejo adsorbente del suelo, y debido a su carga eléctrica superficial, principalmente de tipo negativo pueden retener numerosos cationes, que gradualmente pueden ser cedidos a las plantas cuando son absorbidos por las raíces (Figura 2.5.1).

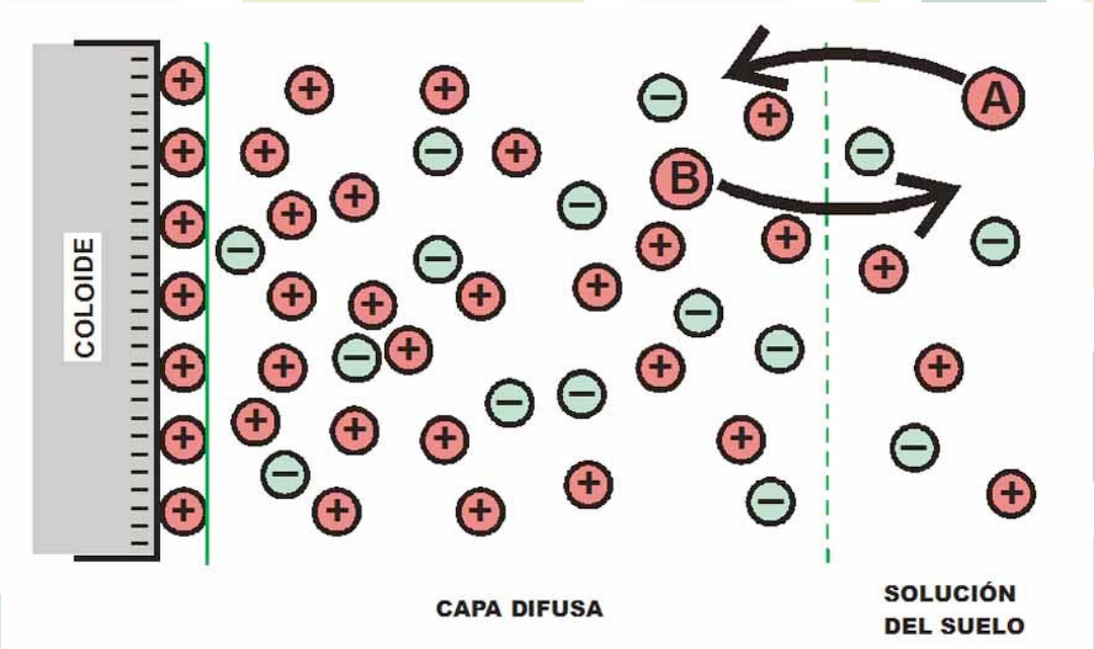


Figura 2.5.1 Intercambio de iones entre la capa difusa del coloide y la solución del suelo

Al ser coloides significa que tienen una gran superficie específica.

¿Qué es el área superficial específica o superficie específica? Vamos a ilustrarlo con un ejemplo (Figura 2.5.2) donde subdividimos los lados de un cubo por la mitad, por la cuarta parte o por un octavo de lado. Podemos poner otro ejemplo más llamativo: Imaginemos que tenemos un cubo de un metro de lado. El área superficial total será de $6m^2$, si ahora subdividiéramos todas las aristas o lados del cubo en cubitos microscópicos de una millonésima de metro, el área superficial sería de seis millones de metros cuadrados. Es decir que con el mismo volumen, tienen una grandísima diferencia. Así si quisiéramos por ejemplo pintar la superficie del cubo íntegro, o el subdividido en cubitos, gastaríamos muchísima pintura en colorear este último. Además de la superficie específica como hemos dicho anteriormente, muchos de los coloides del suelo pueden tener cargas eléctricas. La arena y limo apenas las presentarán, pero la arcilla y el humus sí. Así les permite la capacidad de almacenar nutrientes, acidez y toxinas.

A la máxima cantidad de cationes que un suelo puede retener se le llama Capacidad de Intercambio de Cationes. Y depende del tipo de arcilla y de la materia orgánica humificada. Y también del clima y roca madre. Esta propiedad es de vital importancia cuando queremos medir la capacidad del suelo para suministrar nutrientes tales como los cationes potasio, calcio, magnesio, amonio a las plantas. Como hemos dicho que estos coloides presentan una carga permanente negativa, el anión nitrato no será atraído, (porque cargas del mismo signo se repelen) a las superficies coloidales y será susceptible de ser lavado del suelo, y si va a un freático, o a un embalse lo contaminará.

Estos nutrientes adsorbidos sobre las superficies de los coloides, no están fijamente retenidos sino que pueden ser intercambiados por otro catión que esté en exceso en la solución del suelo y de ahí que se les llame bases de cambio, porque dan una reacción en agua de carácter básico (significa un pH mayor de 8).

Antes de proseguir aclararemos que los elementos nutritivos forman parte de compuestos químicos. Algunos de estos compuestos químicos al disolverse en agua se disocian en dos partes llamadas iones, que se caracterizan por tener carga eléctrica: el ión que tiene carga positiva se

llama catión, y el ión que tiene carga negativa se llama anión. Por ejemplo el compuesto químico cloruro sódico se disocia en agua en anión cloro y catión potasio.

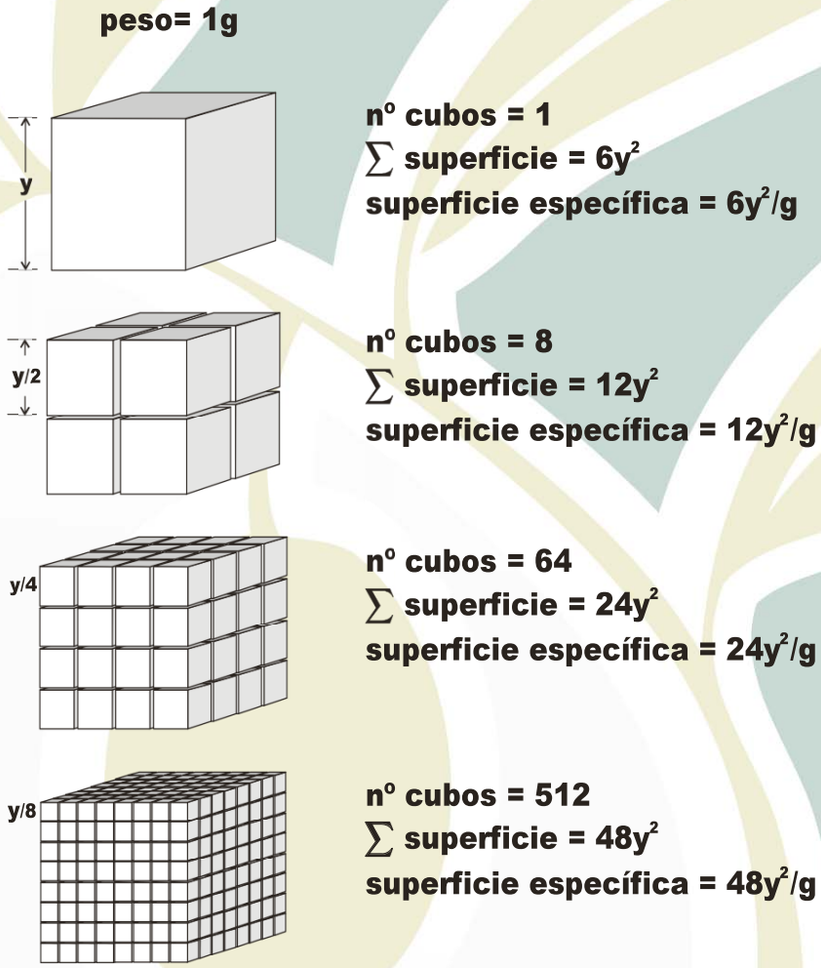


Figura 2.5.2. Superficie específica: demostración de su incremento cuando disminuye el tamaño de las partículas

2.6 QUÉ ES EL pH DEL SUELO. LA ACIDEZ DEL SUELO

Instintivamente podemos decir que tal bebida, producto químico, etc tiene un pH ácido, básico o neutro. Pues en los suelos pasa lo mismo, puede haber suelos ácidos, básicos o alcalinos y de pH neutro (Tabla 2.5.1).

Tabla 2.5.1 Clasificación de los suelos en función del pH

Valores de pH	suelos	Observaciones
Inferiores a 5.5	Fuertemente ácidos	Estériles o casi pobres
Entre 5.5 y 6	Ácidos	Muchos cultivos no se adaptan
Entre 6.1 y 6.6	Ligeramente ácidos	Algunos cultivos no se adaptan
Entre 6.7 y 7.3	Neutros	Los mejores
Entre 7.4 y 7.9	Ligeramente alcalinos	Se adaptan casi todos los cultivos
Entre 8 y 8.5	Alcalinos	Algunos cultivos no se adaptan
Superiores a 8.5	Fuertemente alcalinos	Pobres

¿A qué se debe eso?: A la mayor o menor proporción de iones H, o iones OH.

Si predominan los iones H el suelo tendrá un pH ácido, por debajo de 7 y si predominan los OH será básico. La concentración de iones hidrógeno a pH 7 es 0.0000001 moles por litro. Y a pH 6 es diez veces más, y a pH 5 es cien veces mayor que a pH 7.

Nosotros podemos describir la fuerza de un ácido usando una escala de pH de 0 a 14. Esta determinación es fácil de hacer en el laboratorio.

La acidez determina un amplio rango de características del suelo, tales como la proporción de cargas positivas y negativas, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y la liberación o secuestro de toxinas o metales.

El suelo puede llegar a convertirse en ácido a través de varios mecanismos, alguno de los cuales son naturales, como la acidez de los ácidos húmicos de la materia orgánica, y hay otros mecanismos artificiales como la contaminación que puede llegar a crear lluvia ácida y el exceso de abonos nitrogenados.

Los suelos agrícolas son susceptibles de acidificarse, debido a que los cationes básicos que son extraídos del suelo por las plantas no son devueltos a él, originando un empobrecimiento paulatino, además de los abonos a base de urea que acidifican el suelo y bajando su

productividad. De ahí que se requiera un manejo adecuado del suelo (Tabla 2.5.2).

Tabla 2.5.2 Producción de algunos cultivos en función del pH

cultivos	Producción media relativa al pH indicado				
	4.7	5.0	5.7	6.8	7.5
Maíz	34	73	83	100	85
Trigo	68	76	89	100	99
Avena	77	93	99	98	100
Cebada	0	23	80	95	100
Alfalfa	0	9	42	100	100
Soja	65	79	80	100	93

Es decir que la fertilidad de un suelo depende de la capacidad de ese suelo para suministrar elementos nutritivos a las plantas. Los iones adsorbidos se mantienen en el suelo porque no son arrastrados por el agua de percolación. Los suelos arenosos son poco fértiles y los arcillosos más, dependiendo de la clase de arcilla.

Resumiendo para incrementar la fertilidad de un suelo hay que aumentar la capacidad de adsorción del suelo y hay que suministrar cationes básicos. Lo primero se consigue con aportaciones de materia orgánica, y lo segundo mediante abonado.

Los puntos esenciales referentes a la acidez quedarían así resumidos (Figura 2.5.3).

1. Los rangos de pH de los suelos oscilan entre los valores extremos de 3.5 a 9. La mayoría de los suelos de cultivo presentan pHs entre 6.5 y 7.5

2. La acidez del suelo influencia un amplio rango de reacciones biológicas y químicas. Algunos elementos pueden quedar inmovilizados en función del pH. Y así presentar las plantas deficiencias. Así por ejemplo los aniones fosfatos son insolubles tanto a bajos como a altos pH.

3. Los nutrientes del suelo se pueden clasificar en dos grupos: macro y micronutrientes. Los más importantes macronutrientes son nitrógeno, fósforo y potasio, seguidos de calcio, magnesio y azufre. En cuanto los micronutrientes o microelementos : hierro, manganeso, zinc, cobre, molibdeno, boro y cloro

4. En la mayoría de los casos el nitrógeno del suelo está en forma orgánica (proteínas , aminoácidos) que no es asimilable por las plantas. La mineralización de ese nitrógeno orgánico da amonio y nitratos, absorvibles por las plantas. El amonio puede ser retenido por los coloides, pero el nitrato se lava fácilmente del suelo y si se echa en grandes cantidades puede contaminar las aguas.

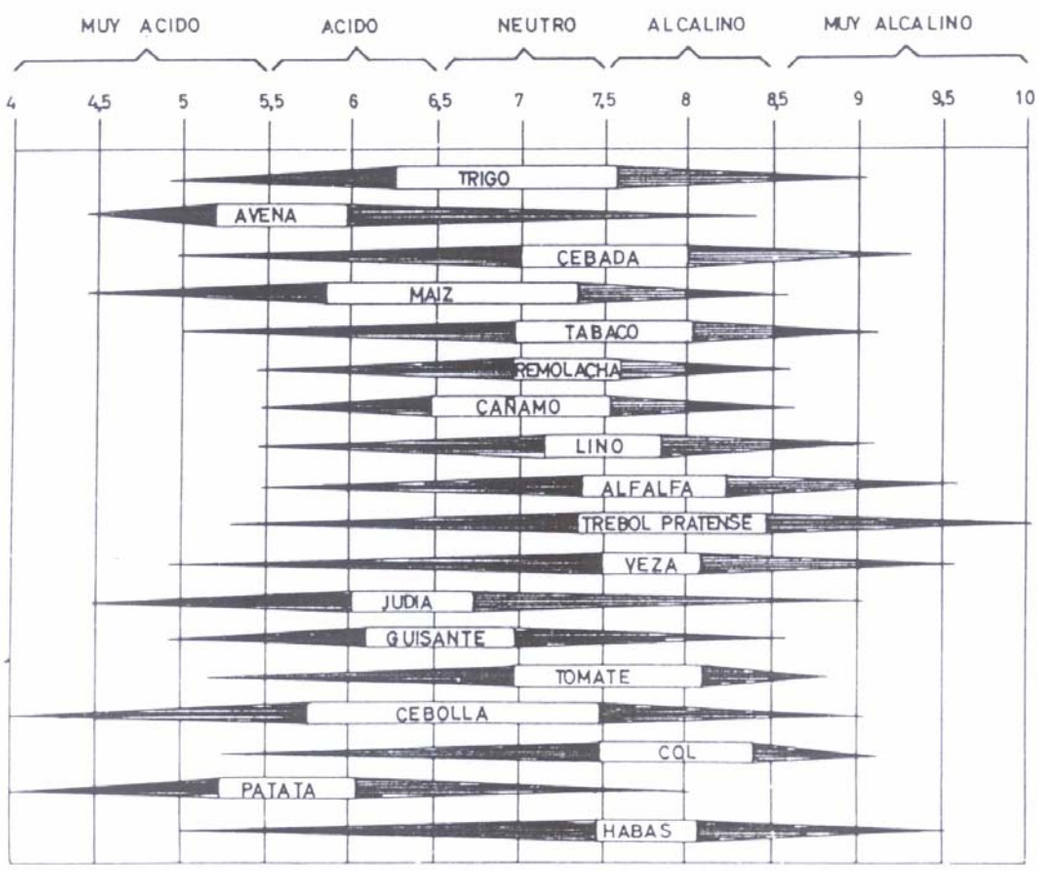


Figura 2.5.3. Valores de pH óptimos para algunos cultivos

Cómo se corrige la acidez

Como hemos dicho, los suelos ácidos contienen una cantidad considerable de cationes H. La acidificación puede deberse a causas

naturales (roca madre pobre en cationes básicos, lavado de iones en climas lluviosos) o provocada por el hombre (incorporación de residuos o fertilizantes ácidos, lluvia ácida causada por ciertas industrias.

La acidificación se dará en regiones de mucha pluviometría. En regiones semiáridas como la nuestra no hay problema con el calcio. En España los suelos ácidos predominan en las regiones húmedas (Asturias, Galicia) y también en el Oeste (Extremadura, Huelva), aunque en estas últimas regiones se debe a la naturaleza de la roca madre.

La sustitución de los cationes hidrógeno por cationes calcio se llama encalado o enmienda caliza. Los materiales empleados son: cal viva (óxido de calcio), cal apagada (hidróxido de calcio), caliza (carbonato de calcio), dolomita (carbonato de calcio y magnesio) etc.

La aplicación de estos productos se hace en épocas del año en que el suelo está sin cultivar, generalmente en otoño.

Hay que decir que toda la información anterior es muy sucinta y no representa una descripción detallada, por lo que puede quedar algún aspecto sin considerar.

3. EROSIÓN DE SUELOS

3.1 EROSIÓN DE SUELOS. GENERALIDADES

Interés por la erosión del suelo

Los procesos erosivos constituyen un impacto negativo sobre el medio ambiente, con el resultado de una degradación progresiva del recurso suelo, y a la postre de todo el entorno.

En el área mediterránea, para el desarrollo de la agricultura, tan indispensable resulta conservar el suelo como el agua. La conservación del suelo y del agua debe contemplarse como algo indisociable para poder asegurar un uso más eficiente del territorio.

Junto al conocimiento de los efectos desfavorables que producen los procesos erosivos, los mayores esfuerzos se centran hoy en diseñar estrategias de medida y predicción de la erosión (para conocer su alcance) y en experimentar sistemas de control y defensa.

En Agricultura la erosión se estudia y considera atendiendo a los factores hidrológicos, la cubierta vegetal, las características del suelo y a factores tecnológicos e incluso socio-económicos.

3.2 FASES DE LA EROSIÓN DEL SUELO

Cómo, merced a la erosión, las partículas y pequeños agregados del suelo son desprendidos y transportados

En la erosión ocurre en primer lugar un desprendimiento de las partículas individuales o pequeños agregados desde los agregados mayores que están presentes en la superficie del suelo (Figura 3.2.1). A continuación, las partículas individuales y/o pequeños agregados son transportados por los agentes erosivos (principalmente agua y aire) para finalmente ser depositados cuando la energía para el transporte no es suficiente.

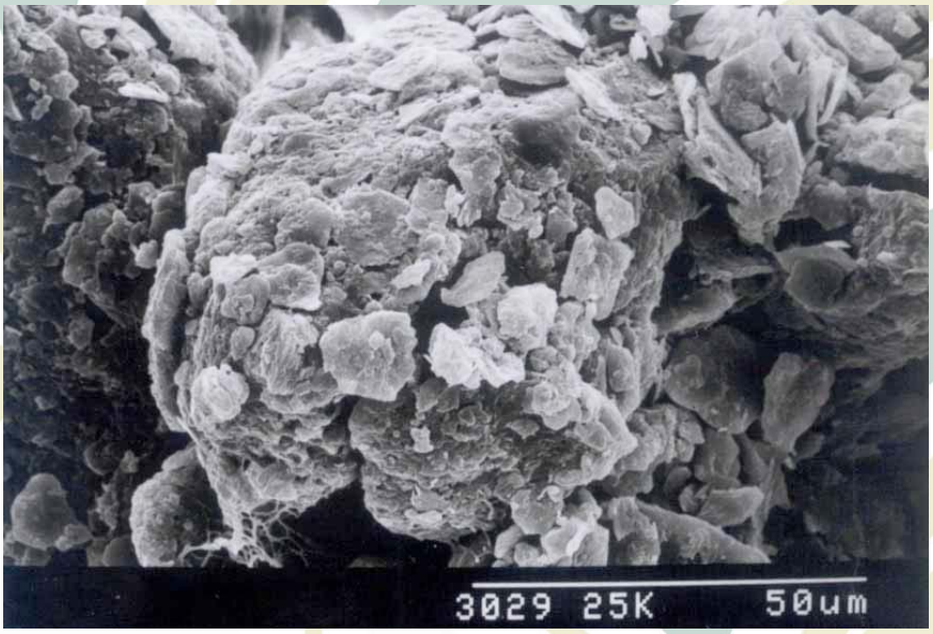


Figura 3.2.1. Agregado estructural de pequeño tamaño (50 micrómetros = 0,05 mm). En la erosión este agregado se desprende de los adyacentes o incluso sus partículas se despegan liberándose y movilizándose. Fotografía de microscopio electrónico

El desprendimiento citado puede ocurrir por:

1. Salpicadura, cuando una gota de agua de lluvia impacta contra el suelo (Figura 3.2.2). Es el agente más importante para el desprendimiento.

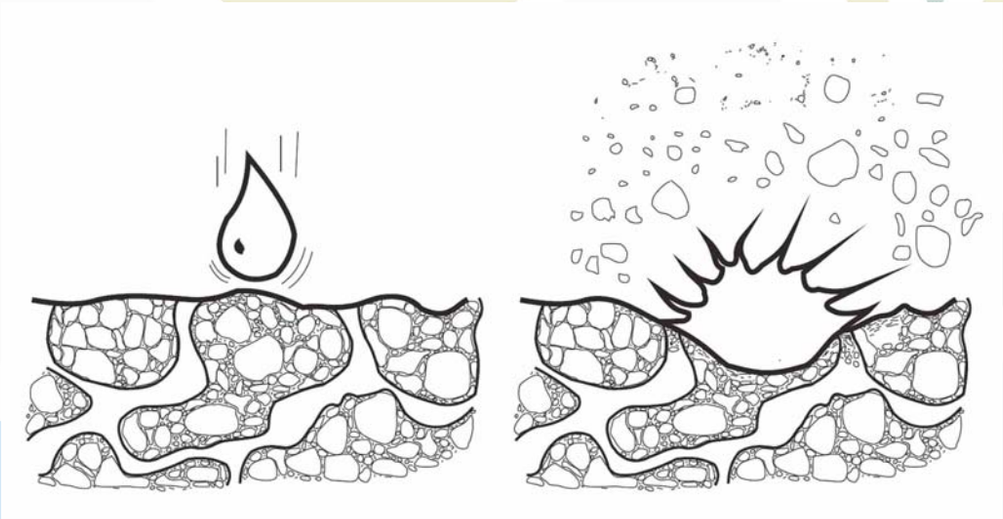


Figura 3.2.2 La gota de lluvia que impacta contra los agregados libera su energía rompiéndolos y esparciendo (salpicando) sus partículas, predisponiéndolas para ser arrastradas por el agua

2. Meteorización mecánica. Los ciclos de humectación-desecación, hielo-deshielo, las cuñas de hielo, o la termofracción, rompen los agregados liberando las partículas que los forman.

3. Las acciones humanas, principalmente el laboreo y el pisoteo de ganado rompen muchos agregados, predisponiendo las partículas a ser arrastradas (Figura 3.2.3).

4. Las corrientes de agua y viento. Los agregados pueden romperse gracias a la escorrentía superficial (generada por la lluvia o un exceso de riego) y el viento racheado. En ambos casos el desprendimiento es más efectivo si lleva el agente partículas en suspensión, impactando éstas sobre los agregados (efecto abrasivo).

En el transporte, los agentes actúan superficialmente bien removiendo un espesor más o menos uniforme de suelo (en la salpicadura, por la escorrentía superficial, o por el viento), o bien su acción se concentra en cauces, apareciendo en este último caso los denominados surcos (o regueros) y las cárcavas (y barrancos).

La distinción práctica entre surcos y cárcavas se realiza en base a su permanencia con el laboreo: los surcos desaparecen al ser labrado el suelo, mientras que las cárcavas permanecen o impide el paso de la maquinaria.

Una combinación muy letal en este proceso es la denominada erosión entre surcos, donde se la acción de la salpicadura encuentra un flujo laminar que traslade a las partículas a un surco próximo.

Hemos descrito la acción en la erosión del agua y del aire. Cuando predomina el agua la erosión se denomina HÍDRICA. Si el agente que produce el desprendimiento y el transporte es el viento la erosión se denomina EÓLICA.

