

XII. RIESGOS DERIVADOS DE LOS PROCESOS NATURALES

1. CUESTIONES GENERALES

1.1. DEFINICIONES

El riesgo natural, en sí mismo, es la mayor o menor probabilidad de que se produzca un daño o catástrofe social en una zona, debido a la actividad de un proceso natural. Partiendo de esta consideración sintética y muy general, deben matizarse diferentes puntos, así:

1.º) Siempre hay una interferencia, potencial al menos, entre procesos naturales y sociales, de lo contrario el concepto de riesgo no tiene sentido. Por ello el riesgo implica, en sí mismo, una evaluación.

2.º) En el análisis de riesgos deben diferenciarse términos como:

- *Peligrosidad*: se refiere al proceso natural en sí mismo, y trata de clarificar su sistema de relaciones intrínsecas, valorando su potencialidad como causante de transformaciones en el medio, independientemente de que en él haya o no actividad social. Es evidente que determinados procesos naturales, son en sí mismos más «peligrosos» que otros.
- *Interferencia*: se refiere a la mayor o menor «adecuación» entre el proceso natural y el proceso social. Es evidente que en estos casos, el proceso natural es «pasivo en su actuación» o, si se quiere, «determinista», ya que actúa en una zona y de una forma dada. Es, por tanto, el proceso social el «activo» o «posibilista» (nosotros somos los que interferimos, en uno u otro grado). De ello se de-

ducen grados de adecuación o interferencia y, por tanto, medidas preventivas, sean activas o pasivas. Es decir, la actuación sobre el proceso natural para disminuir su peligrosidad o derivar su interferencia, o bien sobre el proceso social para evitar dicha interferencia.

- *Daño*: hace mención al proceso social en sí mismo, y trata de clarificar su sistema de relaciones intrínsecas, valorando el carácter de las transformaciones sufridas o potenciales.

En este campo se miden parámetros económicos, culturales, vivenciales, sentimentales, etc. Se trata, pues, de abordar costos mercantiles (daños en la producción) y sociales (daños a las personas). Acorde con esto, se deducen grados asumibles de riesgo, lo que incide directamente en la planificación de una zona sometida a la actividad de procesos naturales peligrosos.

- *Catástrofe social*: es la transformación efectiva de un riesgo en un daño. La magnitud de la catástrofe dependerá de los diferentes costos.

En definitiva, en el concepto de riesgo natural entran parámetros muy similares a los manejados en el de impacto, esto es: interferencia, transformación, situación inicial y final, costo, etc., y por ello debemos incidir también en el término evaluación.

Teniendo en cuenta lo anterior y como medio para esa evaluación, diríamos que el concepto de riesgo natural es inverso al de impacto y puede definirse asociado a él, esto es: el análisis y evaluación de riesgos naturales es un método de

confrontación entre los procesos naturales y sociales, mediante el cual tratan de deducir los cambios de valor (o la modificación de las cualidades) que pueden producirse en el medio social, debido al normal desarrollo de los procesos naturales.

1.2. EVALUACION DE RIESGOS

Para realizar esta labor deben tenerse en cuenta tres parámetros fundamentales:

1. Casuística del proceso natural, es decir, sus características en cuanto a modalidad y funcionalidad. Se trata de establecer el tipo de proceso, sus leyes físicas, para intentar precedir sus variables espaciales y temporales (localización geográfica, ocurrencia, magnitud, recurrencia, etc.) así como su intensidad transformadora o peligrosidad intrínseca.

Aquí la diferencia entre un sistema físico (que nos aporta datos sobre la modalidad, energía, repartición, etc.) y uno geológico o histórico (que nos define parámetros evolutivos) es fundamental para poder predecir ocurrencias. Ello incide directamente en teorías globales sobre ritmicidad, ciclos evolutivos, etc. (caso de sistemas estables, inestables, evolución gradual o catastrófica, etc.).

2. Área afectada por el proceso natural, es decir, su repartición espacial. Para ello es preciso conocer el resultado o producto que se asocia a cada proceso (llanura aluvial, cono volcánico, franja sismotectónica, etc.), su fisiografía o morfología, en suma: la geografía del mismo. Este es el punto fundamental a la hora de concretar cartografías de riesgos naturales.

3. Implicación social, es decir, repercusiones concretas que dichos procesos pueden tener en la actividad social.

Las implicaciones sociales son el fundamento básico de las medidas preventivas y/o restauración de daños.

En suma, la conjunción de esos tres parámetros, posibilita una evaluación de los riesgos naturales. Allí donde la peligrosidad o el costo lo indiquen, deben tomarse las medidas adecuadas, acordes con una escala en la cual se establece desde el máximo riesgo asumible al mínimo evi-

table, señalándose aquél que, de ocurrir, conllevaría daños catastróficos.

Aun cuando sea difícil concretar escalas, como referencia puede establecerse la siguiente:

0. *Zona libre de riesgo* (Natural y/o inducido). Se entiende que ésta es teórica, máxime cuando introducimos el riesgo inducido, que luego comentaremos. En cualquier caso sería una zona libre para cualquier actividad sin necesidad de medida alguna.

1. *Zona con riesgo muy bajo netamente asumible*. Únicamente se aconsejan medidas preventivas, a través de la planificación del tipo de actividad, de manera que se eviten probables riesgos inducidos.

2. *Zona de riesgo bajo asumible*. En este caso son necesarias medidas preventivas del mismo tipo (a nivel de planificación), que eviten riesgos inducidos «muy probables en la zona».

3. *Zona de riesgo medio*. Sólo asumible con medidas preventivas disuasorias, en el tipo de actividad y localización, que eviten riesgos inducidos y zonas críticas.

4. *Zona de riesgo alto*. Sólo asumible con medidas preventivas activas y pasivas. En estos casos, se necesitan medidas disuasorias en el tipo de actividad, localización y densidad de ocupación, que eviten riesgos inducidos e interferencias en planes de evacuación, es decir, en medidas preventivas de carácter activo. También estas últimas, serían necesarias en el control de zonas críticas mediante posibles correcciones, así como redes de alerta y planes de evacuación y restauración de posibles daños.

5. *Zona de riesgo muy alto*. No asumible bajo ningún supuesto. Se entiende que éste es también un concepto teórico derivado de «lo asumible o no». Indudablemente, hoy se utilizan terrenos aluviales y volcánicos sometidos a muy alto peligro y sus pobladores «asumen» el riesgo (al menos desde la perspectiva económica). De esta manera, limitando el uso para asentamientos, el problema se reduce a sus costos mercantiles.

A pesar de la relatividad de «lo asumible o no», lo cierto es que la evaluación implica una zonificación territorial definiendo aptitudes de uso.

1.3. MEDIDAS FRENTE A LOS RIESGOS

Las medidas se clasifican, según las diferentes competencias, en: científicas y técnicas, de protección civil, económicas y legales.

Las científicas y técnicas implican los estudios y su aplicación derivada a la clasificación del proceso, su cartografía, su corrección, etc.

Las de protección civil implican la defensa de los ciudadanos frente a este tipo de eventos, lo cual incide directamente en las redes de alerta, planes de evacuación, etc.

Las económicas y legales implican responsabilidades subsidiarias en la restauración de los posibles daños, y sus costos económicos y sociales, que pueden implicar responsabilidades penales y similares.

De acuerdo con lo anterior, se establecen dichas medidas en:

— Preventivas:

Pasivas (también llamadas no estructurales), evitando las interferencias y, por tanto, los riesgos y daños. Se concretan en una planificación disuasoria para los usos (función técnica y científica).

Activas (también llamadas estructurales), evitando o aminorando las interferencias y los daños. Se concretan en redes de predicción y alerta (mixtos entre la función técnica y científica y la de protección civil), corrección (función técnica) y evacuación (función de protección civil).

— No preventivas.

Compensadoras, van dirigidas fundamentalmente a paliar los daños y, como es lógico, se trata de labores de restauración asumiendo los costos económicos derivados. En general, y entre tanto no haya un plan de ordenación específico que defina las responsabilidades derivadas, el responsable subsidiario es la sociedad, es decir, los organismos competentes de la Administración.

Día a día, sin embargo, este tipo de problemas está siendo derivado al usuario del territorio que ha de asumir los costos de sus posibles pérdidas, con lo que se han propagado planes de pólizas de seguros frente a determinados riesgos y propiedades.

El costo social en vidas es, evidentemente, imposible de compensar aun cuando existan ayudas económicas. A estos efectos, únicamente son de utilidad las medidas preventivas. En cualquier caso, si aún así se producen catástrofes, la solidaridad del resto de la población (canalizada o no por sectores sociales como protección civil y similares) tomará la responsabilidad de afrontarlas con las medidas adecuadas.

1.4. CLASIFICACION DE LOS RIESGOS

Dada la asociación procesos-riesgos, éstos se clasifican según la modalidad de los primeros.

En este contexto se pueden diferenciar los riesgos naturales, los sociales o tecnológicos y los inducidos, que se situarían entre ambos.