Figura 3.2.3. Terrones originados por el laboreo. Sin vegetación superficial, la gota de lluvia impactará directamente contra ellos.

3.3 BASES HIDROLÓGICAS DE LA EROSIÓN

Generalidades sobre la erosión hídrica

La EROSIÓN HÍDRICA se relaciona con el balance hídrico del suelo (Figura 2.3.2), con los posibles aportes y caminos que puede tener el agua.

¿Y qué es dicho balance?

1. El agua de precipitación llega directamente al suelo o bien es interceptada por las plantas. Ésta última o bien se evapora, o constituye los que se denomina drenaje foliar (responsable también de erosión por salpicadura bajo la copa del árbol o planta), o bien fluye por los tallo hacia el suelo.

2. Una vez el agua en el suelo, ésta o se evapotranspira, o se infiltra en el suelo (recargando la reserva subterránea) o fluye superficial o hipodérmicamente cuando se supera la capacidad de infiltración.

La infiltración de agua en el suelo viene condicionada por los siguientes factores:

1. Características del suelo: conductividad hidráulica, estructura, capacidad de reserva de agua, estado de la superficie (sellado superficial, pedregosidad, "mulches", etc.), contenido anterior de humedad, aire atrapado.

2. Características del agua: contenido de partículas en suspensión y salinidad, principalmente.

3. Características de la lluvia o riego: intensidad, tamaño de la gota.

4. Características del medio: pendiente de la ladera, densidad y tipo de vegetación.

Intervenciones humanas: laboreo reciente, pisoteo por ganado, compactación por maquinaria y labores agrícolas.

El comportamiento de un suelo frente a la fracción de agua infiltrada es, como hemos visto, complejo, depende de muchos factores. Condiciona la existencia de las proporciones de agua de escorrentía superficial.

Si la intensidad lluvia es menor que la capacidad de infiltración, no se produce escorrentía.

Si la intensidad lluvia es mayor que la capacidad de infiltración, se produce escorrentía.

La escorrentía está también controlada por la reserva del suelo, produciéndose cuando el suelo no es capaz de almacenar toda el agua ni de drenarla interiormente.

LA ESCORRENTÍA ES LA FRACCIÓN DEL AGUA, QUE LLEGA AL SUELO DESDE LA ATMÓSFERA, RESPONSABLE DE LA EROSIÓN HÍDRICA.

3.4 TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA

Erosión por salpicadura

Es la erosión por la caída de las gotas de lluvia.

Cuando una gota de agua de lluvia impacta contra el suelo se comporta como un proyectil, libera su energía cinética destruyendo los agregados y lanzando sus partículas por los aires a varios centímetros de distancia (Figura 3.2.2).

La energía cinética de la lluvia para desprender las partículas por salpicadura es mínima en partículas (o agregados) de 0.125 mm de diámetro (arena fina), siendo el rango de tamaños más vulnerable para esta erosión el comprendido entre 0.063 y 0.250 mm.

La erosión por salpicadura se produce en suelo desnudo, es decir, sin vegetación. Por ejemplo, en el olivar después de arado, cuando el suelo está desnudo.

Las copas de los árboles protegen al suelo de la salpicadura hasta que aparece el drenaje foliar (ejemplo: ha llovido tanto que el agua ha calado dentro de la copa del olivo).

El efecto de la gota de lluvia es doble:

Provoca, como hemos descrito, la destrucción de los agregados, aunque sólo afecta a los más superficiales (bajo la costra permanecen intactos). La saturación de agua previa al impacto reduce la cohesión de las partículas del agregado, favoreciendo su destrucción

Provoca consolidación (compactación): forma una costra superficial, de pocos milímetros de espesor, donde se reduce el espacio poral tanto por la compactación como por el relleno de los poros superficiales por las partículas que fueron lanzadas por los aires. Todo ello reduce la velocidad de infiltración y favorece la escorrentía.

Se pueden distinguir dos tipos de costras:

1. Costra estructural: formada in situ, en la que las partículas proceden de las proximidades.

2. Costra deposicional: formada por sedimentación de partículas finas en charcos (microdepresiones). Este tipo es equiparable, por ejemplo, a la costra formada en las pozas construidas junto al tronco de los olivos para la retención de agua.

Existen diferencias en la velocidad de infiltración, dependiendo del tipo de costra. Sirva el siguiente ejemplo de un suelo de textura franca:

Tipo de superficie	Velocidad de infiltración (mm/h)
sin costra	45
con costra estructural	6
con costra deposicional	1

La susceptibilidad a formar costra superficial disminuye con el incremento del contenido de arcilla (los suelos francos y franco arenosos son muy susceptibles) y con el aumento del contenido en materia orgánica. Ambos componentes aumentan la estabilidad estructural.

Erosión por flujo laminar (superficial)

Se produce en una tormenta o en un riego excesivo, cuando las cantidades de agua aportadas al suelo son tales que se supera la capacidad de almacenaje; bien porque el suelo está ya saturado en agua o porque la velocidad de infiltración se ve superada por la intensidad de la lluvia.

El flujo presenta una forma anastomosada (canalillos entrecruzados), sin canales marcados. No se trata de una lámina, como se desprendería de su nombre (Figura 3.4.1).

Figura 3.4.1. Evidencias de erosión laminar. Las piedras de la superficie de este suelo no han podido movilizarse por el agua superficial, pero sí las partículas más finas.

El flujo sólo se interrumpe por los obstáculos que encuentra en su recorrido: fragmentos gruesos y tallos de la vegetación.

Para que se produzca el desprendimiento de partículas, la fuerza del flujo debe ser mayor a las fuerzas estructuradotas dentro del suelo. Esto va a depender de la velocidad del mismo, siendo mínima para las partículas con tamaños comprendidos entre 0.1 y 0.3 mm (tamaño arena).

La erosión por flujo superficial se refuerza con el impacto de las gotas de lluvia, aportando partículas que incrementan la carga de sedimentos y potencian el efecto abrasivo del flujo.

El flujo laminar puede terminar formando regueros.

Erosión en regueros (también llamados surcos)

Es la erosión que produce y progresa a través de acanaladuras bien definidas sobre la superficie del suelo. Su profundidad, no obstante,

debe ser suficientemente pequeña para ser borradas por el arado convencional (Figura 3.4.2).

Figura 3.4.2. Regueros en un suelo de olivar

Los regueros se inician a una distancia crítica de la ladera.

Se originan por convergencia de micro-regueros derivados del flujo superficial. Una vez formados se produce una migración doble:

1. Ascendente, por retroceso de la cabecera del reguero (acción remontante).

2. Descendente, cuya acción erosiva dependerá de la fuerza cortante del flujo y de la resistencia del suelo.

La erosión en regueros no es selectiva respecto al tamaño de las partículas, pudiendo arrancar y transportar fragmentos de incluso 9 cm de diámetro.

Erosión en cárcavas

Las cárcavas son cursos de agua, relativamente permanentes en el tiempo, de gran profundidad y poca anchura, con diferentes resaltos a lo

largo de su recorrido, y con gran capacidad erosiva y de transporte de sedimentos. Son de tamaño tal que no pueden ser atravesadas por la maquinaria de labranza (Figura 3.4.3).

Figura 3.4.3 Cárcavas de pequeño tamaño en un suelo de olivar abandonado.

Estas morfologías están asociadas a procesos de erosión acelerada.

(Se entiende por EROSIÓN ACELERADA la provocada por las acciones del hombre).

Se originan por un exceso de agua motivada por:

1. Aumentos de precipitación (en un cambio de clima, por ejemplo).

2. Reducción de cubierta vegetal (por quemas, deforestaciones, sobre-pastoreo, etc.) reducción de la capacidad de reserva y de infiltración del suelo (por degradaciones físicas previas o por reducción del espesor del suelo).

3. 5. ESTIMACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN: USLE

La forma más popularizada de calcular las pérdidas por erosión hídrica

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es el modelo matemático más utilizado para predecir las pérdidas del suelo debidas a la erosión hídrica superficial.

El modelo es paramétrico (depende de varios parámetros), y para predecir la erosión potencial se toman en consideración los siguientes factores:

A = R x K x LS x C x P

donde:

A= pérdida de suelo por unidad de superficie. Se obtiene por el producto del resto de los factores. Se expresa en Toneladas / Hectárea / año.

R= erosividad de la lluvia. Indica la energía cinética de la lluvia al caer.

K= factor erosionabilidad del suelo. Expresa la susceptibilidad del suelo a erosionarse. Es función de las siguientes propiedades del suelo: textura, contenido de materia orgánica, estructura, velocidad de infiltración, conductividad hidráulica (entre otras características edáficas).

LS= factor longitud-inclinación de la ladera. Recoge los efectos combinados debidos a las características fisiográficas de la ladera.

C= factor cultivo. Indica el efecto de la vegetación y cultivo en la pérdida anual de suelos. El valor no es constante a lo largo del año.

P= factor prácticas de conservación. Incorpora la eficacia en disminuir las pérdidas de suelo que presentan las diferentes técnicas de conservación. Las técnicas más usuales son el laboreo a nivel, el cultivo a nivel en franjas alternantes, las terrazas y los canales encespedados.

3.6. CONSERVACIÓN DEL SUELO FRENTE A LA EROSIÓN

Algunas medidas posibles contra la erosión

La lucha contra la erosión en los suelos de cultivo en general se puede desglosar en:

1. Cultivo en contorno: consiste en realizar las operaciones de labranza siguiendo las curvas de nivel (contorno del terreno) para evitar la erosión hídrica, o de perpendicularmente a la dirección del viento para la eólica. En la hídrica reduce la escorrentía, impidiendo la formación de surcos; su uso está limitado en pendientes demasiado escarpadas (mayor escorrentía, y puede volcar la maquinaria), en suelos con alta erosionabilidad, o cuando la lluvia es demasiado intensa.

2. Cultivo en fajas: consiste en sembrar fajas alternantes de diferentes cultivos (o altenando con la vegetación natural). Las fajas deben seguir el contorno para evitar la erosión hídrica (Figura 3.6.1), o ser transversales a la dirección habitual del viento en la erosión eólica. La anchura de la faja debe ser múltiplo de la anchura del apero de labranza más empleado.

Figura 3.6.1. Fajas de vegetación en calles de olivar, dispuestas paralelamente a las curvas de nivel.

3. Terrazas: son canales anchos, generalmente planos, perpendiculares a la línea de máxima pendiente. Su efecto es reducir la longitud de la parte inclinada de la ladera (Figura 3.6.2). Debido a su alto coste, deben realizarse cuando fracasen el resto de medidas de conservación.

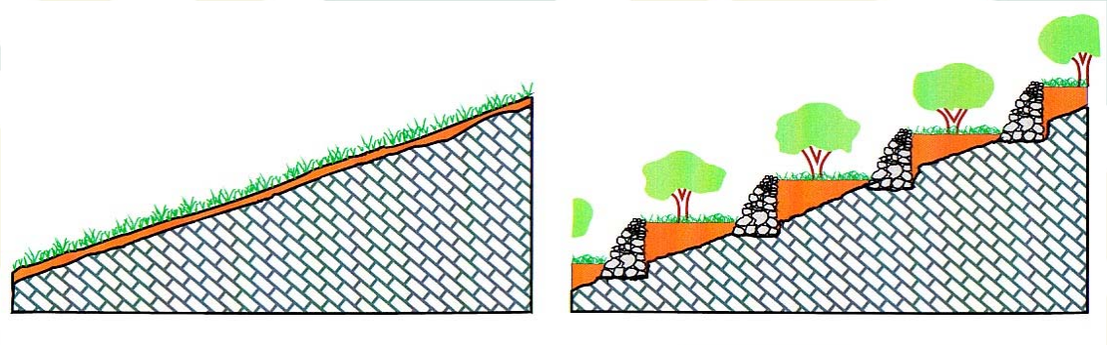


Figura 3.6.2. Creación de un sistema de terrazas: la pendiente de la ladera queda minimizada a sectores planos, evitando así el efecto devastador de la erosión

4. Canales con vegetación (gavias o colectores): son canales anchos y encespedados, poco profundos, que corren de forma descendente por la pendiente. Transportan el exceso de agua de forma segura, evitando la formación de cárcavas, colectando agua del cultivo en curvas a nivel o desaguan en cultivos de terrazas.

5. Métodos de labranza: en general se utilizan métodos que generen una buena cubierta vegetal y que eleven la capacidad de infiltración de agua en el suelo. De este modo se evita el impacto de la gota de lluvia y se reduce la escorrentía superficial.

Para evitar la erosión eólica: además de los citados, se instalan pantallas cortavientos de árboles y arbustos que reduzcan la velocidad del viento.

Los filtros orgánicos a base de fibras vegetales son los métodos de frenar la erosión que ofrece el proyecto Life-Eutromed.

Seminario Diciembre 2012

LOS RECURSOS HÍDRICOS Y SU UTILIZACIÓN

(Con especial atención a las aguas subterráneas y su uso para el regadío)

Prof. José Benavente

Instituto de Investigación del Agua

Universidad de Granada

Los recursos hídricos

En general, aunque particularmente en las actividades económicas, se denomina **recurso** a todo aquello que satisface una determinada necesidad humana. De ahí deriva, por ejemplo, el uso de los términos "recursos energéticos" o "recursos mineros". Estos últimos, en particular, son recursos "no renovables". Así, una mina de carbón contiene una determinada cantidad de mineral; una vez consumada su explotación, el recurso se agota, pues no se regenera a escala humana. Este no es el caso, por ejemplo, de los recursos forestales, pues de la madera de un bosque, si se sabe programar su explotación con criterios racionales, se puede obtener un aprovechamiento prácticamente permanente. Lo mismo ocurre con el uso de la mayoría de las aguas continentales (recursos hídricos), las cuales cubren una serie de necesidades (abastecimiento humano, regadío, uso industrial, etc.). Como el caso de la explotación maderera, son un ejemplo de recursos renovables. Sin embargo, como más adelante se comentará, a esta circunstancia general no se ajusta el uso intensivo que en algunas regiones del mundo (también en España) se hace de las aguas subterráneas.

Recursos hídricos superficiales

Todos estamos familiarizados con el agua superficial que fluye por los cauces de los ríos y arroyos o la que discurre por regueros en las vertientes montañosas tras las lluvias de cierta intensidad.

El aprovechamiento de estas aguas para los usos principales –abastecimiento humano y regadío- se hace desde tiempo inmemorial derivando parte del caudal de los ríos y arroyos mediante pequeñas presas o azudes. Luego se transportan a los puntos de aplicación o de consumo mediante conducciones de diferentes tipos: acequias, canales, tuberías a presión, etc.

Cuando el caudal de los ríos es irregular, como ocurre en la mayor parte de España debido al clima mediterráneo, su aprovechamiento se optimiza con los embalses de regulación. Se pretende con estas infraestructuras almacenar agua en los periodos en que las aportaciones son mayores y la demanda es menor (invierno); luego, en los meses de verano, cuando apenas hay precipitaciones y la demanda de agua (por ejemplo, para riegos) es mayor, se puede disponer de caudales superiores a los que el río tendría en condiciones naturales.

Las aguas superficiales circulan a velocidades relativamente altas, del orden del metro por segundo, de manera que arrastran consigo pequeñas partículas del terreno (limos y arcillas) y por eso presentan una cierta turbidez. En casos extremos, como sucede tras precipitaciones intensas, todos constatamos como los ríos en crecida transportan aguas que recuerdan más bien a flujos de barro. Si el agua se pretende destinar al abastecimiento humano, esta turbidez es un inconveniente y debe eliminarse. Así, una parte significativa de los costes de las estaciones potabilizadoras de aguas superficiales se invierte en tratamientos para quitarles la turbidez mediante decantación y filtración.

Para el riego tradicional, sin embargo, la turbidez del agua no se ha considerado nunca como un problema. Antes bien, los agricultores agradecían que las parcelas se inundasen con aguas cargadas de légamo, preferentemente con altos niveles de materia orgánica, lo cual tenía consecuencias muy beneficiosas para la fertilidad de los suelos.

Recursos hídricos subterráneos

Hay otras aguas en el interior de los continentes que, por el contrario, carecen típicamente de turbidez. Encontramos tales aguas en los manantiales y en los bombeos que se hacen en ciertas obras denominadas captaciones (pozos, sondeos, etc.). Son las aguas subterráneas.

En muchos países del mundo, las aguas subterráneas son utilizadas de manera casi exclusiva para el abastecimiento humano, con lo que se ahorran los costes derivados de la eliminación de la turbidez, pues estas aguas vienen ya filtradas de manera natural. En España, sin embargo, se usan para este fin tanto las aguas superficiales como las subterráneas. En los riegos tradicionales también predominan las aguas procedentes de los ríos, aunque en los últimos cincuenta años la situación ha cambiado, seguramente como consecuencia de que ya prácticamente se ha alcanzado un límite en la disponibilidad de recursos superficiales. Así, el gran desarrollo reciente de la agricultura en el levante y sureste español y en buena parte de Andalucía (riego en cultivos bajo plástico y en el olivar), asociada a la cual se viene generando una actividad económica relativamente dinámica, se ha basado en la explotación de las aguas subterráneas.

El conocimiento de los recursos subterráneos, de su ámbito de aparición y de las particularidades de su explotación es comparativamente muy inferior al de los recursos superficiales. Por ello, en este texto, como se indica en su título, se prestará una especial atención a las aguas subterráneas. Más adelante se aclarará, sin embargo, que esta distinción es artificial, pues se trata de las mismas aguas, con un origen común y un destino similar, tan sólo ocurre que sus tiempos de residencia en los continentes son muy distintos. No obstante, es pertinente reconocer que, en la prospección de las aguas subterráneas, existen todavía reminiscencias de prácticas antiguas cargadas de empirismo, algunas de las cuales, incluso, hacen pensar en un carácter casi mágico de su conocimiento, como se desprende de los usos (casi ritos, en ciertos casos) que despliegan los zahoríes, con sus péndulos, varitas y demás parafernalia más o menos ocultista. Estos hechos contrastan con el creciente desarrollo de una disciplina marcadamente cuantitativa- la Hidrogeología- que se ocupa del conocimiento científico de las aguas subterráneas.

El ciclo hidrológico

Como se acaba de citar, ambas aguas continentales, superficiales y subterráneas, tienen el mismo origen- las precipitaciones- y el mismo destino final- el océano-. Desde los océanos las aguas vuelven a los continentes –tras haber experimentado evaporación y luego condensación en forma de nubes- por medio de las precipitaciones (lluvia, nieve). El agua de las precipitaciones alcanza el suelo y discurre de nuevo hacia el océano, ya sea de forma relativamente rápida por la superficie del terreno, o de forma relativamente lenta por el subsuelo, o por ambas vías, pues son frecuentes los casos en que las aguas subterráneas afloran (manantiales) o los de ríos y arroyos cuyas aguas se infiltran total o parcialmente bajo el terreno. Así se cierra el ciclo del agua, también llamado ciclo hidrológico. A continuación se detallará algo más sobre las aguas subterráneas y sobre los terrenos que las contienen.

Los acuíferos

Un acuífero es una formación geológica que tiene la capacidad de almacenar agua y de transmitirla (hacia los manantiales y las captaciones) de manera eficiente. Para ello es condición obligatoria que los materiales geológicos no sean compactos o macizos, sino que presenten un cierto desarrollo de poros, huecos o fisuras que puedan albergar el agua. Unas veces estos poros en las rocas son visibles claramente (foto 1), pero en la mayoría de los casos son de un tamaño tal que sólo resultan apreciables con lupa o microscopio. En el otro extremo están ciertas rocas, que los geólogos llaman “kársticas”, que desarrollan huecos muy grandes, como los que reconocen los espeleólogos en sus exploraciones subterráneas (foto 2). Algunos manantiales relativamente caudalosos surgen en relación con cuevas y cavidades que constituyen la salida al exterior de redes espeleológicas de cierta entidad.

Foto 1. Ejemplo de porosidad de una roca. Corresponde a una lava de la isla de El Hierro (Canarias)

Foto 2. En los acuíferos calcáreos, como es el caso de las calizas que ocupan buena parte de la península de Yucatán (México), se pueden encontrar grandes cavidades formadas por disolución ("karstificación") de la roca. En esta foto se aprecia una de estas cavidades, parcialmente llena de agua subterránea, usada a modo de piscina.

La ciencia que estudia las aguas subterráneas es, como ya se ha citado, la Hidrogeología. Entre otros aspectos, los hidrogeólogos se ocupan de explicar el porqué de la aparición de los manantiales en tal o cual enclave, al tiempo que conocen los criterios a seguir para localizar la ubicación de captaciones en los puntos más favorables.

La naturaleza genera una notable variedad de acuíferos. Muchos de los macizos montañosos que rodean Granada, con la excepción significativa de Sierra Nevada, son acuíferos desarrollados en rocas calcáreas karstificables (calizas y dolomías: figura 1 y fotos 3 y 4). Los hay también en zonas de relieve suave, como es el caso destacable de la Vega de Granada, integrado por aluviones (gravas, arenas, limos y arcillas en proporciones variables depositados por el río Genil y sus principales afluentes: figura 2 y foto 5).

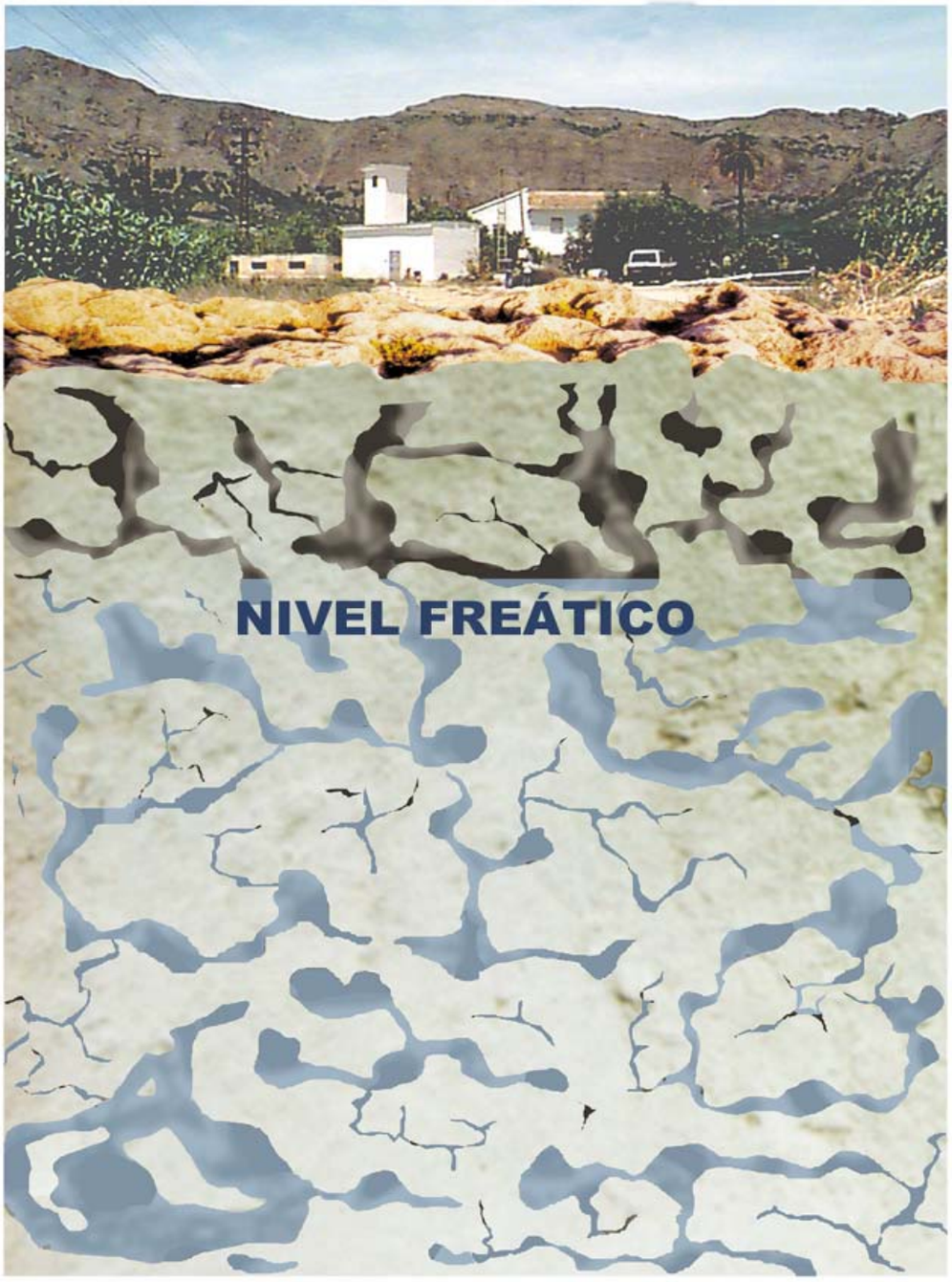


Figura 1. Esquema de un acuífero desarrollado en rocas karstificadas. La superficie freática constituye el límite superior de la parte del acuífero en que todos los huecos o poros están saturados de agua. Algunos huecos pueden, incluso, tener un tamaño que los haga penetrables (comparar con fotos 1 y 2) (tomada de López Geta et al., 2001).