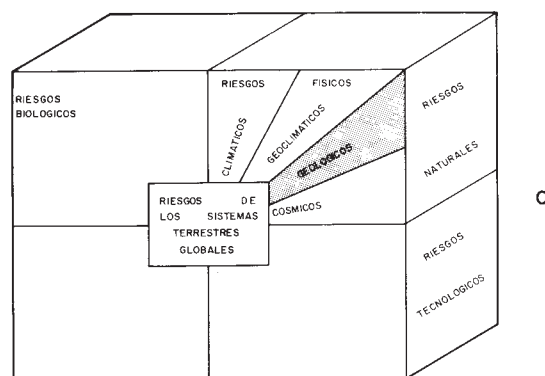
En el campo de los riesgos naturales, la tendencia es a clasificarlos según el tipo de agente que los produce (riesgos físicos, biológicos, geológicos) y, dentro de cada clase, según la actividad o acción principal: volcanes, sismos, procesos fluviales, glaciares, etc., tal como se muestra en las Figuras XII.1 y XII.2

2. EROSION

2.1. DEFINICIONES

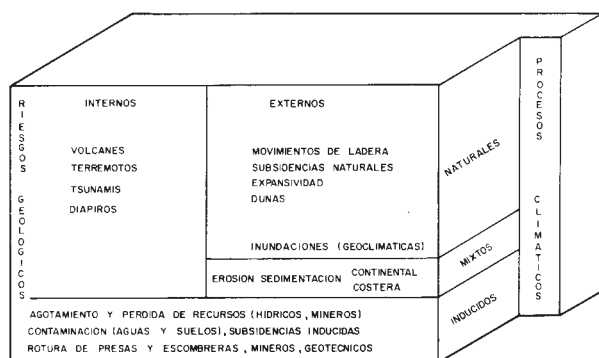
Erosión: Del latín «erodere», a su vez de «e» y «rodere», corroer desde fuera.

FIGURA XII.1.—LOS RIESGOS GEOLOGICOS EN EL CONJUNTO DE LOS RIESGOS
(Según AYALA, 1988)



α

FIGURA XII.2.—CLASIFICACION DE LOS RIESGOS GEOLOGICOS
(Según AYALA, 1988)



Se denominan así todos los variados procesos de destrucción de las rocas y arrastre del suelo, realizados por agentes naturales *móviles* e *inmóviles*.

Existen una serie de términos de significado más concreto, englobados en el concepto de *erosión*:

- El desgaste mecánico por agentes físicos (ríos, viento, etc.) constituye la *corrosión*.
- El desgaste químico es la *corrosión*, llamándose también así el fenómeno de abrasión por partículas que transporta el viento.

La mayor parte de los procesos desarrollados por agentes esencialmente inmóviles se incluyen en el término *meteorización*. La meteorización llevada a cabo por vía química es la *descomposición* y la que se realiza por vía mecánica es la *desintegración*.

2.1.1. División según el agente erosivo

2.1.1.1. Erosión hídrica

Se define como el proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por la acción del agua.

El ataque del agua al suelo se realiza de dos formas:

- Ataque superficial: se traduce en una disgregación, dispersión y arrastre de las partículas del suelo.
- Ataque en profundidad: la actuación de las aguas crea unas condiciones propicias en

el perfil del suelo para que éste se desplace por la acción de la gravedad.

La erosión hídrica es el tipo de erosión más importante y de efectos más perjudiciales en nuestro país. Ella, pues, será el principal objeto de estudio en las próximas páginas.

2.1.1.2. Erosión eólica

Se define como el proceso de barrido, abrasión y arrastre de las partículas del suelo por la acción del viento.

El ataque se realiza de dos formas:

- Arrastre o barrido: el viento levanta y arrastra las partículas sueltas que se hallan sobre la superficie del suelo; este proceso se denomina *deflación*.
- Abrasión de las rocas: el viento arrastra arena y polvo u otros elementos cortantes en suspensión y los frota contra las rocas; este proceso se denomina *corrosión*.

La erosión eólica, a excepción de algunas zonas de las dos Castillas y otras muy determinadas, apenas tiene importancia en nuestro país. Se hará, pues, escaso hincapié en ella.

2.1.1.3. Otros tipos de erosión

En este Apartado cabría hacer mención de la erosión marina, erosión glaciaria, etc., pero estos tipos de erosión carecen de importancia en el contexto de este trabajo o, al menos, su importancia es mucho menor.

2.1.2. División según la forma de manifestarse

Todos los siguientes tipos aluden a las formas de erosión hídrica, que constituyen las manifestaciones más frecuentes en España. También son los términos más usados en las clasificaciones posteriores.

- Laminar: se manifiesta por la remoción de delgadas capas del suelo extendida más o menos uniformemente a toda la superficie. Resulta de la disgregación de los elementos

terrosos por el impacto de las gotas de lluvia y por la escorrentía. De este modo, el conjunto agua-tierra discurre a lo largo de las pendientes como una lámina, y el suelo se va degradando por capas sucesivas.

- En regueros o surcos: se manifiesta por el arrastre de elementos terrosos al correr el agua por la superficie del suelo, ocasionando la formación de surcos o regueros orientados, más o menos normalmente, a las curvas de nivel. La formación de estos regueros ocurre cuando el agua no escurre uniformemente por toda la superficie, sino que corre concentrada en corrientes de una potencia erosiva capaz de abrir pequeñas incisiones en el suelo.
- En barrancos o cárcavas: se manifiesta por profundas incisiones del terreno originadas generalmente cuando existe una gran concentración de escorrentía en alguna zona determinada.
- Coladas de lodo: se manifiesta por desplazamientos de tierra en forma de fluido viscoso por efecto de la gran cantidad de agua embebida por el suelo.
- Deslizamientos: pueden ser:
 - Superficiales: cuando una capa superficial de terreno resbala por efecto de la gravedad y de la gran cantidad de agua embebida.
 - De fondo: cuando una capa permeable resbala sobre otra más profunda de naturaleza impermeable (arcillosa) por haberse formado un plano lubricado.
- Reptación: se manifiesta por un movimiento lento e imperceptible de una delgada película superficial del suelo en el sentido de la pendiente por causas muy variadas.
- En túnel: se manifiesta por hundimientos y deslizamientos debido a la formación de flujos subterráneos, o a la existencia en el subsuelo de grandes cantidades de constituyentes solubles que dejan cavernas.

Ambos conceptos constituyen dos enfoques diferentes en la resolución del problema a plantear en un estudio del medio físico. Ambos conceptos pueden ser, por separado, motivo de estudio, clasificación y cartografía.

Esa es la razón de contemplar los dos aspectos por separado, aunque, a veces, existen concomitancias entre los mismos, que se irán señalando.

Erosión actual:

Con este término se designa a la erosión que existe en un determinado lugar en el momento presente, y que será objeto de medida y cartografía, sin perjuicio de que dicha erosión no pueda seguir manifestándose al mismo ritmo y de la misma forma en el futuro. Esto es, de la medida de la erosión actual podrá deducirse muchas veces la evolución del fenómeno en el futuro, si no cambian las circunstancias actuales. Sin embargo, no es este dato lo que interesa, sino la medición de una situación «de facto».

Erosión potencial. Erosionabilidad:

Con este término se designan la susceptibilidad a la erosión, y la erosión que se prevé va a tener lugar en el futuro en una determinada zona. En este caso interesa la medida de lo que «puede ocurrir o va a ocurrir», no de lo que hay. Y la medida de lo que va a ocurrir hay que hacerla a través de factores o elementos del medio que se conocen y cuyos datos pueden ayudar a predecir el fenómeno. Esta es la diferencia fundamental: normalmente, el estudio de la erosión actual se lleva a cabo directamente, y el de la erosionabilidad a través de las variables que van a condicionar el proceso erosivo.

Una variable que condiciona el proceso erosivo es el cambio de uso del suelo del área de estudio en cuestión. En estos casos tratará de predecirse la calidad y cantidad de la erosión que va a producirse como consecuencia del cambio de las circunstancias que concurren en la zona y, a menudo, esta erosión será diferente de la que existe en el momento actual.

2.1.3. Erosión actual y potencial

Bajo el epígrafe general de *erosión* van a estudiarse dos aspectos fundamentales de ésta: la erosión actual y la erosión potencial.

2.2. IMPORTANCIA Y RELACIONES

La inclusión de la erosión en los estudios del medio físico se justifica, resumidamente, por la importancia de los siguientes puntos:

- Detectar los lugares donde la erosión se encuentra más avanzada para intentar la corrección y salvaguardia del medio.
- Detectar las zonas más sensibles a la erosión, máxime cuando se proyecta un cambio de uso del suelo altamente perturbador, para regular las acciones e incidir lo mínimo posible sobre dichas zonas.
- Detectar los lugares donde el fenómeno erosivo es, o puede ser, más intenso, con el fin de evitar los perjuicios sobre las obras humanas (embalses, cultivos, construcciones diversas, etc.).

Respecto de la relación de la erosión con los elementos o características del medio, cabe hacer dos consideraciones:

- Es un factor complejo, dependiente de otros (vegetación, clima, suelo, pendientes, etc.).
- Aporta información adicional no explícita o ni siquiera implícita en esos elementos, aisladamente estudiados.

La constatación del primer punto se justifica sin más que acudir a los siguientes epígrafes de estas páginas. El estudio de la erosión está basado en los elementos que la originan (el clima) y en los elementos que la regulan (el suelo, la cubierta vegetal, etc.). Por esta razón, un estudio de erosión debe ir íntimamente unido al estudio y cartografía de los elementos relacionados con ella. En este sentido, la erosión guarda relación con:

- Clima.
- Suelo.
- Relieve.
- Cubierta vegetal.