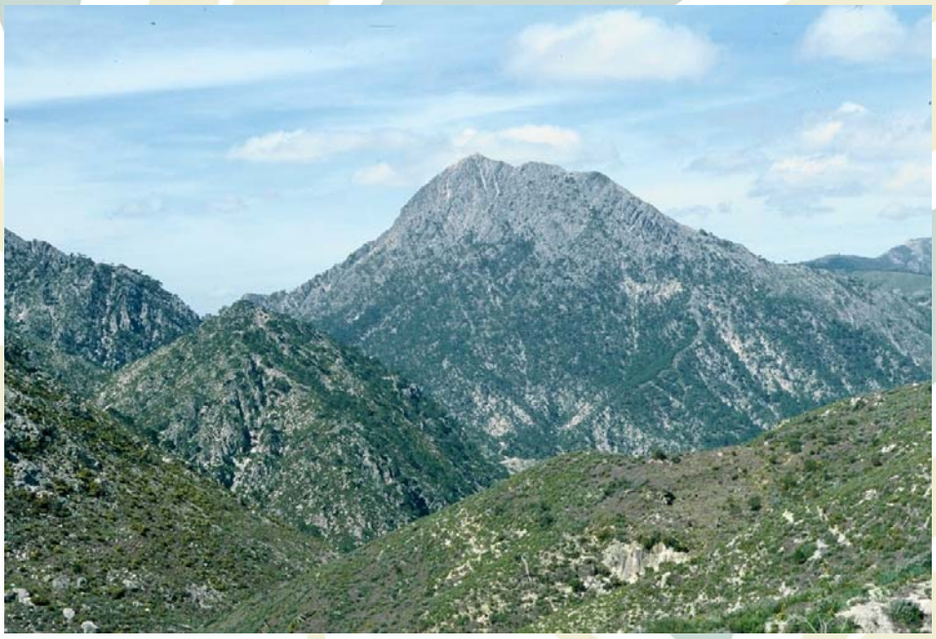


Foto 3. Pico de El Lucero, en el Parque Natural de las Sierras de Tejeda, Almijara y Alhama. La mayoría de este espacio protegido, que se reparte entre las provincias de Granada y Málaga, está formado por materiales calcáreos acuíferos drenados por una serie de manantiales localizados en sus bordes.

Foto 4. Llano de Zafarraya (Granada). Es una zona de gran productividad agrícola gracias al regadío con aguas subterráneas que se extraen de materiales calcáreos karstificados como los que se aprecian en primer término. Al fondo, cubiertas por nubes, están las elevaciones de Sierra Tejeda, en el límite entre las provincias de Granada y Málaga. En uno de los extremos del Llano existen sumideros por los que desaparece el principal curso de agua que drena la zona, el río de La Madre.

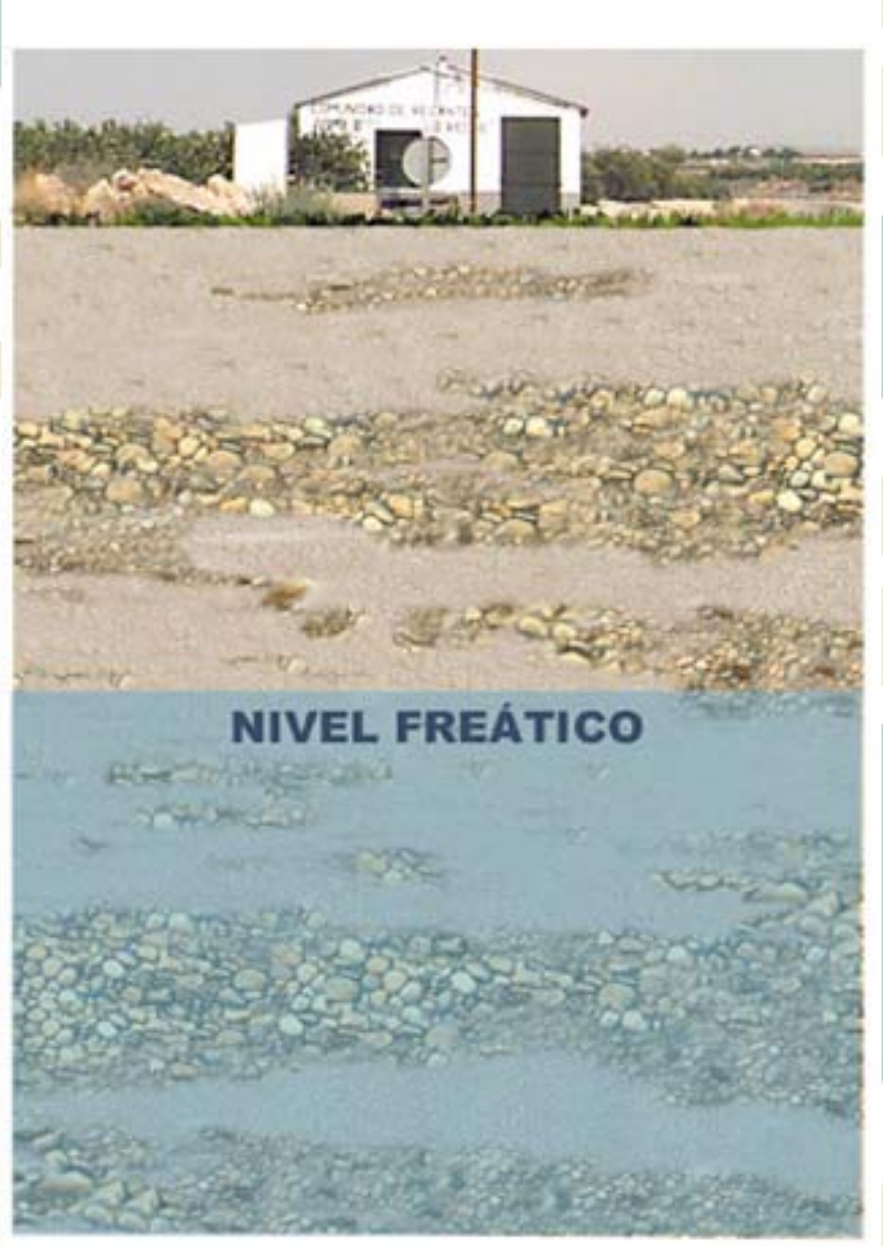


Figura 2. Esquema de un acuífero desarrollado en materiales detríticos (gravas, arenas y limos). La superficie freática constituye el límite superior de la parte del acuífero en que todos los huecos o poros están saturados de agua. Los huecos que albergan el agua son de tamaño microscópico (comparar con la figura 1) (tomada de López Geta et al., 2001).

Foto 5. Detalle de la Vega de Granada, zona de regadío tradicional con aguas de superficie del río Genil y sus afluentes complementado con bombeos del acuífero, integrado por aluviones que, en el sector de la foto, pueden tener más de 250 m de espesor.

Por el contrario, existen materiales geológicos que ni almacenan ni transmiten agua de manera significativa. Un ejemplo puede ser un granito "sano", es decir, sin alterar ni fracturar, o cualquier otra roca compacta en esas condiciones. Las formaciones arcillosas o margosas, relativamente abundantes en la naturaleza, constituyen un caso particular en lo que respecta a sus propiedades hidrogeológicas, pues aunque almacenan agua no la transmiten eficientemente. Ello se debe al tamaño extremadamente pequeño de las partículas de arcilla y de los poros que determinan.

Rocas compactas sanas y formaciones arcillosas son ejemplos de materiales geológicos de carácter prácticamente impermeable (foto 6). La permeabilidad es la propiedad que refleja la facilidad con la que el agua fluye a través de los materiales.

Para que un acuífero actúe como un almacén efectivo de agua subterránea es necesario que en su base disponga de un nivel impermeable, cuyo efecto es evitar que el agua circule más hacia abajo por efecto de la gravedad. Se genera así una especie de embalse subterráneo en el que todos los poros están completamente llenos de

agua. Esta agua no está quieta, sino que, según se ha dicho, se desplaza. La particularidad es que su movimiento se efectúa a una velocidad bastante lenta, muy inferior a la de las aguas de superficie (regueros, ríos, arroyos) antes mencionadas.

Foto 6. Embalse de El Negratín (Granada), situado sobre materiales arcillosos, muy poco permeables, como los en primer plano, que aseguran su estanqueidad.

Un ejemplo sencillo, pero también muy frecuente, de funcionamiento de un acuífero, empieza por la infiltración del agua (de precipitación o de riego) en la superficie del terreno; luego el agua circula verticalmente a través del terreno hasta alcanzar una cierta profundidad, por debajo de la cual todos los poros, están completamente llenos ("saturados") de agua. El límite superior de esta zona saturada es la superficie freática (foto 7). Luego el agua circula, casi horizontalmente y a velocidad muy pequeña, en el seno de la zona saturada de los acuíferos hacia los manantiales, hacia otros acuíferos adyacentes o hacia las captaciones.

En estos casos, cualquier excavación o perforación que alcance la superficie freática y profundice más o menos bajo ella encontrará el agua subterránea y, podrá sacarla ("alumbrarla") a superficie.

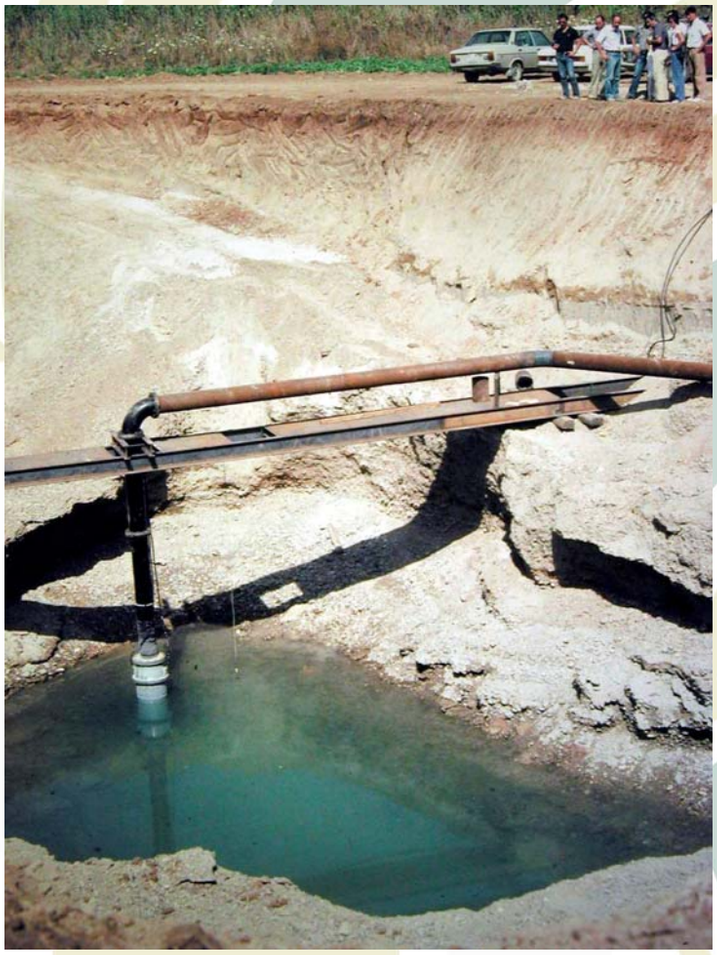


Foto 7. Detalle de una excavación en aluviones del Guadalquivir cerca de Sevilla. La superficie del agua corresponde a la superficie freática del acuífero, integrado por arenas y gravas. La bomba permite la extracción de agua con facilidad, al ser materiales muy permeables. (Comparar con la figura 2).

Cuando los acuíferos se encuentran intercalados ("confinados") entre dos capas impermeables, resultan parecidos a conductos sometidos a una cierta presión. En las perforaciones que los atraviesan se puede apreciar el fenómeno llamado artesianismo, que es el ascenso del agua por encima del límite superior del acuífero, pudiendo llegar incluso a ser surgentes, es decir, a que el agua fluya por encima de la boca sin necesidad de equipos de elevación (fotos 8 y 9).

Foto 8. Rambla cerca de Albuñol (Granada). Dos perforaciones -de un centenar de metros de profundidad- captan un acuífero calcáreo confinado en las cuales se presenta el fenómeno del artesianismo.

Foto 9. Sondeo de captación al sur de Jaén que resultó artesiano. Nótese la gran piedra que los operarios hubieron de colocar sobre la tapa para contrarrestar la presión ascendente del agua. Al fondo puede verse la máquina de perforación (por percusión) y a la izquierda una de las herramientas de corte (trépanos, véase también la figura 3).

Relaciones entre aguas superficiales y subterráneas

La distribución en una determinada extensión de terreno de afloramientos de materiales permeables (acuíferos) e impermeables es la base para explicar una serie de circunstancias hidrológicas fácilmente perceptibles, como pueden ser la importancia relativa de las aguas superficiales respecto a las subterráneas, la abundancia de captaciones, la presencia o ausencia de manantiales y la localización y características de éstos.

Debe recordarse que, cuando el agua de precipitación alcanza la superficie del terreno, hay una fracción que vuelve a la atmósfera en estado gaseoso por efecto de la evaporación y la transpiración de las plantas. El agua restante –también llamada precipitación efectiva- puede seguir dos caminos diferentes: fluir superficialmente o infiltrarse a cierta profundidad dentro del terreno. El que siga un camino u otro vendrá determinado principalmente por la naturaleza del terreno.

De acuerdo con lo anterior, en terrenos con predominio de materiales impermeables, la fracción mayoritaria de la precipitación efectiva corresponde al flujo superficial. Como es bien conocido, estas aguas siguen los desniveles topográficos, primero de manera difusa y luego canalizada (cauces de arroyos y ríos, cada vez de mayor entidad), hasta llegar, en el caso general, al mar. Por el contrario, en materiales de elevada permeabilidad, una fracción mayoritaria de la precipitación efectiva se infiltra, por lo que no generará apenas cursos de agua superficial.

Determinar la dirección y el sentido del agua subterránea es una tarea mucho más compleja que en el caso de las aguas superficiales, donde básicamente sólo se requiere disponer de un mapa topográfico. En los acuíferos se necesitan los datos ofrecidos por los piezómetros, que son unas perforaciones específicamente adaptadas para medir la profundidad del nivel del agua subterránea (foto 10). Con esa información es posible confeccionar mapas de la superficie piezométrica, a partir de los cuales se puede saber la dirección del agua subterránea y conocer las zonas más o menos permeables dentro de un mismo acuífero.

Foto 10. Piezómetro en granitos alterados cerca de Linares (Jaén). Nótese el diámetro relativamente reducido de la perforación. El aparato que hay al lado es un hidronivel para determinar la profundidad del nivel de agua en el interior del piezómetro.

En los párrafos anteriores se ha tratado el importante concepto de unicidad de las aguas dentro del ciclo hidrológico. Ya se ha dicho que las aguas subterráneas retornan usualmente a la superficie y forman una parte significativa del caudal de los ríos. También los caudales fluviales pueden infiltrarse y recargar a los acuíferos. Así pues, las aguas superficiales y subterráneas son un mismo recurso que utiliza diferentes caminos en su ciclo desde la atmósfera hasta el océano.

Existe, sin embargo, una diferencia muy importante según el camino que se considere, y es la velocidad a la que el agua fluye, mucho menor en el caso de las aguas subterráneas (del orden del metro por día o inferior). Si se considera como "edad" de una gota de agua el tiempo transcurrido desde que alcanzó el terreno en forma de precipitación, se puede comprender que –para las gotas que únicamente han circulado en superficie- su edad suele ser de pocos días. Por el contrario, si la gota ha recargado un acuífero y luego ha circulado en su seno para salir por un manantial o una captación, no es raro que su edad sea de decenas de años (a veces mucho más).

Lo anterior explica por qué tras varios meses sin precipitaciones en un área los ríos mantienen caudal circulante (excluyendo, lógicamente, el efecto de actividades humanas como trasvases o desembalses en las cuencas), pues ese caudal, llamado "caudal de base", procede del drenaje de acuíferos. Esta circunstancia es trascendental en periodos de sequía.

A tenor de lo que se acaba de explicar, puede comprenderse que en extensos territorios de Andalucía- como, por ejemplo, en la campiña del Guadalquivir o en Sierra Morena- sea difícil identificar manantiales caudalosos o captaciones de cierta entidad, debido al predominio de afloramientos de carácter impermeable: formaciones arcillosas, en el primer caso, y de pizarras y rocas graníticas en el segundo. Sin embargo, la densidad de diferentes manifestaciones de aguas superficiales (ríos, arroyos, lagunas y embalses) será relativamente alta en tales terrenos. Por el contrario, un recorrido por la comarca del Poniente almeriense pondrá de manifiesto un número muy elevado de sondeos de captación, testimonio de que bajo el terreno existen extensos acuíferos que son objeto de explotación. Del mismo modo, unos itinerarios a lo largo de buena parte de la Serranía de Ronda o de los parques naturales de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas o de las Sierras Subbéticas, por citar sólo unos ejemplos, permitirán apreciar paisajes sin apenas drenaje superficial, caracterizados por formas del modelado (dolinas, simas, sumideros) que son testimonio de la rápida y eficaz incorporación subterránea del agua de precipitación (foto 11).

Al descender a los bordes de tales macizos montañosos será frecuente constatar la aparición de las aguas subterráneas en puntos muy localizados, en forma de manantiales relativamente caudalosos.

Foto 11. El Torcal de Antequera (Málaga) es un espectacular ejemplo de macizo kárstico. En su interior no existen arroyos ni drenaje superficial, debido a la morfología subhorizontal de las rocas calcáreas y a su elevada permeabilidad. Toda el agua de precipitación que no se evapotranspira se invierte en recargar al acuífero y luego surge en un importante manantial, del que se abastece Antequera.

Entradas y salidas de agua de los acuíferos

La precipitación constituye la entrada de agua (recarga) más general de los acuíferos, pero otros procesos también pueden contribuir. Ya se ha mencionado que, en ciertos casos, los ríos alimentan a los acuíferos. Determinadas actividades humanas son, asimismo, causas de recarga: el retorno del agua de riego en zonas agrícolas o las fugas a partir de las redes de saneamiento en zonas urbanas. En relación con el primero de estos dos procesos hay que precisar que el porcentaje de retorno depende del sistema de riego En riegos tradicionales a partir de aguas de superficie es frecuente (aunque con tendencia a disminuir) que la aplicación del agua a las parcelas se realice por inundación de las mismas, lo que se denomina “riego a manta”, que todavía se emplea, por ejemplo, en las choperas de la Vega de Granada. En riegos

modernos, como es generalmente el caso de los recientes olivares de regadío, predominan los sistemas “localizados”, como es el riego por goteo. En este caso, el retorno es prácticamente nulo, mientras que en el riego a manta puede implicar que hasta un 30 % del volumen de agua aplicado recargue al acuífero. Desde el punto de vista de la economía del agua, se dice que este último sistema de riego es muy poco “eficiente”.

El destino del agua que recarga los acuíferos y luego circula subterráneamente en su seno es variado. Todo el flujo subterráneo circulante constituye lo que se denomina “recursos” (renovables) del acuífero. También puede existir transferencia de caudales de forma subterránea entre dos acuíferos que estén en contacto. Generalmente, el flujo subterráneo vuelve a salir a la superficie, ya sea por medio de captaciones o de manera natural (manantiales). En este segundo caso, es lógico suponer que el caudal que ha fluido subterráneamente se incorporará a la red de drenaje superficial y constituirá una fracción más o menos importante del agua que circula por los ríos. Tan sólo cabe mencionar una excepción significativa a este proceso general: los acuíferos costeros; en ellos, el flujo subterráneo se dirige hacia el mar, generalmente de manera subterránea, difusa e imperceptible (foto 12).

Foto 12. Vista parcial de la Vega de Motril-Salobreña (Granada), una zona de importante productividad agrícola debido al regadío tradicional con aguas del río Guadalfeo. Se trata de un acuífero detrítico integrado mayoritariamente por aluviones d dicho río, el cual es objeto de captación para usos de abastecimiento humano e industrial y como complemento a los riegos. Una parte significativa de su flujo subterráneo descarga hacia el mar.

Los acuíferos como embalses subterráneos

Un acuífero puede concebirse, según se ha apuntado anteriormente, como un "embalse subterráneo" asociado al cual existe un cierto flujo (los recursos) y un almacenamiento (las reservas). Los acuíferos tienen asociado un volumen de agua almacenada que constituye sus "reservas". Este concepto es similar al del almacenamiento en embalses o en lagos, sólo que en los acuíferos el nivel de agua que informa sobre el estado de las reservas no se puede visualizar de forma directa. El nivel de agua en los acuíferos, según se ha dicho anteriormente, debe medirse en los piezómetros.

Los manantiales representarían los aliviaderos de dicho embalse. Los piezómetros indicarían el estado de las reservas. Como respuesta a periodos de recarga abundante, las reservas aumentan y los manantiales descargan caudales más elevados. Esta respuesta, dadas las características de los acuíferos, suele mostrar un cierto desfase temporal

respecto de las precipitaciones, lo que de nuevo establece una diferencia con el comportamiento de las masas de agua superficial. De hecho, algunos manantiales pueden presentar sus caudales más altos en primavera o verano. En periodos de sequía, las reservas de los acuíferos suponen una garantía de disponibilidad de agua como complemento a los embalses de superficie, cuyo almacenamiento suele verse más afectado en esas circunstancias climáticas adversas.

La explotación de los acuíferos: aspectos técnicos y legales

Conviene recordar que con anterioridad a la Ley de Aguas de 1.985 la propiedad de las aguas subterráneas iba aneja a la propiedad de los terrenos en que se alumbraban. En la actualidad, y después de un período transitorio para legalizar el aprovechamiento de dichas aguas calificadas como privadas por la legislación anterior, forman parte del Dominio Público Hidráulico.