El segundo punto también es obvio, en tanto se trata de un *proceso* en el que se manifiestan ciertas interrelaciones entre distintos elementos.

2.3. INVENTARIO

2.3.1. Objetivos

En los puntos siguientes se exponen las formas o métodos de efectuar un inventario para un estudio de erosión o en el que la erosión sea una

parte integrante del mismo. Dichos métodos se refieren, en su mayoría, a la erosión hídrica. Solamente una clasificación y un método tratan de la erosión eólica. Ya se mencionó en líneas anteriores su escasa importancia en nuestra península.

Los métodos de inventariación, las diferentes clasificaciones, atienden, como se verá, a medir la intensidad del fenómeno erosivo. La erosión no es un elemento de naturaleza corpórea como otros (vegetación, geomorfología, etc.). La erosión es un proceso y, como tal, interesa medir la clase de intensidad de dicho proceso. Por tanto, para inventariar y cartografiar las unidades de erosión (tanto actual como potencial) es necesario conocer detalladamente las variables o factores que intervienen en el proceso erosivo, y esto para cada caso particular, así como también su forma de manifestarse y sus consecuencias futuras. Solamente así podrá disponerse de una información utilizable para un estudio físico en el que se pretende llegar a una asignación de usos del suelo.

Las clasificaciones que se exponen en los epígrafes siguientes son cualitativas, cuantitativas o de ambos tipos. Se pretende que todas ellas sean útiles para llegar a una debida parcelación del territorio.

Algunas clasificaciones explican la forma de manifestarse la erosión; otras, el grado que alcanza aquélla, midiendo el espesor de suelo arrastrado o los horizontes de suelo erosionado. Y otras, por fin, muestran la cantidad de suelo (en t/ha/año) que se pierde en el proceso.

2.3.2. Herramientas

Para el inventario de la erosión (actual y potencial) es necesario disponer de una serie de herramientas.

De acuerdo con las relaciones señaladas anteriormente, se comprende la necesidad de disponer de una cartografía adecuada referente a:

- Clima.
- Suelo.
- Geomorfología.
- Vegetación.

Los aspectos fundamentales de cada elemento que interesa conocer y cartografiar en cada caso son:

Clima

Intensidad y régimen de precipitaciones, así como su distribución en el área de estudio considerada; intensidad y régimen de vientos dominantes; distribución y régimen de temperaturas.

Suelo

Tipos de suelos; textura y estructura, litología o composición mineralógica; pedregosidad.

Geomorfología

Forma y textura del relieve; configuración de las pendientes.

Vegetación

Configuración y clase de la vegetación; calidad de la misma; cantidad o espesura.

En algunos casos especiales, la erosión también puede guardar relación con otros aspectos no enumerados, tales como geología, hidrología, hidrogeología, etc., y, por lo tanto, será necesario disponer de esta información.

Otra herramienta válida para este tipo de estudio es la foto aérea, que sirve, entre otras cosas, para detectar la existencia de erosión y sus formas; su intensidad; formas locales de manifestarse, etc. Es, desde luego, una herramienta complementaria a los trabajos de campo.

Si el inventario de erosión se efectúa a través de los elementos con los que se relaciona, también es obvia la utilización de fotogramas aéreos. El estado y la clase de vegetación pueden ser usados como delatores de la erosión. Otro tanto ocurre con el relieve, hidrología, etc.

Un procedimiento muy útil consiste en comparar dos series de fotogramas tomados en intervalos de diez o más años. Es condición necesaria que éstos sean de calidad similar y se hayan obtenido en la misma estación del año.

Los tipos de erosión que pueden detectarse son :

Erosión hídrica

Erosión en regueros; erosión en cárcavas; erosión laminar.

Erosión fluvial

Daños por inundaciones.

Erosión eólica

Fase erosionada por el viento; fase severamente erosionada; fase de depósitos eólicos; fase de montículos eólicos.

Otros tipos de acciones

Deslizamientos; fuegos; salinizaciones, etc.

Conviene advertir que la ausencia aparente de erosión en fotografías aéreas no implica que ésta no pueda darse. La prospección de campo es, pues, indispensable.

2.4. TECNICAS DE EVALUACION Y PREDICCION DE LA EROSION

El tema de la evaluación del riesgo de erosión y la cuantificación de las pérdidas de suelo es una de las cuestiones más debatidas en el campo de la planificación de usos del suelo de manera que, hoy en día, no existe una metodología común ni única. Los diversos métodos desarrollados para la evaluación y predicción de la erosión han evolucionado desde formulaciones puramente descriptivas, enraizadas en los modelos de la geodinámica externa, hasta modelos matemáticos complejos, basados en las leyes físicas que regulan el proceso de la erosión del suelo por los agentes erosivos. Los primeros facilitaron la interpretación de los mecanismos erosivos y la identificación de sus causas y efectos, mientras que los modelos últimos aparecen como alternativas válidas a las fórmulas empíricas estandarizadas.

Una posible clasificación de las metodologías propuestas para el estudio de la erosión hídrica puede hacerse atendiendo a los objetivos que se persiguen con su utilización. Podemos distinguir así tres tipos generales de técnicas:

- Destinadas a determinar el grado actual de erosión mediante la identificación de formas erosivas y la clasificación de terrenos.

- Los métodos de análisis de los riesgos de erosión y de elaboración de una cartografía temática de riesgos.
- Las técnicas cuantitativas de estimación de pérdidas de suelo y modelización matemática.

El conjunto de estos métodos y técnicas se pueden aplicar a tres tipos de unidades territoriales fundamentales para abordar el estudio de la erosión:

- Unidades territoriales (elaboradas al efecto) de carácter homogéneo en cuanto a las variables que intervienen en el fenómeno erosivo y que no tienen por qué poseer una ligazón especial con la topografía del terreno. Muchas veces el estudio se detiene en la simple determinación de tales unidades y su clasificación según su significado respecto a la erosión.
- Unidades ya preestablecidas que se encuentran íntimamente ligadas a la topografía y al fenómeno de erosión: nos referimos a las cuencas de drenaje.
- Unidades preestablecidas de tipo geométrico que no poseen ninguna ligazón con la topografía ni otros caracteres del fenómeno erosivo (por ejemplo la utilización de una malla cuadrada para parametrizar los factores de un modelo de erosión).

2.4.1. Erosión actual. Inventariación y clasificación de terrenos

La inventariación de la situación actual del fenómeno erosivo en un territorio puede realizarse mediante toma de datos en el campo apoyada por la utilización de sensores remotos (fotografía aérea, teledetección, etc.). El objetivo es evaluar la presencia y grado de intensidad de las distintas formas de erosión: erosión laminar, regueros, barrancos, movimientos en masa...

Las clases de erosión acelerada y las fases erosionadas se cartografían y se establecen principalmente por su importancia en cuanto al uso y manejo del suelo: Un cierto grado de erosión tiene un significado diferente en tipos distintos de suelo y en regiones distintas; por lo tanto, las clases de erosión no se pueden definir en términos físicos precisos aplicables a todos los suelos. El

número de clases de erosión que se deben reconocer, así como sus definiciones, dependen de los objetivos perseguidos, de la importancia que tenga la erosión en el caso concreto, de la escala del mapa y de la cobertura vegetal dominante.

2.4.1.1. Clasificación del Soil Survey Staff, U. S. (1951)

Recomienda el uso de cuatro clases de erosión, de aplicación preferente a zonas agrarias:

Clase 1 («Fase ligeramente erosionada»)

El suelo tiene pocos surcos o manchas con el horizonte A, disminuido en espesor, lo cual evidencia que la erosión no llega a alterar mucho el espesor y carácter del horizonte A. Excepto en suelos que tienen horizontes A muy delgados, (menos de 20 cm), el suelo superficial (Ap) se compone totalmente de horizonte A en casi toda el área delineada. Hasta cerca del 25 por 100 del horizonte A original o de la capa arable original en suelos de horizonte A delgado, puede haber sido eliminada de la mayor parte del área. En la mayoría de los suelos, las áreas con esta clase de erosión no son significativamente diferentes, en cuanto a capacidad y requerimientos de manejo, de los suelos no erosionados. Cuando exista una capa no consolidada muy superficial sobre una capa discordante, o un horizonte A delgado sobre una costra de arcilla (claypan) o costra dura (hardpan) puede ser que la diferencia sea significativa.

Clase 2 («Fase moderadamente erosionada»)

El suelo ha sido erosionado hasta un grado tal que las operaciones ordinarias de cultivo atraviesan lo que queda del horizonte A, o bien alcanzan más abajo de la capa arable original en suelos con horizontes A delgados. Generalmente las capas arables están formadas por una mezcla de los horizontes A originales y los horizontes subyacentes inmediatos. Las áreas de suelos erosionados usualmente tienen manchas en las que las capas arables consisten totalmente en horizonte A original y otras manchas formadas de horizontes subyacentes. Se pueden encontrar en esta clase cárcavas poco profundas. Del 25 al 75 por 100 del horizonte A original o del suelo superficial puede haberse perdido en la mayor parte del área.