Desde que entró en vigor de la Ley de Aguas, se disponía de un plazo de 3 años (finalizado en 1988) para solicitar la inscripción de estos derechos sobre aguas privadas como aprovechamientos temporales, por un período de 50 años. También podían ser inscritas en el Catálogo de Aguas Privadas, habiéndose terminado este plazo en 2001. Se mantiene, pues, la titularidad privada de estas aguas, limitada a conservar el aprovechamiento en la misma situación que estaba al entrar en vigor la Ley de Aguas. Cualquier cambio supone la solicitud de una concesión por la totalidad del aprovechamiento.

La explotación de los acuíferos se suele producir mediante el bombeo en pozos y sondeos que los captan. Es una actividad que permite solucionar problemas graves de abastecimiento humano e industrial y generar una importante riqueza agrícola.

En la actualidad, la inmensa mayoría de las captaciones de aguas subterráneas se hacen mediante sondeos mecánicos que utilizan tecnologías relativamente sofisticadas, como la rotopercusión con aire comprimido y martillo de fondo, particularmente adaptada a las rocas duras, o la rotación con tricono y circulación inversa de fluido, muy eficaz en rocas relativamente blandas. En el pasado, sin embargo, los pozos se excavaban manualmente o con procedimientos mecánicos sencillos (pico y pala). El procedimiento, aun bastante frecuente, de

perforación por percusión de un trépano y de extracción del detritus mediante una válvula, ambos suspendidos de un cable, es una adaptación de estos últimos procedimientos y es válido para la mayor parte de las rocas (figura 3).

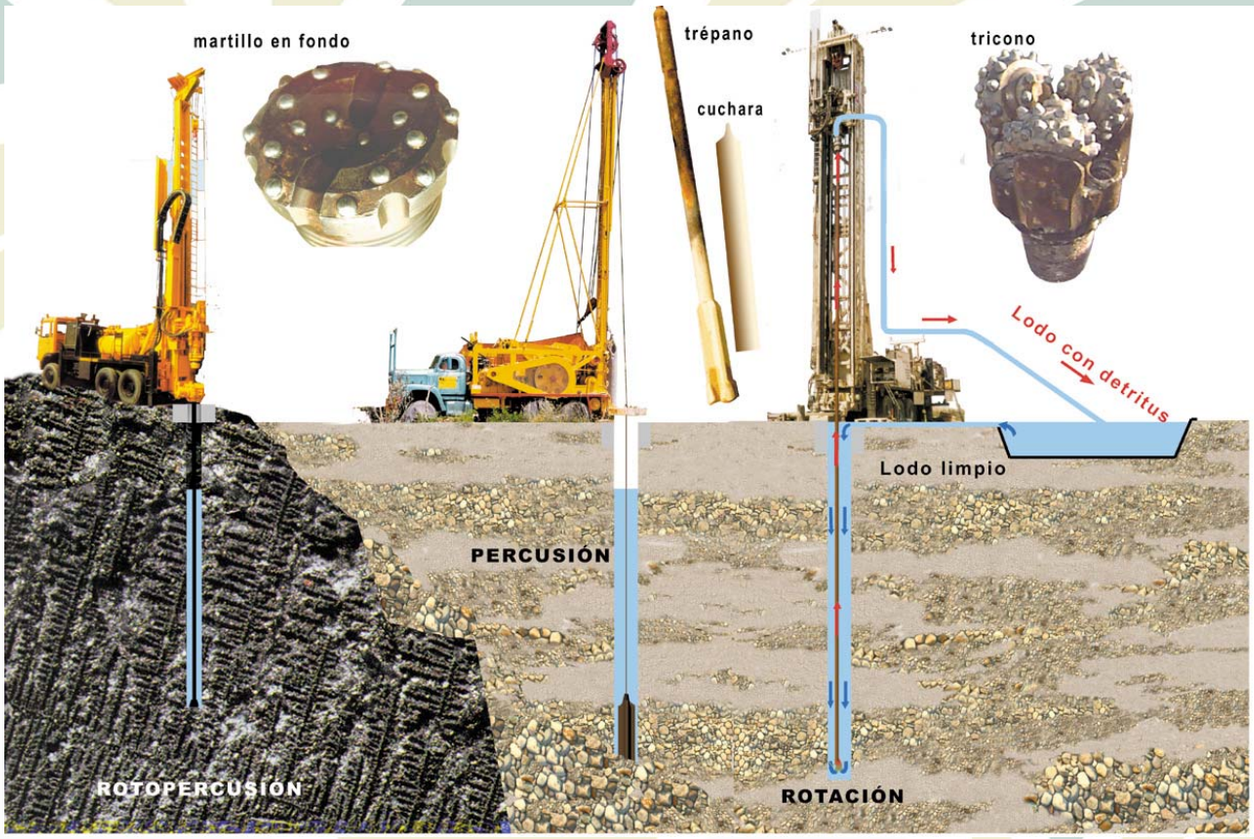


Figura 3. Principales sistemas de perforación de sondeos para captación de aguas subterráneas en rocas de diferente dureza y herramientas típicas de corte en cada uno de ellos (tomada de López Geta et al., 2001).

Una vez realizada la perforación, la adaptación de la misma como obra de captación conlleva la instalación de ciertos elementos básicos, como son la entubación, que comprende tramos ciegos y filtrantes, y el equipo de bombeo (figura 4 y fotos 13 y 14). Lo más frecuente en este último caso es utilizar grupos motobomba, que funcionan sumergidos y accionados por corriente eléctrica. De ahí el agua se suele conducir a depósitos o albercas, y desde allí a los puntos de consumo. En caso de su uso para riego, se puede aprovechar esta fase para añadir al agua los fertilizantes que los cultivos requieran.

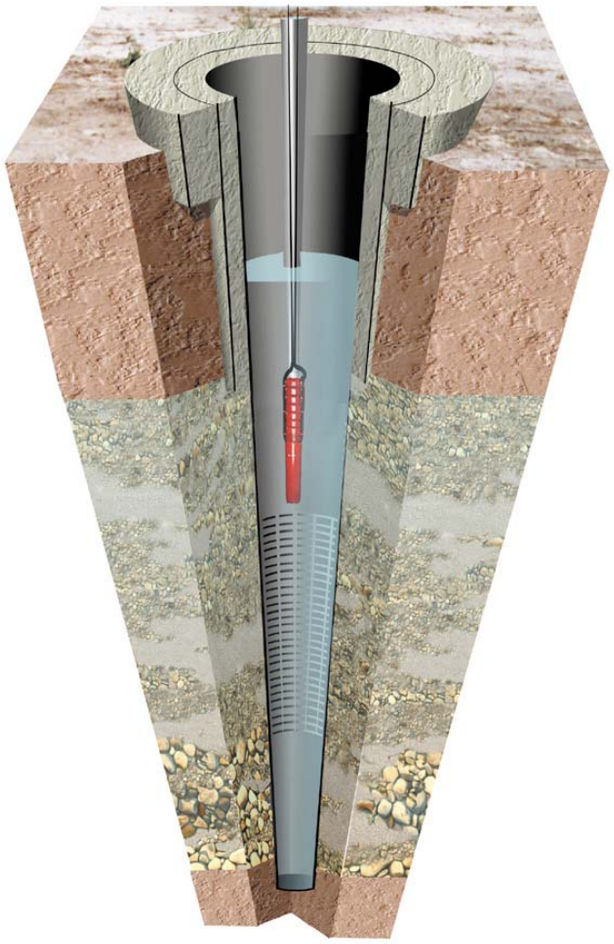


Figura 4. Esquema de un sondeo de captación de aguas subterráneas con algunos de sus principales elementos, entre los que destaca la bomba sumergida (ver foto 15) (tomada de López Geta et al., 2001).

Foto 13. Detalle de algunos elementos de un sondeo de captación: tubería ciega, filtro y macizo de grava.

Foto 14. Diferentes modelos de bombas sumergibles para sondeos de captación.

El que un sondeo produzca más o menos caudal es un aspecto que, en último término, depende de la permeabilidad del acuífero captado. Por ejemplo, en el acuífero de la Vega de Granada, de alta permeabilidad, no es raro que los sondeos extraigan caudales del orden de 100 L/s. Sin embargo, en materiales graníticos de Sierra Morena o esquistosos de Sierra Nevada-Las Alpujarras, de muy baja permeabilidad, un caudal de 1 L/s puede considerarse excepcionalmente alto.

La perforación de un sondeo es una actividad de investigación de aguas subterráneas regulada por la Ley de Minas y, como tal, requiere preceptivamente una tramitación para obtener el permiso de la administración competente (Junta de Andalucía, en el caso de Granada). Además, para extraer el agua subterránea y su consiguiente uso, al estar considerada como un bien público, se requiere la autorización de concesión por parte de la administración competente, en este caso los "Organismos de Cuenca", tradicionalmente conocidos como Confederaciones Hidrográficas (en Granada existen dos demarcaciones hidrográficas: la mediterránea-antes denominada "del Sur de España"- y la del Guadalquivir).

Según la ley, en el otorgamiento de concesiones se priorizará, en igualdad de condiciones, aquellos aprovechamientos que proyecten la más racional utilización del agua y una mejor protección del entorno. Se tendrá en cuenta el destino previsto de las aguas, en el sentido de que el uso de mayor rango es el de abastecimiento de poblaciones, seguido de regadíos y usos agrarios, usos industriales para energía eléctrica, otros usos industriales, acuicultura, usos recreativos, navegación y transporte acuático y otros aprovechamientos. El Plan Hidrológico de Cuenca puede variar esta prelación en su cuenca hidrográfica. El plazo máximo de concesión es de 75 años.

Igualmente según la ley, el propietario o propietaria de una finca puede aprovechar las aguas subterráneas o procedentes de manantiales, aunque se le exigen una serie de requisitos:

a) Que el volumen total anual a utilizar no supere los 7.000 m^3;

b) Que el agua se destine a la misma finca de donde brota o se alumbra;

c) Que el acuífero no se haya declarado sobreexplotado

d) Que se comunique al Organismo de Cuenca

Si el volumen a utilizar supera la cifra antes expuesta, hay que presentar al Organismo de Cuenca un proyecto técnico en que se justifique el volumen solicitado. Podrá concederse o denegarse.

Sin necesidad de recurrir a estudios agronómicos detallados, los requerimientos de agua para el riego de parcelas pueden establecerse de forma aproximada conociendo la “dotación” de los cultivos a regar. Así, para el olivar de regadío con riego localizado (“goteros”) y marco de plantación normal puede ser suficiente con 1500 m^3/ha·año. En plantaciones intensivas (más de 200 árboles por hectárea) esta dotación puede ser claramente insuficiente. En frutales subtropicales, por ejemplo, la dotación es muy superior (del orden de 8000 m^3/ha·año). De acuerdo con las características del clima mediterráneo, se entiende que los riegos se concentran en el periodo de verano y no se realizan a lo largo de todo el año. Precisamente el poder disponer de agua en los periodos de mayor escasez hídrica es una enorme ventaja de las captaciones de agua subterránea respecto de las procedentes de

derivaciones de ríos y arroyos, mucho más sensibles a los efectos de las sequías.

El bombeo en los acuíferos tiene como consecuencia el descenso, local o generalizado, de los niveles piezométricos (foto 15 y figuras 5 y 6). En casos de explotación intensiva, o sobreexplotación, el citado descenso puede ser importante y llevar aparejado el agotamiento completo de manantiales, una circunstancia que suele ir acompañada de una lógica contestación social, sobre todo si los manantiales sustentan espacios protegidos desde el punto de vista medioambiental o son están considerados como bienes de interés cultural. Como ejemplo de este último caso se puede citar el reciente conflicto generado por el agotamiento del sistema Fuente de La Reja-Charca de Pegalajar (Jaén).

Foto 15. Aforo de un sondeo tras su construcción. El sondeo no está todavía acondicionado para su uso y, en particular, la bomba definitiva no se ha instalado todavía ni puede que haya acometida eléctrica disponible. En estos casos el equipo (bomba accionada por un grupo electrógeno) lo suele suministrar la empresa encargada del aforo.

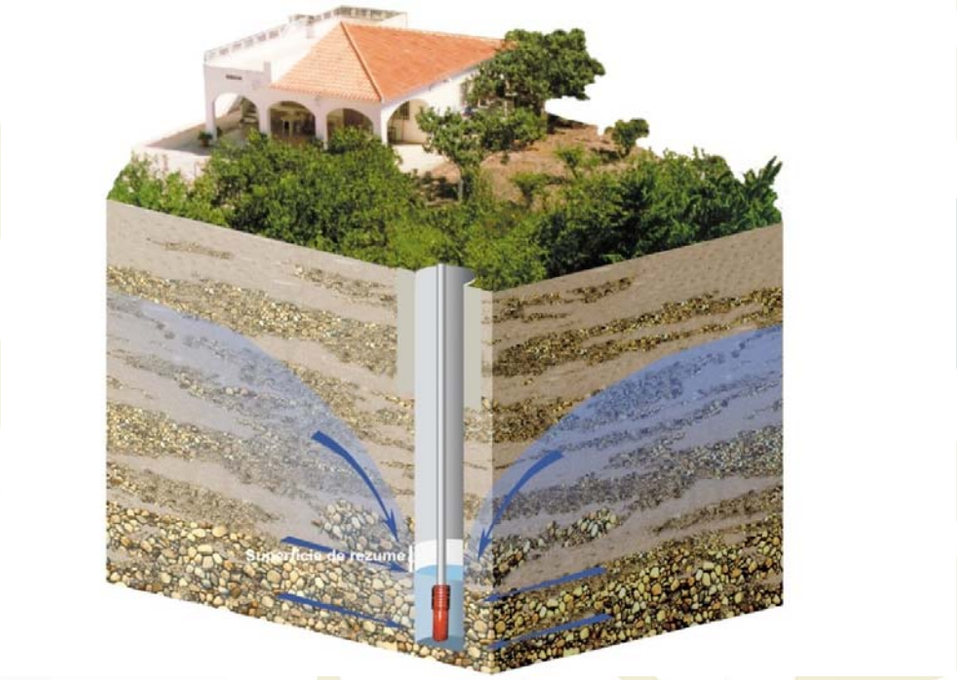


Figura 5. Formación de un conoide de descensos alrededor de un sondeo de captación de aguas subterráneas en funcionamiento (tomada de López Geta et al., 2001).

Figura 6. La superposición de conoides de descenso debido a la proximidad de sondeos de captación de aguas subterráneas en funcionamiento puede incrementar significativamente la profundidad del nivel de agua de los acuíferos explotados (tomada de López Geta et al., 2001).

Se considera que un acuífero está en sobreexplotación, o en riesgo de estarlo, cuando se está poniendo en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes en el mismo como consecuencia de venirse realizando extracciones anuales superiores o muy próximas al volumen medio de los recursos renovables, o que produzcan un deterioro grave de la calidad del agua. Consecuencias de la declaración de sobreexplotación son la paralización de todos los expedientes de concesiones, la suspensión del derecho de apertura de nuevas captaciones y la obligación de todos los usuarios del acuífero a formar una Comunidad de Usuarios.

Es necesario reseñar aquí un problema que incide muy negativamente en la gestión de los recursos hídricos: las captaciones ilegales de aguas subterráneas. Son posiblemente millones las obras de este tipo sin legalizar que existen en España. Independientemente de que sus propietarios están expuestos a sanciones, su existencia es un agravio comparativo para los agricultores responsables, Además, los efectos indeseables que en muchos casos producen las captaciones ilegales pueden afectar a los intereses de los agricultores que actúan en el marco de la legalidad.

La calidad de las aguas subterráneas

La calidad físico-química y sanitaria (microbiológica) de las aguas subterráneas también presenta algunas particularidades respecto a la de las aguas superficiales. Debido al efecto filtrante que impone el flujo en la mayoría de los acuíferos, las aguas subterráneas carecen, como ya se ha dicho anteriormente, de turbidez, y de ahí su utilidad en los abastecimientos humanos. Por el contrario, el mayor grado de contacto con el terreno hace que las aguas subterráneas tengan generalmente más mineralización (salinidad) que las aguas de superficie.

A diferencia de las aguas de ríos, lagos y embalses, las aguas subterráneas suelen mantener una temperatura muy constante a lo largo de todo el año, similar a la temperatura media ambiental. Salvo en zonas de actividad volcánica reciente, la existencia de aguas subterráneas con temperatura claramente superior a la ambiental (aguas termales) es indicio de flujos relativamente profundos.

En cuanto a su posibilidad de contaminación, los acuíferos presentan una serie de características que implican un grado de autoprotección mayor que el de las aguas de superficie, lo cual es ventajoso, especialmente desde el punto de vista sanitario. La capacidad de filtración, antes mencionada, es un ejemplo de ello en tanto que puede limitar la progresión de bacterias patógenas. El estrecho contacto del agua con los granos del medio poroso, sobre todo los de tamaños más finos, favorece que determinados contaminantes peligrosos, como los metales pesados y los productos orgánicos sintéticos, experimenten retención en el terreno y disminuyan así su riesgo ambiental. Este es el caso, por ejemplo, de los fitosanitarios empleados en el control de plagas que afectan a las cosechas. Sin embargo, en el caso de que, a pesar de esa protección natural, los acuíferos lleguen a contaminarse, su regeneración es técnica y económicamente mucho más difícil y lenta que para las aguas superficiales.

Al ser España un país con importante actividad agrícola, hay que destacar el riesgo para la calidad de las aguas subterráneas que deriva de la aplicación en exceso de fertilizantes nitrogenados en las aguas de regadío. Este riesgo se manifiesta en el incremento del contenido en nitratos en los acuíferos, una tendencia registrada en muchos territorios agrícolas, la cual se agrava debido al clima mediterráneo semiárido y a la existencia de ciclos de bombeo-aplicación del agua con fertilizantes-evaporación-concentración. Hay que indicar que el nitrato es una especie muy móvil en disolución, cuya concentración máxima en aguas de abastecimiento está limitada a un valor relativamente bajo, el cual se supera frecuentemente en muchos acuíferos sobre los que se asientan poblaciones o que sustentan labores agrarias importantes. En casos extremos, se debe proceder a reducir los contenidos de nitratos de las aguas subterráneas mediante técnicas relativamente costosas, como los tratamientos con ósmosis inversa.

Por otro lado, cuando aguas con contenidos altos de nitratos alcanzan las masas de agua superficial (ríos, lagos, embalses), se produce la “eutrofización” de las mismas, lo cual se manifiesta en el crecimiento de algas, proceso que, a su vez, puede deteriorar notablemente la calidad de estos enclaves por la incidencia de otros fenómenos.

Por último, la dificultad inherente en la determinación del flujo subterráneo es una clara desventaja de los acuíferos respecto de la aguas de superficie en la lucha contra la contaminación. En un río, por ejemplo, además de que la contaminación es fácilmente perceptible, es sencillo prever las circunstancias de su propagación, así como identificar las actividades contaminantes. En los acuíferos, sin embargo, la contaminación producida hoy en un punto puede manifestarse en una captación no demasiado lejana al cabo de varias decenas de años, cuando probablemente incluso no queden evidencias de la actividad contaminante. Por todo ello, la estrategia principal de protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación debe basarse, más que en otros casos, en la prevención y el control. En el caso de los nitratos y de los pesticidas, esta estrategia se basa en la adopción por parte de los agricultores de una serie de "buenas prácticas", destinadas a minimizar los efectos medioambientales indeseables sin que ello suponga una merma significativa en la productividad de sus cosechas.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

López-Geta, J. A., Fornés, J. M., Ramos, G. y Villaroya, F. (2001). Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo. IGME-Fundación Marcelino Botín. Documentación también accesible en la página web www.igme.es).

CRÉDITOS DE LAS FOTOGRAFÍAS

Todas las fotografías son del autor, excepto las figuras que, como se indica, han sido tomadas del texto referido de López Geta et al. (2001).

Seminario Junio 2013

DESNITRIFICACIÓN Y CICLO DEL NITROGENO

Prof. Eulogio José Bedmar Gómez

Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Estación Experimental del Zaidín

Departamento de Microbiología del Suelo y Sistemas Simbióticos

Desnitrificación: ¿qué es?, para qué sirve? Su interés en la agricultura

Ciclo del nitrógeno (N)

Después del carbono (C), del hidrógeno (H) y del oxígeno (O_2), el N es el elemento más abundante en la composición de los seres vivos. Con la excepción del agua, el N es el elemento que mas limita el crecimiento de las plantas y, por tanto, es muy importante en la práctica de la Agricultura. Los agricultores saben que sin este elemento sus cultivos no prosperan y sus cosechas se reducen.

El N constituye el 80% de los gases de la atmósfera, por lo que está presente en grandes cantidades alrededor de la superficie de la tierra. A pesar de su abundancia, la disponibilidad de N en una forma adecuada para su consumo representa una gran limitación para la vida en nuestro planeta. La mayoría del N se encuentra en la atmósfera como gas (N_2), un compuesto que no es aprovechable por la mayoría de los seres vivos, incluyendo las plantas y los animales. En la naturaleza, no obstante, existe un conjunto de microorganismos, que son los únicos seres vivos que pueden utilizar el gas N_2, el cual transforman en amonio (NH_4^+). Así, aunque estos seres vivos no los podemos ver con nuestros ojos, si realizan una función esencial en la vida y son aliados de los agricultores. Las plantas sí pueden utilizar el amonio para su nutrición, y el consumo de las plantas por los animales le proporciona a, su vez, los compuestos nitrogenados para su crecimiento y desarrollo.

Al proceso de transformación del N_2 en amonio se le denomina fijación biológica lo que inicia el denominado ciclo biológico del N en nuestro planeta (Figura 1). Las bacterias que realizan este proceso se clasifican en dos grandes grupos, las que fijan el N_2 solas o las que lo hacen asociadas a plantas. Las bacterias que fijan el N_2 sin estar unidas a plantas, cuando se encuentran en el suelo, aguas o sedimentos, utilizan el amonio fijado para su crecimiento, por lo que sólo lo dejan disponible para las plantas cuando mueren. Cuando las bacterias mueren, los compuestos nitrogenados que las forman se liberan al suelo donde se transforman en amonio/nitrato, productos que entonces quedan disponibles para que las plantas puedan consumirlos.