Clase 3 («Fase severamente erosionada»)

El suelo ha sido erosionado hasta un punto en que todo o prácticamente todo el horizonte A o el suelo superficial, ha sido removido. La capa arable consta principalmente de materiales del horizonte B o de otros horizontes subyacentes. En las áreas de esta clase pueden quedar incluidas manchas en las cuales la capa arable está formada por una mezcla de los horizontes A y B u otros horizontes subyacentes. En algunos tipos de suelos son comunes algunas cárcavas superficiales y aun unas pocas profundas. Dentro de las áreas incluidas en esta clase pueden encontrarse zonas donde ha desaparecido más del 75 por 100 del suelo superficial o capa arable y comúnmente parte o todo el horizonte B u otros horizontes subyacentes.

Clase 4 («Tierra con cárcavas»)

El terreno ha sido erosionado hasta un punto en que presenta una combinación intrincada de cárcavas profundas o de moderada profundidad. Los perfiles del suelo han sido destruidos casi totalmente, excepto en pequeñas zonas entre cárcavas. Tales terrenos, en sus condiciones actuales, no son apropiados para el cultivo. Mejorar estos suelos para llevarlos a una condición que permita el cultivo agrícola o el establecimiento de pastos es difícil, pero puede ser posible si las otras características son favorables y si la erosión puede controlarse.

La utilización de las clases de erosión anteriores se encuentra íntimamente ligada a la cartografía de suelos; tanto es así que las cuatro clases deben definirse específicamente e interpretarse para cada tipo de suelo.

En levantamientos detallados, básicos, ordinarios, estas clases son suficientes, aunque se pueden presentar casos en que sea necesario recurrir a subdivisiones en alguna clase, pero no son aptas para muchos tipos de suelos, como los regosoles muy arenosos, en los que la erosión laminar, por ejemplo, tiene poca o ninguna significación y es muy difícil de medir. En estos casos no es práctico cartografiar o distinguir fases erosionadas, a excepción de las de la clase 4. Para los suelos esqueléticos, en general, es adecuado distinguir una fase erosionada, ya que la falta de horizonte B bien definido hace impracticable la distinción entre las clases de erosión 2 y 3. En estos

suelos, la fase erosionada incluye aquellos en los que la mayor parte del horizonte A se ha perdido y los cuales tienen una capa arable que consiste principalmente o enteramente en materiales procedentes de horizontes subyacentes.

2.4.1.2. Clasificación de la erosión laminar

Se debe a la U. S. National Cooperative Soil Survey y es muy similar a la anterior, aunque mucho más resumida. Contiene cuatro clases que se refieren a la erosión laminar:

Erosión ligera	Remoción y arrastre del 25 por 100 de la capa superficial arable (menor de 5 cm).
Erosión moderada	Remoción y arrastre del 25-75 por 100 de la capa superficial arable (5-15 cm).
Erosión severa	Remoción y arrastre de más del 75 por 100 de la capa superficial arable y de parte del subsuelo (más de 15 cm).
Erosión muy severa . . .	Remoción y arrastre de la mayoría del perfil del suelo.

Según esta clasificación, y a título orientativo, en Michigan (U. S. A.) se consideran normales las siguientes cifras:

- Erosión ligera: < 7,41 t/ha/año.
- Erosión moderada: 7,41-19,77 t/ha/año.
- Erosión severa: 19,77-32,13 t/ha/año.
- Erosión muy severa: > 32,13 t/ha/año.

2.4.1.3. Clasificación de la erosión en regueros

Para clasificar la erosión en regueros, el U. S. Soil Conservation Service (1951) emplea los criterios que se señalan a continuación:

1. Ocasionales: Menos de tres regueros por acre (1 ha = 2,47 acres) o regueros separados por más de 100 pies (1 pie = 30,48 cm).
2. Frecuentes: Cuatro o más regueros por acre y separados menos de 100 pies, pero más del 75 por 100 del área se encuentra drenada por los regueros.
3. Muy frecuentes, o regueros muy grandes y destructivos.

2.4.1.4. Clasificación de la erosión en taludes

Para la erosión a lo largo de los taludes de las carreteras, DEBELLE (1971) propugna:

1. Erosión laminar	Diminutos reguerillos ocasionalmente presentes.
2. Erosión en reguerillos.	Reguerillos hasta 15 cm de profundidad.
3. Erosión inicial en regueros	Numerosos pequeños regueros de 15-30 cm de profundidad.
4. Marcada erosión en regueros	Numerosos regueros de 30-60 cm de profundidad.
5. Erosión avanzada	Regueros o surcos de más de 60 cm de profundidad.

2.4.1.5. Clasificación del Manual de Evaluación de Suelos (STORIE, 1970)

Tiene la particularidad de considerar conjuntamente los factores hídricos y eólicos. Se ha incluido, no obstante, en este apartado por la preponderancia de la erosión hídrica.