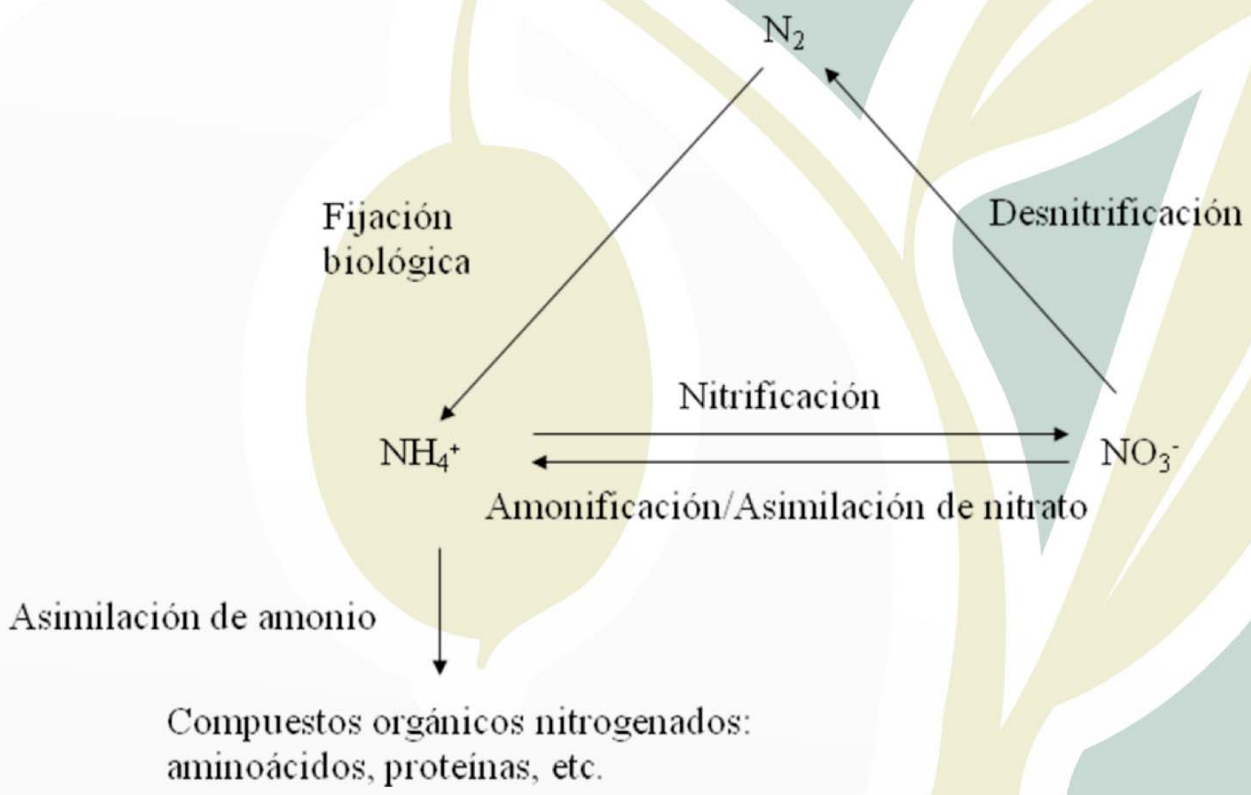


Figura 1. Esquema de ciclo del N

Las bacterias que fijan el N_2 asociadas a las plantas son auténticas especialistas ya que son capaces de infectar sus raíces y originar unos órganos característicos, bien conocidos por los agricultores, denominados **nódulos** en donde se lleva a cabo la fijación del N_2 (Figura 2). Los nódulos se pueden ver en distintas plantas leguminosas como guisante, haba, lentejas, judías acacias, etc., o en plantas no leguminosas como los alisos, mirtos de turbera, casuarinas, etc. Estas

plantas, gracias a la capacidad de fijar N_2, pueden crecer en suelos áridos y pobres, de escasa fertilidad. Puesto que su contenido en nitrógeno es elevado, tales plantas se utilizan ampliamente en la alimentación animal y humana.

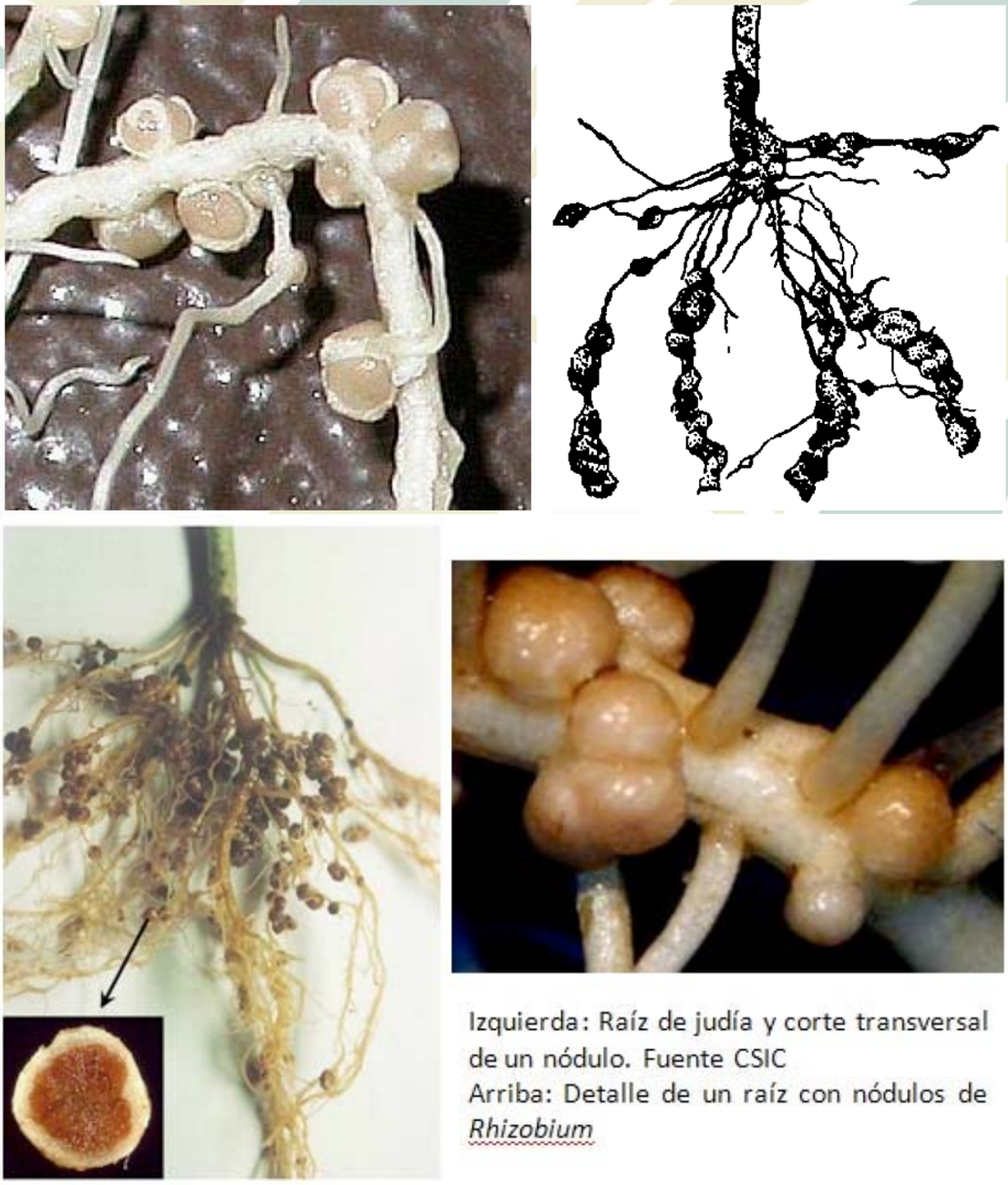


Figura 2. Ejemplos de nódulos radicales

Cuando las plantas y animales mueren, los compuestos nitrogenados que contienen se liberan al medioambiente donde se transforman de nuevo en amonio. Otras bacterias, llamadas nitrificantes son entonces

las responsable de convertir, primero, el amonio en nitrito (NO_2^-) y, posteriormente, el nitrito en nitrato (NO_3^-), proceso al que se denomina nitrificación (Figura 1). Hay que tener en cuenta que las plantas y las bacterias también pueden utilizar nitrato para su nutrición. En este caso, el nitrato se convierte de nuevo en amonio, y al proceso se le conoce con el nombre de amonificación o asimilación del nitrato (Figura 1).

El ciclo del N se completa cuando el nitrato se transforma en N_2, que vuelve de nuevo a la atmósfera. La conversión del nitrato en N_2 la llevan a cabo las bacterias desnitrificantes mediante el proceso de desnitrificación, el cual será objeto de estudio es este documento (Figura 1).

Alteraciones del ciclo del N

Se ha estimado que la fijación biológica de N_2 proporciona entre 90 y 130 teragramos (Tg)/ año (1 Tg = 1 billón de gramos). Además del nitrato que se origina a partir de la fijación biológica del N_2, la fabricación industrial de amonio, muy especialmente para la producción de fertilizantes, contribuye a la formación de unos 140 Tg adicionales/año, lo que, finalmente, resulta en un incremento considerable de la concentración de nitratos en el suelo. Este exceso no puede eliminarse por la desnitrificación, lo que resulta en la acumulación de nitratos en suelos y aguas y da lugar, a su vez, a graves alteraciones en el ciclo del N y profundos cambios en los ecosistemas, tanto a nivel local como global. Este enriquecimiento continuo de nitrato en nuestro planeta es uno de los problemas más importantes en nuestros días.

Desnitrificación

La desnitrificacion es el único proceso biológico que ocurre en la naturaleza que es capaz de convertir el nitrato en N_2 y, en consecuencia, restaurar los excesos de nitratos existentes. Es por ello que su conocimiento y manejo es esencial para la vida y estabilidad de la vida en la Tierra.

La capacidad de desnitrificar está muy extendida entre los microorganismos y, aunque sólo ocurre en condiciones limitantes de oxígeno, se han descrito algunas especies capaces de desnitrificar en su presencia. Además de la ausencia de oxígeno, la desnitrificación requiere

la presencia en los suelos de nitratos/nitritos y de una fuente de carbono.

¿Quiénes son los microorganismos desnitrificantes?

Utilizando diferentes métodos se ha podido establecer que la proporción de microorganismos desnitrificantes en el suelo representa hasta el 5% de la comunidad microbiana total, una cantidad ciertamente muy importante. Algunas bacterias desnitrificantes producen sólo N_2, mientras que otras producen una mezcla de N_2 y N_2O, y otras sólo N_2O. Como veremos mas adelante este gas (N_2O), constituye un enorme problema ya que su emisión representa uno de los factores mas importantes del calentamiento global de nuestro planeta.

Hasta la fecha se han identificado más de 60 grupos (géneros) con capacidad para desnitrificar. Entre los microorganismos desnitrificantes, la mayoría desnitrifican sin tener que asociarse a las plantas, mientras que en algunos casos se ha demostrado que esta actividad también puede ocurrir en el interior de los nódulos. Si a nivel mundial se consideran las vastas extensiones de terreno cultivadas con tales plantas, las asociaciones bacteria-planta son una enorme fuente de desnitrificación cuando crecen en suelos con nitratos.

Medida de la actividad desnitrificante

Teniendo en cuenta que el proceso de la desnitrificación determina la perdida de nitrato de los suelos, es muy importante el poder medir este proceso, ya que teóricamente una desnitrificación descontrolada podría originar la perdida de fertilidad de un suelo agrícola. Los métodos más utilizados se basan en la determinación de las cantidades de N_2O, N_2 o ambos. No obstante es importante considerar que otros procesos biológicos en los suelos y en las aguas pueden generar N_2O, hecho que hay que considerar.

Otros procesos biológicos que producen N_2O

Como hemos mencionado, además de la desnitrificación, otros procesos biológicos pueden originar N_2O. Así, la nitrificación y la amonificación dan lugar a la formación de N_2O (ver Figura 1). A la nitrificación también se

le llama oxidación del amonio, la llevan a cabo las bacterias nitrificantes (Figura 3). Las bacterias nitrificantes más conocidas pertenecen a los géneros *Nitrosomonas* y *Nitrosospira*, que transforman el amonio en nitrito, y las del género *Nitrobacter* que se encargan de oxidar el nitrito a nitrato.

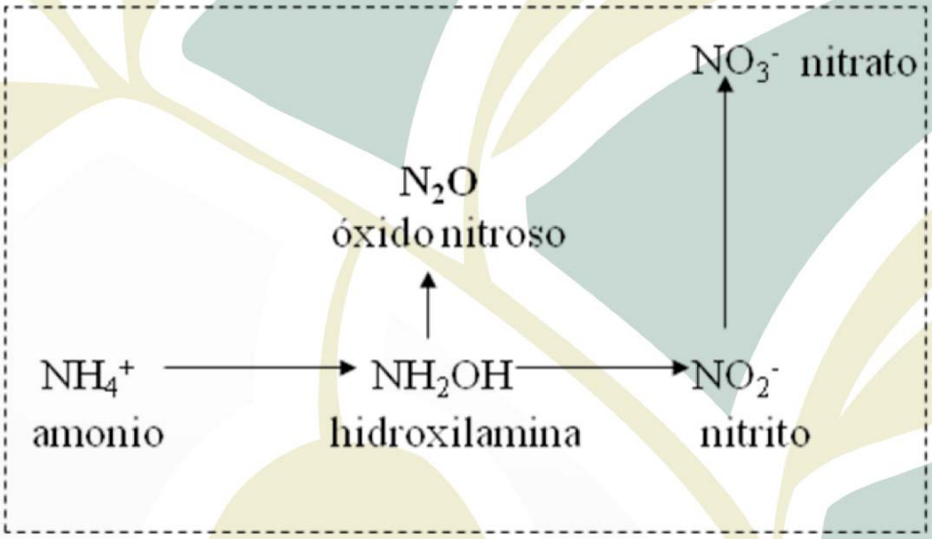


Figura 3. Nitrificación

El nitrato formado durante la nitrificación puede convertirse de nuevo en amonio, primero a nitrito y, luego, a amonio, proceso al que también se denomina amonificación o asimilación del nitrato.

En general, los procesos de formación de N_2O raramente tienen lugar de forma aislada, sino que concurren en un mismo ambiente donde las bacterias que los realizan compiten por los nutrientes (materia orgánica, compuestos nitrogenados) de distinta naturaleza existentes en el medio. Esto implica que el N_2O producido en uno cualquiera de los tres procesos puede intercambiarse de uno a otro dependiendo de las condiciones ambientales que se den en un momento determinado (Figura 4). Consecuentemente, el N_2O producido durante los distintos procesos forma un único conjunto que puede reducirse a N_2.

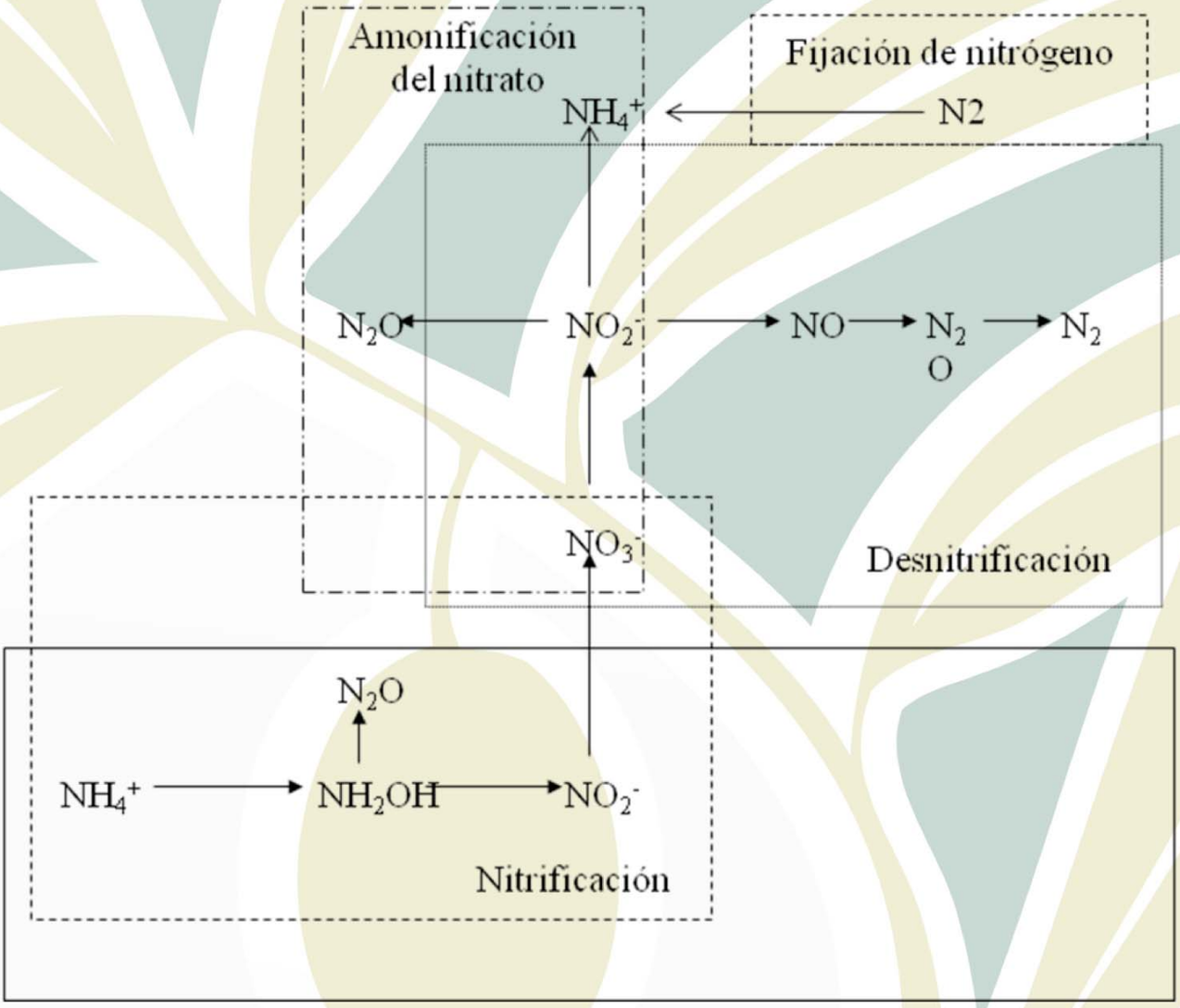


Figura 4. Relaciones entre los procesos de fijación de nitrógeno, amonificación, nitrificación y desnitrificación

Existen evidencias acerca de la existencia de procesos no biológicos que resultan en la producción de NO, N_2O o N_2 en condiciones específicas. Así ocurre cuando el nitrito se acumula y reacciona con una serie de compuestos, parece ser que de origen fenólico, para producir NO y N_2O. Esto puede ser una fuente importante de N_2O en suelos de pH ácido, inferior a 5.5, donde el equilibrio entre el nitrito y el ácido nitroso (HNO_2) cambia a favor del segundo que puede descomponerse para formar NO, HNO_3 (ácido nítrico) y agua, o reacciona con los constituyentes de la materia orgánica del suelo para formar N_2, N_2O y CH_3ONO (metil nitrito).

Impacto de la desnitrificación en el medio ambiente

Las bacterias capaces de llevar a cabo la desnitrificación completa, esto es, la reducción de nitrato/nitrito a N_2 son muy escasas, ya que la mayoría de ellas sólo realizan una desnitrificación incompleta, lo que se debe a que no poseen, o no expresan, el conjunto de enzimas necesario para llevar a cabo todas y cada una de las etapas de reducción que conforman la desnitrificación. Es, por tanto, una paradoja que siendo la desnitrificación el único proceso biológico conocido para eliminar el exceso de nitratos que contaminan los ecosistemas terrestres y acuáticos, sea también un mecanismo cuyos productos intermediarios tienen un enorme impacto sobre la contaminación atmosférica. Así, el óxido nítrico (NO) y el óxido nitroso (N_2O) son potentes gases de efecto invernadero que intervienen en la formación de la lluvia ácida, en el calentamiento global de la atmósfera y en la destrucción de la capa de ozono que la protege. Según el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), el óxido nitroso es 300 veces más activo que el dióxido de carbono (CO_2) en el calentamiento de la atmósfera, y él sólo representa hasta el 6% del efecto invernadero debido a causas humanas (actividades industriales, quema de combustibles fósiles, etc.). El N_2O se concentra en la atmósfera y actúa reflejando los rayos solares de nuevo a la tierra. En la atmósfera el óxido nitroso se transforma en óxido nítrico que contribuye a la destrucción de la capa de ozono que protege la tierra de la luz ultravioleta. El óxido nítrico también puede originar otros compuestos químicos que caen a la tierra como constituyentes de la denominada lluvia ácida, tan dañina para la vida de las plantas.

Se ha considerado durante mucho tiempo que la fuente de enriquecimiento del aire en óxido nitroso era la creciente utilización de los combustibles fósiles (gasolinas, gasoil, etc.) derivados del petróleo. Sin embargo, es ahora sentir general que, de forma principal, su origen está en la actividad microbiana de suelos y aguas enriquecidas en nitratos por la aplicación masiva de fertilizantes. De hecho, entre 1960 y 2005 la cantidad de fertilizantes nitrogenados que se utilizan en Agricultura ha incrementado 12 veces. Aunque el empleo de tales fertilizantes ha supuesto un considerable aumento en la producción de alimentos, también ha ocasionado efectos colaterales no deseables, como es la creciente contaminación del medioambiente. **Más de la**

mitad del fertilizante nitrogenado que se aplica al suelo termina en ríos, lagos y mares, contribuyendo a su eutrofización y al crecimiento masivo de algas en las plataformas marinas (Figura 5). De ahí, que el exceso de nitratos no sólo afecta a los ecosistemas terrestres y marinos, sino que también contribuye a la liberación a la atmósfera de gases invernadero que intervienen en el calentamiento de la atmósfera y en el cambio global. Desde la etapa preindustrial hasta nuestros días, la concentración de N_2O en la atmósfera ha aumentado de 0.275 a 0.314 partes por millón, con un incremento anual de 0.3% por año.

Importancia de la desnitrificación en la salud humana

La contaminación de aguas subterráneas por nitratos es un hecho cada vez más frecuente e intenso. Aunque el origen de esta contaminación es muy diverso, hay que destacar la que ocasionan los residuos sólidos urbanos, las actividades ganaderas e industriales, las aguas residuales y, sobretodo, la producida por la actividad agrícola, ya que el uso intensivo de fertilizantes químicos nitrogenados determina, tras su lavado por las aguas de lluvia y riego (lixiviación), el enriquecimiento progresivo de los acuíferos.

La contaminación por nitratos de las aguas subterráneas representa tanto una amenaza de carácter sanitario, por su incidencia en la salud humana, como de tipo social y económico al impedir que los recursos hídricos puedan utilizarse para el consumo público. Elevadas concentraciones de nitratos en el agua son tóxicas, especialmente para niños menores de 6 meses. El nitrato en sí no es tóxico a no ser que se convierta en nitrito por las bacterias que habitan el tracto digestivo. Conforme el nitrito entra en la sangre reacciona con la hemoglobina para formar metahemoglobina, lo que bloquea el transporte de oxígeno y causa asfixia, una enfermedad conocida como el síndrome del niño azul o metahemoglobinemia. De todo esto, se deduce el especial cuidado que hay que tener para evitar la contaminación de las aguas subterráneas con nitratos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha estimado que el límite superior de nitratos en el agua potable no debe sobrepasar

Figura 5. Ejemplos de aguas eutrofizadas

los 45 mg de NO_3^-/litro. Por otra parte, no hay que olvidar, que el nitrato es, junto con el fósforo, uno de los principales agentes responsables de las alteraciones que pueda sufrir el entorno medio-ambiental, al modificar el equilibrio nutricional de los sistemas acuáticos (eutrofización).

De todo esto, la importancia de la desnitrificación ya que es el único proceso biológico por el que se puede reducir la presencia de nitratos contaminantes en suelos y aguas.

Consecuencias de la desnitrificación para la agricultura

La desnitrificación representa una pérdida considerable de nitrógeno para la agricultura ya que parte del fertilizante que se adiciona a los cultivos se pierde en forma de gases nitrogenados. Estas pérdidas pueden ser enormes ya que hasta el 25% del nitrógeno aplicado puede perderse como gases (N_2O o N_2), limitando de esta manera la producción de las cosechas. Diversos estudios indican que tales pérdidas oscilan entre 0 y 200 kg de N /ha/año, aunque se han estimado valores de hasta 340 kg/ha/año. A nivel mundial se ha calculado que la cantidad de N que se pierde por desnitrificación varía entre 22 y 87 Tg. Estas diferencias pueden deberse a la metodología utilizada para estimar las tasas de desnitrificación.

Los suelos agrícolas sometidos a cultivos intensivos tienen mayor actividad desnitrificante que los suelos no cultivados. No obstante, los procesos de desnitrificación en suelos ocurren de forma irregular en el tiempo y en el espacio debido a las condiciones climatológicas, características del suelo y a las propias prácticas agrícolas.

Factores que afectan la desnitrificación

La desnitrificación es la principal fuente de emisión de N_2O y la actividad desnitrificante está controlada por la concentración de oxígeno (principalmente a través del contenido en agua del suelo), la disponibilidad de N y de C, el pH y la temperatura. Otros factores, entre ellos los ciclos de congelación-descongelación, procesos de humedad y sequía, rizosfera de las plantas, pesticidas, metales pesados, etc., también afectan la desnitrificación. En algunos casos, los factores naturales debidos a las condiciones climáticas y medioambientales no

pueden manipularse y, en muchos casos no son constantes sino que muestran amplias variaciones dependiendo de los sitios de estudio. En este caso, un mayor conocimiento de los factores que contribuyen a la variabilidad de la actividad desnitrificante podrían ayudar a mejorar las estimaciones de la misma y a preparar procedimientos y modelos que nos permitan conocer los flujos del N debidos a la desnitrificación. Esto, además, es fundamental para el desarrollo efectivo de procedimientos que permitan preservar la contaminación por nitratos de suelos, agua y atmósfera, así como para establecer planes de actuación en zonas contaminadas.

1. Efecto del agua, de la temperatura y del pH

La temperatura y el contenido en agua de un suelo son factores que afectan tanto la emisión total de N_2O y N_2 como la proporción entre ellos.

En condiciones controladas de laboratorio tanto la emisión total de gases nitrogenados como la razón N_2O/N_2 incrementan con el aumento de la temperatura. Este incremento se debe al aumento del número de microorganismos desnitrificantes en el suelo y a la mayor actividad de los mismos. A temperaturas elevadas no se observa dicha correlación ya que puede ocurrir la muerte celular, disminución de la actividad y pérdida del contenido en agua por los procesos de transpiración.

Las tasas de desnitrificación más elevadas ocurren en primavera y en otoño, lo que indica que el agua del suelo es un factor que controla la desnitrificación. Los suelos con cultivos que requieren mucha irrigación tienen mayor actividad desnitrificante por lo que se recupera en el cultivo muy poco del fertilizante nitrogenado que se ha adicionado.

Unido al contenido en agua de un suelo está la disponibilidad de oxígeno. Cuando hay nitrato en el suelo, concentraciones de O_2 inferiores al 5% disparan la desnitrificación, que alcanza su máximo cuando la humedad oscila entre el 40% y el 60%.

El contenido en agua depende de la estructura de los poros del suelo que, a su vez, se afecta por el tipo de suelo, contenido en materia orgánica y uso de la tierra. Aunque las concentraciones de nitrato sean similares, la desnitrificación es mayor en los cultivos que en los pastos,

lo que se debe a que, por su mayor porosidad, el drenaje en el suelo de pastos es mayor.

Las variaciones en la temperatura del suelo y el contenido en agua del mismo pueden explicar las diferencias en la emisión de N_2O entre países cálidos y húmedos con las de aquellos más fríos y secos. Igual puede decirse respecto a regiones dentro de un país, e incluso áreas agrícolas de una misma región.

En general, las tasas de desnitrificación disminuyen con el pH, aunque se ha observado actividad desnitrificante a pHs inferiores a 5.0. Es interesante destacar que el pH del suelo afecta las tasas de desnitrificación y también la razón N_2O/N_2.

2. Efecto del fertilizante

La producción de N_2O por los suelos agrícolas es la mayor fuente de emisión de N_2O a la atmósfera. Del total de 6,8 Tg de N_2O/año que se producen, 4,2 Tg se deben al N que se adiciona directamente al suelo como fertilizante, 2,1 Tg al N derivado de los excrementos y estiércoles, y 0,5 Tg al que se origina durante la quema de biomasa. En total, la emisión de N_2O por los suelos representa el 70% del total de la emisión de N_2O a la atmósfera.

En la mayoría de las evaluaciones que se realizan, las elevadas concentraciones de N_2O resultan de la aplicación de fertilizantes nitrogenados. Los incrementos en N_2O se producen unos pocos días después de la fertilización y suelen durar desde unos pocos días a algunas semanas. A veces se pueden observar picos secundarios de emisión después de un período de lluvia que se prolongan hasta que desparece el fertilizante de las capas superiores del suelo. El tipo de fertilizante, el estado físico del mismo (líquido o sólido), así como la forma y tiempo de aplicación son importantes para determinar la magnitud y la duración de la emisión

Las emisiones directas de N_2O de lo suelos agrícolas también pueden variar debido a las diferencias en los procesos de lavado y escorrentía de los fertilizantes a los sistemas acuáticos y al transporte hidrológico del N_2O disuelto desde las aguas profundas hacia las superficiales.

La emisión global de N_2O por los suelos de las praderas, humedales y bosques es baja si se compara con la de los suelos agrícolas, y no hay certeza de su contribución al total del N_2O producido. Esta incertidumbre se debe, por una parte, a la escasez de datos que se tienen, sobretodo si se comparan con los descritos para los suelos agrícolas y, por otra, a la elevada variabilidad espacial y temporal asociada a estas emisiones. En general se estima que la producción de N_2O por los bosques es 10 veces menor que la de los suelos agrícolas. La magnitud en la emisión por los bosques puede variar dependiendo no sólo de las condiciones ambientales, sino también de la diversidad de especies dentro del bosque y del tipo de microorganismos (bacterias, hongos) que predominen en el suelo.

La emisión de N_2O por suelos enmendados con residuos de plantas varía con el tipo de residuo, la composición del mismo y la cantidad de biomasa incorporada. La composición del residuo, sobretodo su contenido en N, determina la liberación de N y, consecuentemente, la emisión de N_2O. La relación carbono/nitrógeno (C/N) del residuo que se aplique, así como el contenido en lignina, polifenoles, etc. del mismo también supone variaciones en la emisión de N_2O. En general, la adición al suelo de un residuo vegetal hace que aumente la producción de N_2O, lo que se debe a la formación de microespacios con una baja concentración de oxígeno debido al incremento en la respiración bacteriana, al alojamiento físico del residuo en los poros del suelo y a la retención de la humedad del suelo.

También la ganadería es responsable de la producción de N_2O. Ello se debe a la excreción de N como excremento o como orina, bien directamente, o como resultado de la aplicación al suelo del estiércol o como efluente procedente de la estabulación del ganado. El pastoreo también interviene en la producción de N_2O, ya que los lugares con pastos abundantes suelen estar compactados debido al tráfico del ganado, lo que origina las condiciones de falta de oxígeno adecuadas para que ocurra la desnitrificación.

3. Ciclos de congelación-descongelación

En un experimento de laboratorio donde se esterilizó suelo mediante tratamiento con rayos gamma y se sometió a procesos de congelación y

descongelación, se pudo comprobar la existencia de emisión de N_2O por los suelo y que el óxido nitroso emitido se debía a la actividad microbiana. En países de clima frío, se ha demostrado liberación de N_2O durante la congelación-descongelación que puede ocurrir en un día, durante la congelación de los suelos en el invierno y la descongelación en la primavera. En estos casos, la producción de N_2O se atribuyó a las diferencias temporales de temperatura ya que se comprobó que la emisión de N_2O disminuye si la temperatura se mantiene baja y estable a lo largo del tiempo. Otros estudios de campo han demostrado la producción de elevadas cantidades de N_2O durante los períodos de congelación-descongelación en países de clima moderado, llegando a alcanzar el 70% del total de N_2O emitido.

Aunque existe un considerable debate acerca de los factores que controlan la emisión de N_2O en los suelos durante el invierno, la mayoría de los autores indican que se debe a la liberación de nutrientes al suelo. Esta sugerencia se hizo al demostrarse que era necesaria la adición de C soluble para inducir la emisión de óxido nitroso durante los períodos de congelación-descongelación. Por tanto, los residuos de las plantas, o la adición de estiércol, pueden jugar un papel importante en la regulación de las emisiones de N_2O ya que la congelación aumenta la liberación de productos orgánicos de los residuos vegetales. El aumento de la respiración microbiana durante la degradación de tales residuos, combinada con un mayor contenido en agua procedente de la descongelación del suelo disminuye la presencia de oxígeno lo que, a su vez, aumenta la desnitrificación.

La nitrificación favorece la producción de N_2O durante el invierno ya que se ha comprobado que los ciclos de congelación-descongelación favorecen la mineralización del nitrógeno, lo que resulta en la producción de compuestos que pueden ser utilizados por las bacterias que oxidan el amonio.

4. Ciclos de sequía-humedad

De manera similar a la congelación-descongelación, los ciclos de sequía-humedad favorecen las emisiones de N_2O. En la mayoría de los casos, la humedad favorece la desnitrificación y se ha observado que la tasa total

de desnitrificación y la cantidad relativa de N_2O emitido se estimula al aumentar la humedad del suelo.

5. Efecto de la rizosfera

La rizosfera es el volumen de suelo influenciado por las raíces de las plantas. El crecimiento y actividad del sistema radical induce modificaciones en las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo que rodea la raíz, a lo que se ha llamado efecto rizosférico. Los principales factores que afectan la desnitrificación, como el C, el nitrato y el oxígeno, pueden modificarse en la rizosfera de las plantas. Las raíces de las plantas exportan al suelo una variedad de compuestos que pueden utilizarse por los microorganismos desnitrificantes.

El efecto de las plantas sobre la concentración de oxígeno y de nitrato en la rizosfera es complejo. El oxígeno puede disminuir debido a la respiración de las raíces y de los microorganismos. Por otra parte, el consumo de agua por las raíces incrementa el intercambio gaseoso y la concentración de oxígeno. Algunas plantas como el arroz liberan oxígeno al suelo en suelos saturados de agua. Finalmente, cuando las raíces crecen y penetran en el suelo pueden modificar su compactación, lo que afecta la difusión del oxígeno.

El nitrato puede utilizarse por las plantas y por los microorganismos y, por la tanto, la competencia por su consumo es elevada en la rizosfera. Las plantas pueden proporcionar nitrato para la desnitrificación cuando la materia orgánica que excretan por las raíces se mineraliza. Aún más, durante la senescencia de las plantas y posterior descomposición el nitrógeno queda disponible y puede ser desnitrificado. En resumen, los factores que controlan la desnitrificación en la rizosfera están entremezclados, y el efecto positivo debido al carbono sólo se observa cuando exista mucha cantidad de nitratos en el suelo. Por todo ello, es difícil establecer si las raíces de las plantas estimulan la desnitrificación.

6. Efecto del cultivo y de la especie de plantas

Para investigar el efecto del tipo de cultivo sobre los niveles de desnitrificación se han comparado suelos plantados y no plantados con un determinado cultivo. Hasta la fecha, los resultados obtenidos indican que la desnitrificación es mayor en lo suelos cultivados que en los no

cultivados. Empleando cebada se ha comprobado que la presencia del cultivo aumenta la desnitrificación más de 2 veces con respecto al suelo sin plantar. Lógicamente, la adición de nitrato a los cultivos incrementa la desnitrificación. La materia orgánica (C) en los suelos es otro de los factores responsables del efecto estimulante de las plantas sobre la desnitrificación ya que la excreción al medio de compuestos orgánicos por las raíces proporciona, por una parte, energía para el crecimiento de los microorganismos y, por otra, al aumentar la actividad microbiana, disminuye la concentración de oxígeno. Se ha estimado que la cantidad de C que las raíces proporcionan puede ser hasta el 20% del C fijado por la fotosíntesis durante el período de crecimiento. Sin embargo, en experimentos de laboratorio, se ha observado que el tratamiento con mucílago, azúcares, aminoácidos o ácidos orgánicos, que son los principales compuestos excretados por las raíces de las plantas, sólo produjo pequeños cambios en la actividad y en las bacterias desnitrificante. Otros estudios han demostrado que la densidad de bacterias desnitrificantes es mayor en suelos cultivados que en no cultivados y las poblaciones cambia de un suelo a otro.

Las tasas de desnitrificación también se correlacionan positivamente con la distribución de residuos vegetales frescos en el suelo.

Puesto que la composición y estructura de las raíces y tallos son diferentes de unas plantas a otras, y la cantidad y calidad de los exudados radicales varían entre las especies vegetales, se ha sugerido que el tipo de planta afecta la capacidad desnitrificante de los microorganismos del suelo. En un estudio realizado con plantas forrajeras se observó que la capacidad de desnitrificación, en general, tiende a ser mayor en plantas con raíces de elevada biomasa. Se ha calculado que un cultivo de cereales grano puede producir de 0.2 a 0.7 kg de N_2O/año, un campo de maíz emite entre 3.9 y 8.7 kg/ha/año y un campo de leguminosa varía entre 0.34 y 4.6 kg/ha/año. Muchos trabajos se han llevado a cabo con leguminosas, debido a que estas plantas pueden utilizarse como alternativa a los fertilizantes nitrogenados. En comparación con los cereales, forrajeras y hortalizas, las tasas de desnitrificación más elevadas corresponden a las leguminosas, quizás por el elevado contenido de N de estas últimas.

7. Efecto de los pesticidas, los metales pesados y los hidrocarburos

En un estudio que utilizó 39 herbicidas, 10 fungicidas y 5 insecticidas se demostró que el 23% de los pesticidas tuvo efecto sobre la desnitrificación cuando se emplearon a una concentración de 100 microgramos de ingrediente activo por gramo de suelo. La desnitrificación se potenció por la adición de AMPA o fenvalerato, mientras que el herbicida ioxonil, los fungicidas mancozeb y maneb,y el insecticida cineb inhibieron la actividad desnitrificante. El dalapon, la atrazina y la simazina no afectaron la desnitrificación a concentraciones entre 5 y 100 microgramos de ingrediente activo por gramo de suelo. A modo de resumen, se puede indicar que el efecto negativo de los fungicidas es mayor que el de los herbicidas y que el impacto de los pesticidas sobre la desnitrificación depende del tipo de suelo, de la preparación (puro o formulado) y de la concentración del pesticida que se aplique. Las condiciones climáticas y los productos de degradación de los pesticidas también influencian la desnitrificación. La adición de un pesticida al suelo puede reducir la desnitrificación debido a la muerte celular que origina, aunque se han descrito casos en los que se produce un aumento de la desnitrificación. Esto último se puede deber a) al empleo del pesticida, o de sus productos de degradación como fuente de carbono, nitrógeno o energía por las bacterias desnitrificantes, b) a la muerte de las bacterias que liberan al suelo productos nitrogenados y carbonados que pueden utilizar otras bacterias, y c) una respuesta inespecífica. Sin embargo hay que considerar que la estimulación de la desnitrificación en respuesta a la adición de un herbicida es un síntoma que debe considerarse tan severo como la disminución de la desnitrificación.

Los pesticidas también pueden afectar la estructura y el tamaño de la comunidad desnitrificante. Aunque se han observado distintos tipos de efectos, en general, el tamaño y estructura de las poblaciones se recuperan tras un tiempo más o menos prolongado desde que se produjo el efecto, lo que indica la capacidad de las poblaciones para volver a su niveles habituales después de haber sufrido una alteración.

En general, la desnitrificación es muy sensible a los metales pesados y su efecto negativo es inmediato. Se ha comprobado que la producción de

óxido nitroso se afectó menos que su reducción después de la adición al suelo de una mezcla de cadmio, cobre y zinc. Después de 2 meses de incubación, la capacidad para producir óxido nitroso se había recuperado totalmente, pero la de consumir óxido nitroso no se había recuperado También se han observado amplias diferencias en la resistencia a los metales pesados entre las comunidades desnitrificantes, que se han atribuido a aquellas propiedades químicas de los suelos como el pH, la capacidad de intercambio de cationes y el contenido en materia orgánica, que determinan la biodisponibilidad de los metales pesados.

El efecto de los metales pesados sobre la composición de las comunidades desnitrificantes no se ha estudiado con detalle. Muchas bacterias desnitrificantes son naturalmente resistentes a los metales pesados y, si no lo son, pueden desarrollar resistencia a los mismos.

En general, los hidrocarburos no se consideran un problema ya que sólo pueden alcanzar los suelos agrícolas de forma accidental. No obstante la respuesta a procesos de contaminación de suelos por estos productos depende en gran medida de muy diversos factores ambientales como el tipo de suelo y la concentración de contaminante.

Sobre como disminuir la producción de N_2O

Reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados o incrementar la eficiencia del uso del N ha sido, tradicionalmente, las opciones por excelencia para disminuir la emisión de N_2O. La mayor eficiencia en el uso del fertilizante se puede conseguir aumentando la densidad de siembra de las plantas, dividiendo en varias veces la aplicación del fertilizante, considerando la demanda específica de cada tipo de cultivo, combinando la aplicación de nitrógeno orgánico e inorgánico, empleando fertilizantes de liberación retardada o lenta, sincronizando mejor el momento de la demanda de fertilizante con la aplicación del mismo, intercalando cultivos, utilizando inhibidores de la desnitrificación, empleando plantas mejoradas desde el punto de vista de la eficiencia del uso del N, etc.

El reto, no obstante, es desarrollar tecnologías y establecer tecnologías, prácticas de cultivo e incentivos que permitan reconciliar las necesidades de la Sociedad y de la Agricultura. En este sentido, en el año 2006 se introdujo el concepto de intensidad de gas invernadero (IGI), por el cual

el potencial de calentamiento global de un sistema se divide por el rendimiento en grano. Esta idea se basó que las plantas utilizan CO_2 atmosférico para obtener compuestos carbonados mediante la fotosíntesis, por lo que este gas, aunque tenga efecto invernadero, es necesario para las plantas y sin él no existiría el ciclo del C en la naturaleza. Así, se consideró que un IGI negativo indica un consumo neto de gas invernadero, considerado como equivalentes de CO_2, por kg de rendimiento en grano. Esta idea marca el escenario para ajustar las prácticas agrícolas de manera que se pueda conseguir un balance entre viabilidad económica y disminución de los efectos negativos sobre el medio ambiente. Al utilizar este concepto se obtuvo un IGI de 16.7 g de N_2O/kg N de cosecha cuando no se aplicó fertilizante y de 6.1 g N_2O/kg N de la cosecha cuando se aplicó como fertilizante 233 kg N/ha. Hay que hacer notar, no obstante, que existe la posibilidad de que la cantidad de N adicionado como fertilizante limitara el rendimiento de la cosecha.

Aunque a veces sea difícil reconciliar las competencias de los distintos sectores implicados, siempre habrá oportunidades para mejorar el funcionamiento de los sistemas conforme los conocimientos y las demandas de la sociedad evolucionen.

En la agricultura intensiva que se practica hoy día, el efecto económico que supone la pérdida del N que se adiciona al suelo es muy elevado. Ello debe estimular la investigación para proponer mecanismos y estrategias que disminuyan la pérdida de compuestos nitrogenados, al tiempo que se mitiga la emisión de gases de efecto invernadero. En este sentido, puesto que la desnitrificación es el mecanismo predominante de emisión de N_2O en suelos, y resulta imposible eliminarla, se ha propuesto mejorar la transformación de N_2O en N_2. Para ello, una opción sería la fertilización con compuestos que contuvieran cobre (Cu) en su formulación, ya que varias de las enzimas implicadas en la desnitrificación, entre ellas la óxido nitroso reductasa contiene Cu en su molécula.

Otra aproximación es el empleo de biocarbono. Aunque se desconoce el mecanismo por el que este compuesto disminuye la emisión de N_2O, su composición química y estructura sugieren que puede deberse a la incorporación de amonio en su estructura, lo que conlleva un cambio de pH, más que un incremento de la reducción de N_2O a N_2. Si este fuera el

caso, entonces el efecto del biocarbono sería disminuyendo el N_2O procedente de la nitrificación, con poco efecto sobre el N_2O derivado de la desnitrificación. Claramente, por el momento, se necesitan más estudios para recomendar el empleo de biocarbono como práctica para disminuir las pérdidas de nitrógeno mediante la emisión a la atmósfera de gases invernadero.

Para reducir el calentamiento global se debe considerar tanto al N_2O como al CO_2 y al CH_4 (metano) ya que pueden ocurrir interacciones entre los ciclos del C y del N y entre los procesos de oxidación del metano, nitrificación y desnitrificación, que determinarán las emisiones netas de N_2O y CH_4 de lo suelos. En estos casos, se debe tener precaución ya que las estrategias para disminuir la emisión de un gas pueden favorecer la emisión de los otros. Además, las estrategias que se empleen deben adaptarse a las situaciones socio-económicas locales, y a las condiciones ambientales y de productividad de la zona.

Para diseñar estrategias más específicas hay que aumentar el conocimiento científico sobre la desnitrificación, particularmente de los procesos que resultan en la formación de N_2O. Pero aún mas importante es descifrar la vida microbiana que sustenta estos procesos para asegurar sus sostenibilidad en el futuro, de manera que ninguna opción de manejo agrícola que se imponga para disminuir las emisiones de gases invernadero tenga efectos adversos sobre la diversidad y el funcionamiento de las poblaciones de microorganismos que intervienen en el ciclo del N.

Seminario Marzo 2014

TECNICAS Y MATERIALES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN Y LA DISMINUCIÓN DE LA EUTROFIZACIÓN DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL EN EL OLIVAR DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA

Gerardo Garrido Basterrechea

Ingeniero Técnico Agrícola

1. INTRODUCCIÓN

El nivel de vida y desarrollo de una sociedad se puede medir por el nivel de conservación de su paisaje. Ello es debido a que toda sociedad que se precie de avanzada, no dejará el desarrollo las infraestructuras urbanas ni rurales a la libre decisión de sus promotores, sino que las condicionará a una normativa ambiental y al consiguiente establecimiento de una serie de medidas preventivas, correctoras o compensatorias que de alguna manera minimicen el impacto de la actividad.

Por otra parte, el **cambio climático** es un hecho ampliamente demostrado, y una de las **consecuencias** más importantes del cambio climático es la **pérdida de suelo por erosión**.

Para la zona en la que nos encontramos son frecuentes **pérdidas de suelo** por erosión entre 50-100 Tm/Ha. y año.

Como consecuencia de la erosión del terreno, se afectan las infraestructuras rurales y urbanas, **las tierras dejan de ser productivas**, se deterioran las aguas de escorrentía, los ríos y arroyos, y las aguas subterráneas (los acuíferos). Se pierden rentas agrarias y consecuentemente se abandonan las tierras que durante siglos han sido sustento de su población, por lo que el avance de la erosión **conlleva el abandono de los municipios** rurales y a la **desertificación.**

Así, todo proyecto de carreteras, de urbanización, de corrección de ríos, de transformación de cultivos, etc., que incide manifiestamente sobre el

paisaje o le medio natural, se le exigirá un proyecto de restauración ambiental en el que se deben contemplar distintas técnicas preventivas y correctivas para mantener la calidad del medio natural afectado y de su entorno.

Dentro de las técnicas destinadas a paliar los daños causados por el uso del suelo, nos vamos a fijar en las que están basadas en técnicas blandas (de bioingeniería) y específicamente en aquellas que hacen uso de materiales prefabricados adecuados para el control de la erosión de uso en restauración vegetal de todo tipo de infraestructuras.

Foto 1 Ejemplo de restauración ambiental

2. LA EROSIÓN HÍDRICA: TIPOS, CAUSAS Y CONSECUENCIAS

La erosión como fenómeno geológico natural, se define como el proceso cíclico que, por la acción del agua, siguen los materiales superficiales del suelo desde su disgregación, arrastre (transporte y abrasión) hasta su sedimentación.

Los tipos de erosión hídrica:

- **Laminar:** pérdida por escorrentía de elementos finos (casi imperceptible)
- **En regueros:** puntos de desagüe natural de las escorrentías, allí donde se concentra la erosión laminar.
- **En bloques**: consecuencia de las diferencias estructurales (texturales) de sus componentes sobre los que actúan de forma generalmente conjunta la erosión hídrica, eólica y térmica.
- **Lixiviación o percolación**: producida de forma vertical a través de los materiales estructurales del suelo o de las obras de infraestructura (pavimentos, canalizaciones, muros, etc)

La erosión se ve favorecida en sus distintos procesos de disgregación, transporte, abrasión y sedimentación por la actividad humana.

Las causas de erosión hídrica se deducen de su propia definición, siendo el grado de riesgo de erosión o la importancia de la misma lo que realmente nos interesa, y estará en función de:

- **Tipo de suelo:** textura, estructura, composición, etc.
- **Humedad del suelo.**
- **Tipo de precipitación** (frecuencia, tamaño e intensidad de la gota, nieve, etc.)
- **Cubierta existente.**

Por tanto, la erosión hídrica incide de forma muy negativa sobre la actividad humana:

1. Por pérdida de suelo fértil: pérdida de productividad.

2. Sobre las infraestructuras, donde se va a manifestar sobre todo en:

- Taludes y laderas: estabilización
- Drenajes y vaguadas: sedimentación
- Calidad del agua: eutrofización de las aguas

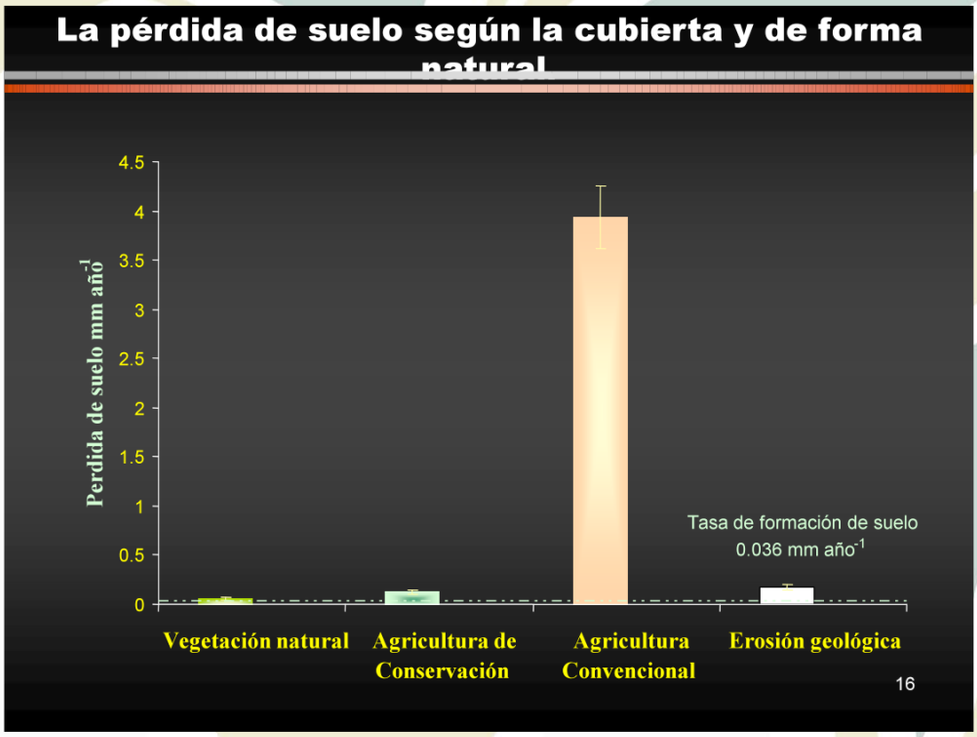


Figura 1. La pérdida de suelo según la cubierta y de forma natural

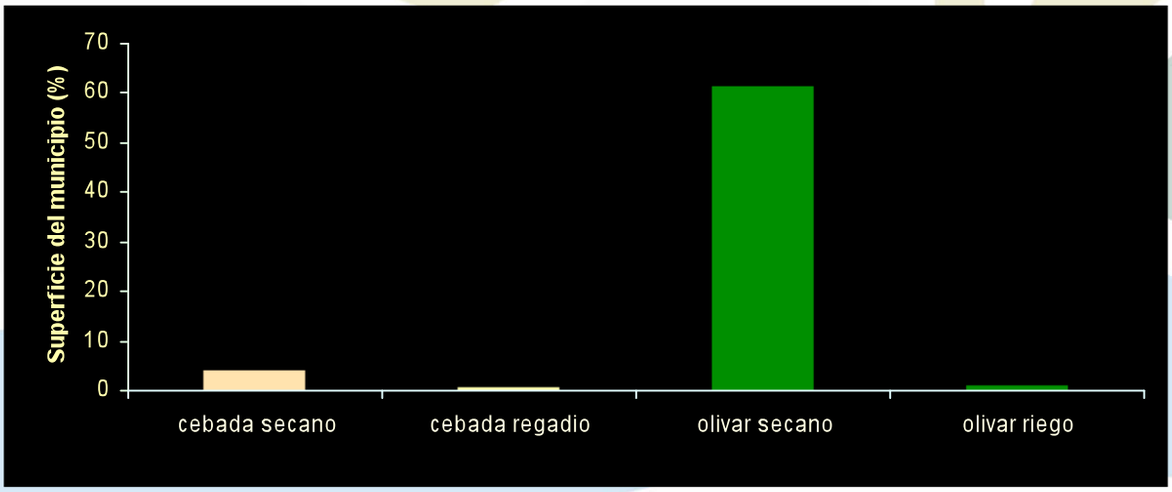


Figura 2. La distribución de la superficie en Campotéjar (Granada)

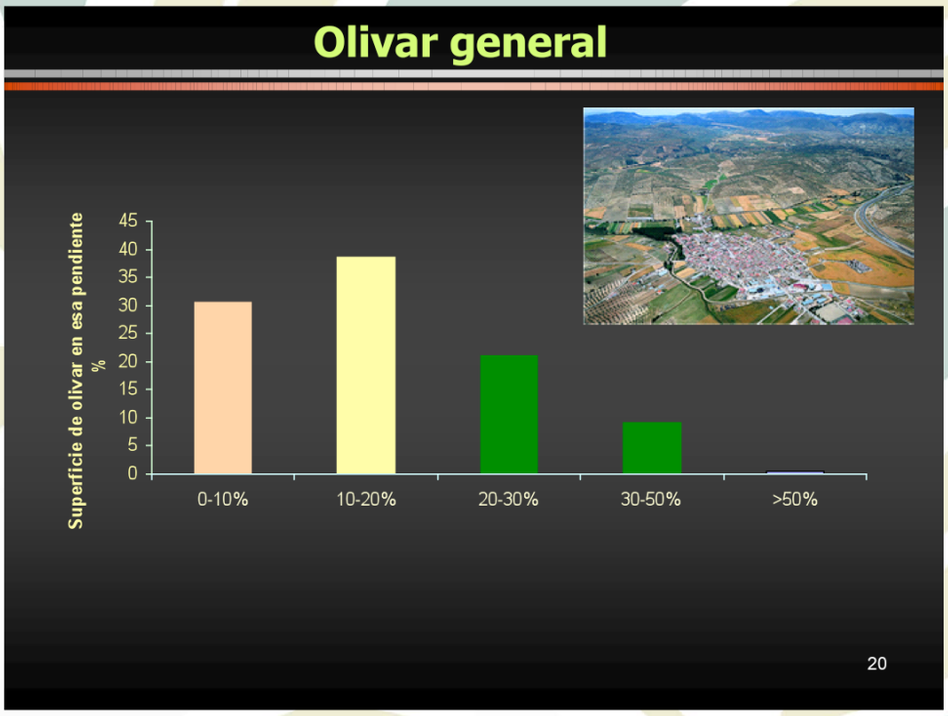


Figura 3. Olivar en pendientes

Y en sus consecuencias en:

- En la colmatación o socavamiento de drenajes (mantenimiento)
- Estabilidad de las estructuras (mantenimiento).
- En las afecciones sobre su entorno: vecinales.
- Sobre los asentamientos de población, la accidentalidad del tráfico rodado (8% accidentes con víctimas).
- Estética paisajística y calidad de vida: sobre vecinos y el turismo.

Figura 4. Consecuencias de la erosión

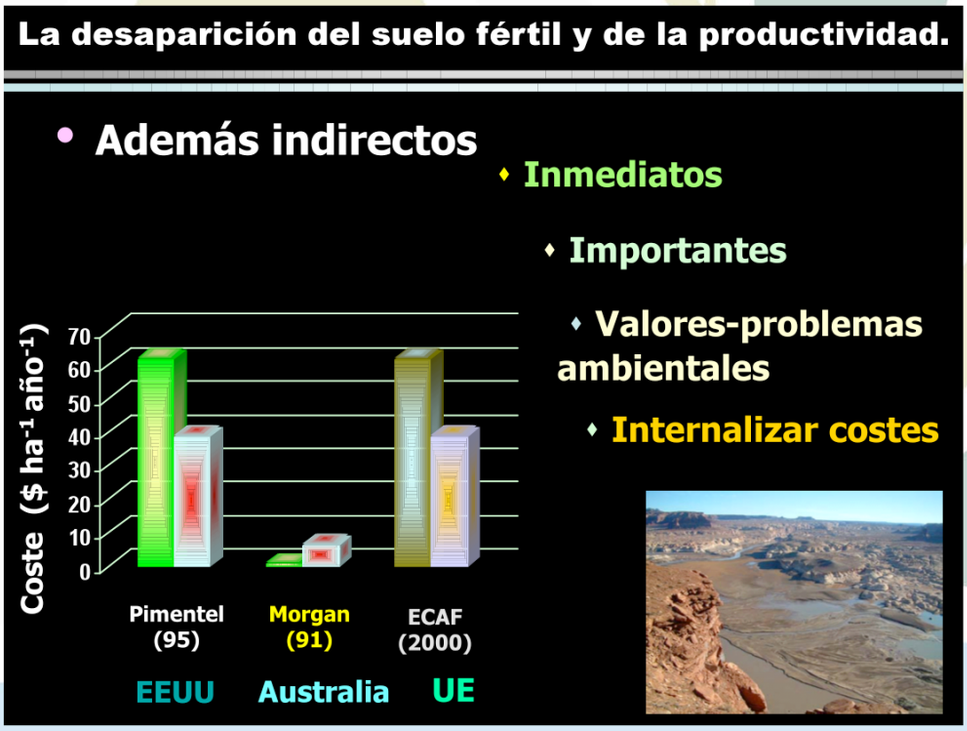


Figura 5. Los costos de la erosión

La incidencia de la desaparición de la capa de suelo superficial (fértil) sobre la pérdida de productividad, es el principal daño económico en el que se incurre como consecuencia de la erosión. Se ha demostrado para la Cuenca Hidrográfica del Guadalquivir, donde pérdidas de suelo medias están en 40 Tm/ha y año, en 40 años se habrían perdido 153 mm de suelo, que tienen una incidencia directa sobre la disminución de la capacidad del suelo para infiltrar 26mm menos de agua al año, que se ha determinado que supone una pérdida de cosecha de aceite de hasta 130 Kg/Ha y año.

3. MALAS PRÁCTICAS HABITUALES EN LA AGRICULTURA

Algunas prácticas habituales en agricultura aceleran el proceso de degradación y erosión del suelo:

- Eliminar cubierta vegetal.
- Monocultivo.
- No aportar materia orgánica, quema de rastrojos y ribazos.
- Laboreo profundo y con volteo.
- Carga ganadera excesiva.
- Empleo excesivo de herbicidas, fitosanitarios y abonos químicos.
- Eliminar setos, lindes, herrizas, sotos y bosques de galería
- **"Echar al rio"** o las cárcavas escombros, leñas y ramas, basura, etc.

Con **estas prácticas se acelera la erosión** afectando a diferentes aspectos y propiedades del suelo, produciendo su degradación:

1. **Degradación Física.** Afecta a la capacidad de infiltración y absorción de agua, el suelo se compacta, se encharca, se crea costra bajo la superficie o sobre ella, disminuye la profundidad útil del suelo…

Foto 2. Escombros sobre cárcavas afluentes al Arroyo Juncarón.

2. **Degradación Química.** Afecta a la capacidad natural de retención de nutrientes, se produce salinización, bloqueos de nutrientes, disgregación del terreno, encharcamiento…

3. **Degradación Biológica.** Afecta a la fertilidad natural del suelo, disminuyen los organismos benéficos que viven en el suelo, la materia orgánica no se descompone, se pierden nutrientes, las raíces de las plantas pierden capacidad de absorción, las plantas se debilitan, el terreno se compacta,…

Al mismo tiempo que se **compromete seriamente la calidad de las aguas** superficiales y subterráneas favoreciendo **la eutrofización.**

Foto 3. Degradación del arroyo Juncarón por acumulación de escombros y herbicidas.

4. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE RESTITUCIÓN Y CONSERVACIÓN DEL MEDIOAMBIENTE

Las técnicas habituales de aplicación en restitución medioambiental, que pueden dar solución a la problemática de corrección planteada, las podemos clasificar en tres grandes grupos:

- Las estructurales: muros, encachados y drenajes
- Las vegetales: siembras y plantaciones
- Los tratamientos complementarios

4.1. MATERIALES PARA MUROS, ENCACHADOS Y DRENAJES

Las obras estructurales para el control de la erosión los podemos clasificar en:

- Muros de pié de taludes
- Muros de encauzamiento y/o sedimentación de sólidos
- Encachados
- Cunetas y bajantes

Muros de pié de taludes

Cuando los taludes son muy verticales, presentan algún problema de estabilidad o de falta de espacio para su construcción, se requiere de muros, que normalmente necesitan de un cálculo estructural previo, de forma que al disminuir la altura de caída libre de las tierras, puede servir de soporte de las mismas, presentando mejores posibilidades de revegetación.

Estos muros pueden ser ejecutados a base de algunos materiales como:

- gaviones metálicos con mampostería o rellenos de tierra y vegetación
- mampostería de escollera para revegetar
- de tierra reforzada (muros verdes)
- de estructuras de madera y ramaje.

Foto 4. Muro verde con revestimiento de mallazos metálicos y mantas orgánicas

Muros de encauzamiento y sedimentación

Generalmente se construyen a base de hormigón, mampostería o gavionados, aunque es cada vez más frecuente plantear estas obras a base de técnicas y materiales de bioingeniería tal y como

- gaviones revegetados
- tierra reforzada con estructuras metálicas cerradas con mantas o geotextiles
- biorrollos vegetados
- estructuras de madera.

Son estructuras que se construyen para reconducir las aguas de los cauces al situarlos longitudinalmente al cauce, o para provocar la sedimentación de los sólidos arrastrados mediante la colocación transversal de los mismos.

Foto 5. Estructuras direccionales de flujo a base de biorrollos y estacas de madera

Encachados.

En taludes con pendientes próximas al 1/1, que requieren una especial protección contra la erosión puesto que han asegurar estructuras de importancia, como pasos a distintas alturas, cimentaciones, etc. se pueden cubrir los taludes resultantes con piezas prefabricadas huecas de

hormigón, gaviones de revestimiento, o mantas persistentes que integren el suelo y la vegetación.

Los gaviones flexibles de revestimiento tienen la ventaja sobre los gaviones convencionales o las piezas prefabricadas en hormigón, de presentar mayor adaptabilidad al terreno de asiento y más permeabilidad a la vegetación, con lo que su integración paisajística es mejor.

Foto 6. Revestimiento gavionado flexible en la salida de un paso inferior de una carretera

Cunetas y bajantes.

Constituyen los elementos fundamentales de drenaje superficial de cualquier infraestructura vial, y son con frecuencia de difícil construcción y mantenimiento, si no se han adoptado las técnicas de adaptación de la obra a su entorno.

Así, se suelen ver bajantes fracturadas por la erosión, cunetas aterradas que conducen sus aguas turbias a los pasos inferiores de la obra, donde se sedimentan, etc. Ello es debido fundamentalmente a una falta de control de la erosión de los taludes, y al empleo habitual del hormigón y otros materiales poco flexibles para la construcción de las bajantes, ya que el efecto de la disgregación y arrastre del suelo recién modificado

por los movimientos de tierra de la obra, es muy importante. Por otra parte, los elementos construidos a base de hormigón, constituyen estructuras rígidas poco amoldables a la elasticidad y curvatura propia de un terreno.

Por todo ello, estructuras a base de mantas orgánicas y piedras o escolleras en seco (rampas de piedra), puedan dar buenos resultados en la realización de bajantes, teniendo además la ventaja de su mayor integración con el entorno vegetal.

Con este tipo de estructuras de BI., más orgánicas, se aumenta la rugosidad y laminación de las escorrentías de agua, facilitando la sedimentación, disminuyendo los arrastres de sólidos y, por tanto, mejorando la calidad de las aguas recogidas en esta red de drenaje superficial.

Foto 7. Diferencia entre drenaje natural y drenaje con manta orgánica

4.2. MATERIALES PARA SIEMBRAS Y PLANTACIONES

4.2.1. Siembras e hidrosiembras.-

Las siembras que se realizan en la restitución del paisaje, las podemos dividir en:

- Siembras en seco o semillados.
- Hidrosiembras.

Siembras en seco o semillados

Las siembras en seco son las técnicas de utilización habitual en la agricultura tradicional.

Están constituidas por semillas o mezclas de semillas y fertilizantes, que se extienden directamente sobre el terreno, de forma manual o mecánica, sobre las superficies resultantes de la obra llanas o de moderada pendiente, al objeto de iniciar las primeras fases de la revegetación creando con ellas las condiciones adecuadas para la formación de un suelo fértil capaz de controlar la erosión y de recibir estratos vegetales más maduros (árboles y arbustos).

Se realizan con tractores y sus aperos de labranza, abonado y siembra, así como remolques extendedores de estiércol, esparcidores de paja, o aperos propios de la formación de praderas, como escarificadores, ruleteadores, esparcidores de semillas, etc.

La elección de especies vegetales estará en función de las condiciones del medio en el que han de desarrollarse, ya que suele ser muy adverso y es preciso elegirlas entre las que poseen determinadas especificaciones tales como:

- rapidez de germinación
- poder tapizante
- enraizamiento vigoroso
- periodo vegetativo prolongado
- de gran producción de semillas

- capacidad de competir con otras malas hierbas indeseables en la restitución
- resistencia a plagas y enfermedades

Además, el diseño de las mezclas de semillas a realizar debe estar inspirado en los siguientes principios:

- Adaptación a las distintas condiciones climáticas y edafológicas de la obra.
- Rusticidad
- Capacidad de colonizar suelos infértiles
- Coexistencia con distintos sistemas radicales
- Distinta capacidad fotosintética para adaptarse a situaciones más o menos soleados.
- Mantenimiento reducido
- Producidas comercialmente o de posible adquisición en el mercado

Hidrosiembra

La hidrosiembra es quizás la técnica más habitual en la restitución paisajística, sobre todo cuando son taludes o laderas con pendientes mayores del 3/1, sobre los que la siembra va a quedar adherida en superficie, sin enterrar, al objeto de crear un tapiz vegetal precoz sobre un suelo sin vegetación de forma que controle la erosión del suelo, y a la vez propiciar las condiciones adecuadas para que se pueda instalar la vegetación natural.

La hidrosiembra consiste en la aplicación a presión hidráulica de una suspensión homogénea de semillas y otros aditivos opcionales, tales como: mulch, estabilizadores o adherentes de suelos y de la mezcla y fertilizantes.

La maquinaría empleada consiste en una cuba montada sobre un camión o un remolque, con distintas capacidades, habitualmente entre 1500 y 12000 lts., dotada de un agitador mecánico que realiza la mezcla

homogénea, y que mediante una bomba a presión y una boquilla distribuidora (cañon) proyecta la mezcla sobre la superficie a tratar. A esta bomba se le puede adaptar una manguera de longitud adecuada a su presión, al objeto de acceder a aquellos espacios a los que no llega el cañón directamente desde la cuba.

Los aditivos más habitualmente empleados en las hidrosiembras son:

1) Los **mulches para hidrosiembras** son materiales generalmente orgánicos que extendidos sobre el suelo aumentan su capacidad de campo, ejercen un efecto tampón sobre su temperatura, mejoran su microbiología y disminuyen la erosión. En definitiva ejercen el '**efecto mulch sobre el suelo**'.

2) Los **estabilizadores para hidrosiembras** son sustancias, que en solución acuosa con otros materiales, aplicadas sobre el suelo penetran en él y al desecarse, adhiere la mezcla entre las partículas terrosas dándole consistencia y permeabilidad.

Estos **estabilizadores** pueden ser naturales de orígenes vegetales y/o sintéticos. Habitualmente para un **estabilizante concentrado,** como el empleado por nosotros, la dosis recomendada es un 1% del peso del mulch, envasado en sacos de 25 Kg.

3) Los hidrorretenedores son sustancias que consiguen aumentar la capacidad de retención de agua del suelo, cediéndola poco a poco a medida de las necesidades vegetales. Son más bien recomendados para su uso en plantaciones por la posibilidad de mezclar estos productos con la tierra y no quedar en superficie, donde sus efectos serán mucho más limitados.

4) Los ácidos húmicos y fúlvicos estimulan la acción del sistema radicular.

5) Bioactivadores microbianos. Su misión es estimular la flora microbiana del suelo favoreciendo la nitrificación y acumulando sustancias biológicamente activas. Se suministra en garrafas de 1l.

6) Otros productos aditivos a la hidrosiembra son: abonos, colorantes para mulches, repelentes de fauna, fungicidas …

4.2.2. Plantaciones

Con la plantación de especies arbóreas y arbustivas, que han sido cultivadas en vivero o que son obtenidas en estacas o esquejes tras las labores de desbroce, limpieza, entresaca o poda de material vegetal sano de ramblas, lindes o ribazos. Se contribuye al desarrollo de comunidades vegetales estables, pioneras o intermedias de la sucesión vegetal, que de forma natural tardarían mucho tiempo en instalarse.

La creación de hábitats naturales, además de favorecer el valor paisajístico de la zona, promueve la diversidad faunística y vegetal del área recuperada.

El éxito de la plantación, depende, en gran medida, de los siguientes factores:

- la elección de las especies
- la preparación del terreno
- los métodos de implantación
- **y de las labores de mantenimiento**

Para seleccionar las especies vegetales que mejor han de cumplir los objetivos de la restauración, hay que seguir las siguientes etapas:

- Definición de los usos previstos para el área a recuperar
- Análisis de las características del medio natural de la zona: geología, edafología, hidrología, climatología, etc.
- Inventario de las comunidades vegetales locales y regionales.

Una vez establecidas las especies que potencialmente han de recuperar el medio natural de la zona de actuación, será necesario estudiar con más detalle algunas de las características y exigencias de las propias plantas, como:

- capacidad de integración en el paisaje
- resistencia a plagas y enfermedades
- poder de penetración de las raíces

- capacidad para captar agua
- **demanda de elementos nutrientes**
- facilidad de obtención en vivero
- resistencia a tracción para su utilización en obras de bioingeniería.
- disponibilidad en el mercado, etc.

4.3. MATERIALES PARA TRATAMIENTOS COMPLEMENTARIOS O MIXTOS

Dadas las características particulares de determinadas situaciones de pendientes muy pronunciadas, terrenos muy erosionables, estructura rocosa, etc, es necesario aplicar técnicas especiales para conseguir la integración de la vegetación en estas superficies de una forma eficiente.

Además de acortar la longitud de los taludes mediante la construcción de bermas, terrazas, muros, etc., algunas de las técnicas y materiales utilizados para la restauración vegetal, son los siguientes:

- instalación de mallas metálicas.
- colocación de geomallas, geoceldas, o geosintéticos
- **extendido de mantas y mallas orgánicas**
- **biorrollos y colchones orgánicos**

En nuestro curso nos fijaremos fundamentalmente en estas dos últimas técnicas al ser las más blandas, de menor coste y de mayor sostenibilidad ambiental.

Foto 8. Biorrollos instalados por "Campotéjar erosión 0"

4.3.1. Mantas y mallas orgánicas

Con frecuencia la red de drenaje de la carretera o de las infraestructuras, presenta serios problemas al olvidar que la misma se asienta sobre un terreno no consolidado superficialmente, con determinados riesgos de erosión, que pueden inducir a un sobre dimensionamiento de la propia red, con el encarecimiento consiguiente de la obra, o a una destrucción parcial de la misma red. Este problema tiene frecuentemente su solución en la consecución del control de suelo del entorno de la red, a través de la vegetalización del mismo.

Para ello se recurre a las hidrosiembras y plantaciones, pero estos elementos de la obra no constituyen una estructura suficiente como para soportar los procesos erosivos con los que habitualmente se encuentran estos márgenes de la red de drenaje.

Se puede recurrir a geotextiles, geomallas, entramados tridimensionales sintéticos o encachados de piedra trabada o en seco, pero el coste de estos elementos es elevado y no siempre consiguen una buena adherencia o consolidación de los suelos. De ahí surge la necesidad de un elemento blando, orgánico, y estructurado, capaz de dar coherencia a las partículas de suelo y de fijar con ello la vegetación espontánea o a

implantar sobre el mismo consiguiendo mejorar notablemente la eficiencia de la restauración.

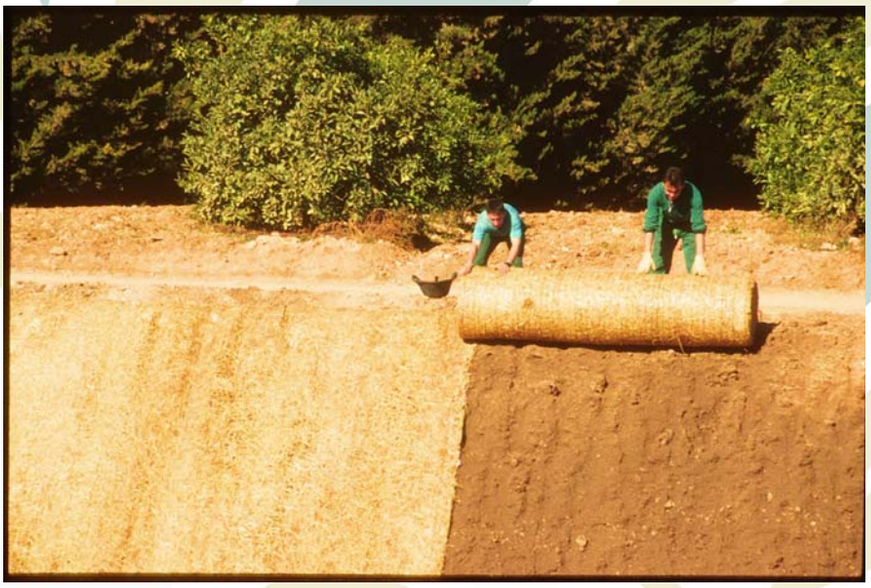


Foto 9. Instalación de mantas en taludes de márgenes de cultivos.

Definición de Manta Orgánica: Tipos y aplicaciones.

Encuadrándose la manta orgánica dentro de los productos relacionados con los geotextiles, se define como un producto textil tridimensional, no tejido agujado, permeable, sintético o natural, empleado para la regeneración y la conservación de la calidad agronómica de los suelos y el control de la erosión, que sirviendo como estabilizador del cuello de las plantas y mejorante del terreno de asiento, ayuda a la implantación o establecimiento vegetal.

Su composición es muy variable, siendo indicada en función del tipo de fibra y de geomalla utilizada para sus distintas aplicaciones (ver tablas 1 y 2). Según BonTerra Ibérica, que presenta una clasificación más internacionalmente conocida, los tipos de mantas son entre otros:

- **S:** Manta orgánica 100% paja.

- **SE:** Manta orgánica 50% paja – 50% esparto.
- **SK:** Manta orgánica 50% paja – 50% coco.
- **K:** Manta orgánica 100% coco.
- **E:** Manta orgánica 100% esparto.
- **EK:** Manta orgánica 50% esparto – 50% coco.
- **Ky o Ey:** Manta 100% orgánica de coco o esparto con mallas de yute.
- **P:** Manta 100% polipropileno verde.
- **2ER:** Manta 100% esparto. Doble densidad. 2 redes de refuerzo.
- **E3R:** Manta 100% esparto. Doble densidad. 3 redes polipropileno negras, con 1 al menos de refuerzo.
- **K3D o E3D:** Manta orgánica tridimensional, con al menos tres mallas, una al menos volumétrica de coco, y fibra de coco o esparto.
- **BK:** Biorrollo estructurado en fibra de coco.
- **CK:** Colchón estructurado en fibra de coco.

Tabla 1. Guía de selección de productos prefabricados orgánicos por aplicaciones y tipo de erosión.

Tipo de Actuación	**Taludes**	**Cunetas, cárcavas**	**Muros**	**Fajinados**	**Soporte trepadoras**
Tipos Mantas	S, SE, SK, K, E, EK, Ky, Ey, K3D,E3D	E,K,P,2ER,E3R	K3R, E3R	BK, CK	2ER
Tipo Erosión	Laminar	Regueros	Lavado	Laminar y regueros	Eólica

Tabla 2.- Guía de selección de mantas en taludes o cauces.

Pendiente *Tipo de Talud*	**3:1**	**2:1**	**1:1**	**Cauces/Canales**
Hasta 5 m	S	SE/SK	SE/SK	E/K/P
Hasta 25m	S	SE/SK E/K	SE/SK E/K K3D ó E3D	E/K/P
Hasta 40m	SE/SK	E/K	E/K K3D ó E3D	E/K/P
Más de 40m	E/K	E/K	E/K K3D ó E3D	E/K/P

Instalación de mantas orgánicas

En el proceso de instalación de las mantas orgánicas es preciso resaltar la necesidad de estar el suelo desnudo de vegetación y otros elementos gruesos al objeto de lograr mayor adaptabilidad de la manta a las irregularidades del terreno, forrándose el contorno de las cárcavas y barranqueras, precisando por ello un cierto nivel de perfilado del talud.

Experiencias realizadas sobre taludes de carretera.

Al objeto de poder constatar si ciertamente lo que las casas comerciales fabricantes de este tipo de productos, muchas veces de importación, son de utilidad práctica en nuestro clima mediterráneo, se realizaron dos tipos de experiencias durante el invierno y primavera del año 1996.

La primera de ellas fue realizada por el profesor Antonio Navarro Quercop, catedrático de Jardinería y Paisajismo de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Orihuela, al objeto de cuantificar la cantidad de sólidos arrastrados y niveles de supervivencia de plántulas sobre taludes en terraplén, de la Variante de Molina (Murcia), utilizando solo dos tipos de mantas (tipo E y K de la marca BonTerra).

Foto 10. Taludes en terraplén de la variante de Molina (Murcia)

Esta experiencia fue presentada durante la Primera Conferencia Europea de la IECA (1996)de Sitges (Barcelona) y en el III Congreso Nacional de Medio Ambiente, figurando entre sus resultados los siguientes:

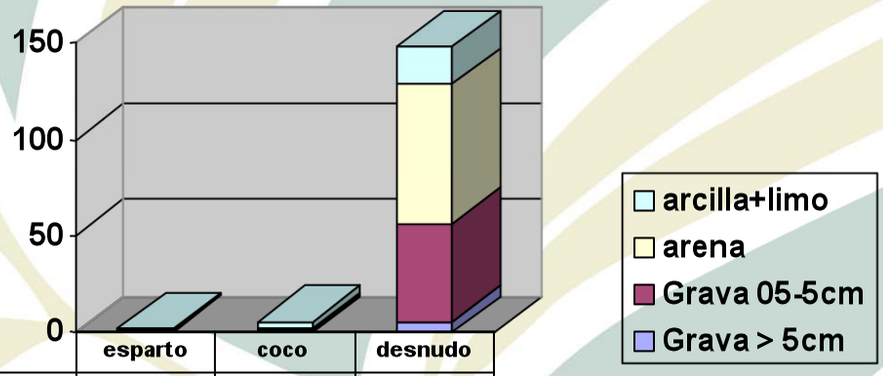
- La velocidad de impacto de la gota de lluvia será mayor en el suelo desnudo que en la manta de coco, y menor en la de esparto, ya que ésta por sus características de gramaje, más grueso y más espeso, amortiguará más el impacto. Por la misma razón habrá una disminución en el tamaño de la gota, así como en la intensidad la que impacta en el suelo.

- La cantidad de suelo transportado por salpicadura está regida por la capacidad de transporte de las gotas y la facilidad de las partículas terrosas a ser transportadas. Por tanto, dadas las características de las mantas comentadas, será menor en la parcela cubierta con manta de esparto, seguida de la de coco y en mayor proporción en el suelo desnudo.

- Pérdida menor de suelo sobre la parcela protegida con manta de esparto (1,6 Tm/Ha y año), seguida de la protegida con manta de coco (5,2 Tm/Ha y año), y un máximo de suelo perdido (148,4 Tm/Ha y año) para la parcela con suelo desnudo. (Ver figura 1).

- La disgregación por abrasión o por escorrentía, será función del caudal, velocidad y turbulencia del flujo, así como de la cantidad y naturaleza de los materiales, estando en el orden suelo desnudo > coco > esparto.

- El desarrollo general de la plantación con especies autóctonas de la zona, es muy superior en las parcelas protegidas con manta respecto de las parcelas con suelo desnudo, sobre las que existe un riesgo evidente de desaparición de las plantas por efecto de la pérdida de suelo que exista en estas parcelas.



	esparto	coco	desnudo
arcilla+limo	0,956	3,385	19,737
arena	0,363	1,258	72,27
Grava 05-5cm	0,254	0,53	51,049
Grava > 5cm	0,025	0,026	5,342

Figura 6. Cantidad de suelo arrastrado en las parcelas ensayadas (A.Navarro 1996)

Definición de mallas orgánicas y aplicación

Las redes orgánicas pueden ser por definición geomallas o georedes (con nudos), que tienen en común la formación de una estructura plana, regular abierta, cuyos elementos constitutivos son mucho menores que sus aberturas, funcionando a tracción en aplicaciones geotécnicas y de restauración de la vegetación como elementos de refuerzo del suelo con granulometrías gruesas o de mantas orgánicas. Pueden ser de fibra de coco o de yute, siendo por las características de la fibra empleada la que definirá el tipo de aplicación y su coste.

Foto 11. Vista de una muestra de malla de coco

4.3.2. Biorrollos

Los biorrollos son estructuras cilíndricas de distintos espesores (10 a 60 cm.) y densidades, compuestas por un saco de mallas sintéticas o naturales (coco) de longitudes varias, y relleno de fibras generalmente naturales de paja, coco o esparto, permeables a la captación de finos del suelo, y de plantas y semillas, pero de gran resistencia a la acción del agua de manera especial si han sido vegetados. De ahí su conveniencia de instalarlos ya vegetados en vivero para instalarlos en condiciones de humedad adecuada.

Su aplicación es, como vimos en el capítulo de las técnicas estructurales (muros de encauzamiento o sedimentación), como estructuras direccionales del flujo de agua como repié de taludes de las márgenes de arroyos y ríos , o bien como **transversales** al mismo en laderas y taludes a modo de fajina, que presenta la gran ventaja añadida de su maleabilidad a las curvaturas y asentamientos diferenciales del terreno, con lo que su adaptación es mayor que las fajinas convencionales de ramas y maderas, como también lo es su resistencia a la tracción longitudinal y transversal y su capacidad de filtrado de finos de suelo y de retención de plantas.

Foto 11. Ejemplos de biorrollos

Foto 11. Ejemplos de aplicaciones de biorrollos

5. EL CONTROL DE LA EROSIÓN EN EL PROYECTO LIFE+ EUTROMED

Entre todas las técnicas referidas anteriormente, la propuesta realizada para el tratamiento preventivo y correctivo de la erosión y la contaminación difusa procedente de los fertilizantes y fitosanitarios agrícolas en el proyecto LIFE+ EUTROMED, se basó en una repetición adecuada de estructuras transversales plantadas, situadas sobre los canales (cárcavas) de desagüe natural de las aguas en las laderas del cultivo de olivar que, reteniendo sedimentos contaminados, las plantas en estas estructuras implantadas sean capaces de nutrirse de estos contaminantes.

Para ello, una vez reconocido el entorno natural sobre el que intervenir y la tipología de las cárcavas existentes, se consideraron tres tipos o modelos de actuación que se describe en el cuadro siguiente:

ML TRATAMIENTO 1.- CADA 5 ML, ANCHURA 3 M. PARA CÁRCAVAS HASTA UNA PROFUNDIDAD DE 0,5 M.
Ml Tratamiento de cárcava, mediante anclaje de biorrollo de esparto o paja de 15 cm de diámetro Tipo BE15 o BS15 Bonterra, anclado con picas de 10 mm y 0,65 m de largo cada 50 cm, atado todo con alambre, colocados transversalmente cada 5 m lineales. Además cada 25 m lineales, atado de gavión flexible 0,3 cm de diámetro, relleno de gravillón, y colocación sobre el anterior de biorrollo de esparto de 30 cm de diámetro Tipo BE30 Bonterra , anclado con picas 10 mm y 0,8 m cada 50 cm, atado todo con alambre. Plantación de especies retenedoras de contaminación cada 0,33 m por encima del biorrollo.
ML TRATAMIENTO 2.- CADA 3 ML, ANCHURA 6 M. PARA CÁRCAVAS HASTA UNA PROFUNDIDAD ENTRE 1-1,5 M.
Ml Tratamiento de cárcava, mediante anclaje de biorrollo de esparto o paja de 30 cm de diámetro Tipo BE30 o BS30 Bonterra, anclado con picas de 10 mm y 0,8 m de largo cada 50 cm, atado todo con alambre, colocados transversalmente cada 3 m lineales. Además cada 15 m lineales, atado de gavión flexible 0,3 cm de diámetro, relleno de gravillón, y colocación sobre el anterior de biorrollo de esparto de 30 cm de diámetro Tipo BE30 Bonterra , anclado con picas 10 mm y 0,8 m cada 50 cm, atado todo con alambre. Plantación de especies retenedoras de contaminación cada 0,33 m por encima del biorrollo.
ML TRATAMIENTO 3.- CADA 3 ML, TRATAMIENTO DE 6 M TRANSVERSAL ENCADENADOS LONGITUDINALMENTE. PARA CÁRCAVAS DE PROFUNDIDAD MAYOR DE 1,5 M Y ANCHO DE FONDO DE 3-6 M
Ml Tratamiento de cárcava, mediante anclaje de gavión flexible 0,3 cm de diámetro y 6 m de longitud, relleno de gravillón, y colocación sobre el anterior de biorrollo de esparto de 30 cm de diámetro y 12 m de longitud, Tipo BE30 Bonterra, anclado con picas 10 mm y 0,8 m cada 50 cm, atado todo con alambre. Plantación de especies retenedoras de contaminación cada 0,33 m por encima del biorrollo.

Se tratará en definitiva de una repetición de tratamientos de mayor o menor intensidad en función de la resistencia a la fuerza erosiva, que deban soportar, empleando materiales asequibles y manejables, tal y como fibras naturales y piedras del lugar, que ensacándose entre mallazos sintéticos de larga duración, fijándose al suelo mediante zanjas de atado y picas de acero o madera, para evitar su arrastre en condiciones de máxima pluviosidad, ayudaran a fijar las plantas de gran demanda en nutrientes, que eliminarán la contaminación, tal y como se puede ver en el gráfico siguiente:

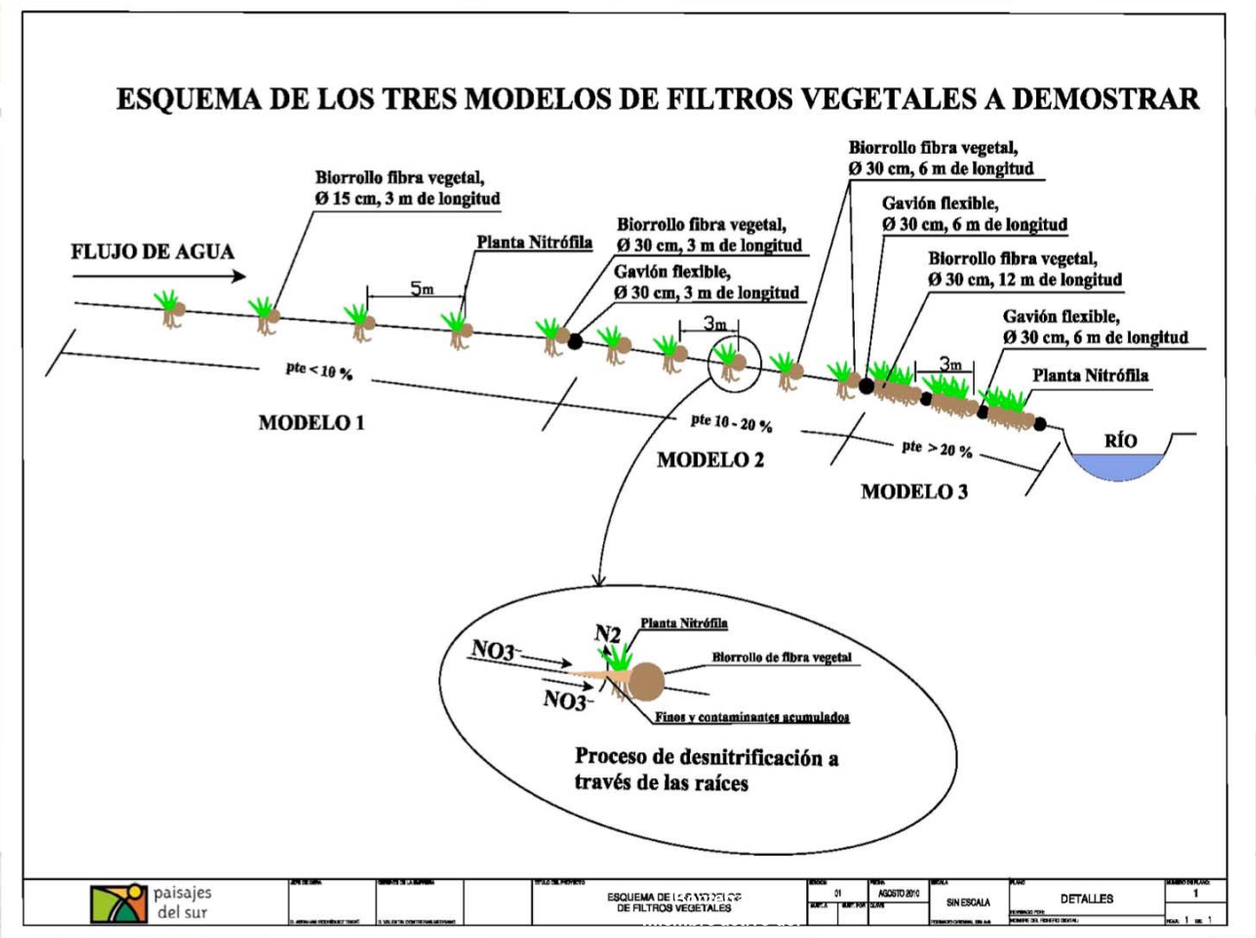


Figura 7. Esquema de los modelos de filtros vegetales a emplear

LIFE+: EUTROMED

Apertura de zanjas y fi jación de fajinas o biorrollos

Diputación de Granada Medio Ambiente · BonTerra Ibérica S.L. · paisajes del sur · Cofinanciador: Junta de Andalucía Consejería de Medio Ambiente

LIFE+: EUTROMED

Las visitas para constatar la viabilidad del proyecto.

Diputación de Granada Medio Ambiente · BonTerra Ibérica S.L. · paisajes del sur · Cofinanciador: Junta de Andalucía Consejería de Medio Ambiente

Foto 12. Control de erosión y retención de contaminación

6. CONCLUSIONES

Las técnicas y materiales de ingeniería del paisaje y de bioingeniería son de aplicación en la restauración de cárcavas y barranqueras, y en la conservación de nuestro entorno rural, ya que:

- Mejoran el funcionamiento de la red de drenaje de la infraestructura agraria (barrancos), aumentando la rugosidad y laminando las escorrentías, facilitando la sedimentación, y mejorando la calidad de las aguas.
- En experiencias realizadas, alguna de las técnicas más comúnmente aplicadas, han conseguido eficacias en el control de la erosión de hasta el 99%.
- Estas técnicas suelen constituir un recurso inherente al terreno sobre el que se va a intervenir, con gran % de generación de empleo (hasta 50%)

- Pueden constituir sistemas naturales de filtrado y fitodepuración y/o biorremediación de las aguas de escorrentía y residuales de pequeños núcleos de población.
- Mejoran las relaciones ecológicas del medio aumentando la biodiversidad y su sostenibilidad.
- Estas técnicas han de constituirse en un instrumento imprescindible en el diseño, construcción y mantenimiento de las infraestructuras Agrarias, favoreciendo la relación entre distintos sectores productivos y de servicios, fomentando el desarrollo sostenible.

BIBLIOGRAFIA

- Metodología para la elaboración de estudios de impacto ambiental. Carreteras y Ferrocarriles. Varios M.O.P:T. (1989).
- Técnicas de revegetación. Luis Ramos Otero del Peral. El capítulo de las plantaciones en la Contratación de las Infraestructuras Viarias. Ministerio de Fomento. (1997).
- El Control de la Erosión de suelos con Mantas Orgánicas: Experiencias y Aplicaciones prácticas. Valentín Contreras Medrano. I Congreso Hispano-Portugués sobre carreteras y Medio Ambiente (1998).
- Manual de estabilización y revegetación de taludes. Varios. (1999).
- Control de la erosión en taludes, mediante el uso de tejidos elaborados con fibras orgánicas. Antonio Navarro Quercop y otros. III Congreso Nacional de Medio Ambiente (1996)
- Criterios a la hora de proyectar restauración fluvial mediante ingenieria biológica. Paolo Cornelini e Giuliano Sauri. Jornada de Bioingeniería en el ámbito fluvial mediterráneo. Salt. Gerona (2007)
- Erosión y degradación de suelos. Capítulo del libro "Sostenibilidad de la producción de olivar en Andalucía". Gómez, J.A., Giráldez, J.A. (Ed. científico Gómez, J.A.) Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.Junta de Andalucía. ISBN: 978-84-8474-276-0, de la versión impresa.

eutromed

Prevención de la eutrofización
por nitrógeno agrícola

Diputación de Granada

Granada es Provincia

BonTerra® Ibérica S.L.

paisajes del sur