E.1	Erosión ligera; menos del 25 por 100 de la capa superficial eliminada; puede tener cárcavas poco profundas.
E.2	Erosión hídrica moderada; erosión laminar moderada con cárcavas poco o moderadamente profundas; hasta un 50 por 100 de la capa superficial eliminada; el subsuelo aparece en algunos lugares.
E.3	Erosión hídrica grave; con casi toda la capa superficial eliminada, de tal manera que el subsuelo se muestra en más del 50 por 100 del área erosionada; cárcavas de tamaño moderado.
E.5	Erosión hídrica muy grave; pérdida de toda la capa superficial y parte del subsuelo; terreno cortado por cárcavas profundas.
E.6	Deslizamientos de tierra, por lo general donde se ha acumulado excesivamente el agua en el subsuelo; con frecuencia ocurre en terrenos de arcilla endurecida.
2 W	Erosión eólica moderada; con formación de pequeñas dunas.
3 W	Erosión eólica intensa; apilamiento de material arenoso en grandes dunas. + Depósito perjudicial de material del suelo arenoso en las tierras más bajas.

2.4.1.6. Clasificación de la erosión y el uso de maquinaria agrícola

Cuando un grado elevado de erosión corresponde a un espesor efectivo reducido a la capa superficial, la utilización inmediata del suelo para

finés agrícolas es muy limitada. Cuando la erosión se traduce en la presencia de surcos y barranqueras, las limitaciones son principalmente consecuencia de los obstáculos físicos que ellas representan. Los surcos y barranqueras constituyen obstáculos físicos para la utilización agraria del suelo, pudiendo valorarse las limitaciones resultantes de su existencia en función de la naturaleza de la maquinaria que puede ser utilizada en el cultivo de estas zonas. En este sentido, MONTURIOL y col. (1978) distinguen las siguientes categorías:

-
- | | |
|----------------|--|
| G ₁ | No hay surcos ni barranqueras, o si existen, no afectan al uso de maquinaria de cualquier tipo. |
| G ₂ | Los surcos y barranqueras no impiden, aunque afectan, el uso de maquinaria pesada. |
| G ₃ | Los surcos y barranqueras impiden el uso de maquinaria pesada, pero afectan poco al uso de maquinaria ligera y de tracción animal. |
| G ₄ | Los surcos y barranqueras impiden el uso de maquinaria pesada y dificultan mucho, aunque no impiden totalmente el uso de maquinaria ligera o de tracción animal. |
| G ₅ | Los surcos y barranqueras impiden completamente el uso de cualquier tipo de maquinaria, siendo únicamente posible el cultivo manual. |
-

2.4.1.7. Método de clasificación del Bureau of Land Management (U.S.D.I.).

El Bureau of Land Management del Departamento del Interior de los Estados Unidos, utiliza un procedimiento de reconocimiento del grado de erosión de un territorio mediante la inspección visual de siete características de la superficie del terreno:

- Movimiento de la capa superficial del suelo.
- Presencia de acumulaciones de elementos finos.
- Pedregosidad.
- Formación de regueros.
- Formación de «pedestales» de erosión.
- Formación de una incipiente red de drenaje para el transporte de agua y sedimentos (flow patterns).
- Formación de cárcavas y barrancos.

A cada uno de estos factores se le asigna un valor numérico (entre 0 y 15), expresivo de la mayor

o menor intensidad del proceso erosivo. Posteriormente se suma el conjunto de los siete valores y se establece la siguiente clasificación según el grado de erosión:

- Area estable 0-20.
- Area ligeramente erosionada 21-40.
- Area con una erosión moderada 41-60.
- Area con erosión crítica 61-80.
- Area con una erosión severa 81-100.

(Ver Tabla en página siguiente.)

2.4.1.8. *Método de WILLIAMS y MORGAN para la elaboración de mapas de erosión actual*

La utilización de mapas geomorfológicos para la evaluación de la erosión actual presenta el grave inconveniente del carácter estático de estos mapas ya que no representan los factores que influyen en las pérdidas de suelo.

La primera aproximación para estudiar el carácter dinámico de los procesos de erosión fue hacer un inventario secuencial en el que se calculaba el cambio en la densidad de barrancos, expresada en km/km².

WILLIAMS Y MORGAN (1978), proponen un sistema de mapas geomorfológicos para el estudio de la erosión del suelo en los que se identificaban las áreas y rasgos de erosión acelerada (erosión laminar, barrancos y cárcavas), los patrones geomorfológicos (crestas, cauces, formas sedimentarias etc.) y los factores de la erosión (pendientes, usos del suelo...) en una serie de transparentes. Los mapas se elaboraron a escala 1:25000 y la leyenda se diseñó para la utilización de colores.

AZUL para las características morfológicas relacionadas con el agua.

MARRON para las características de relieve.

ROJO para los procesos acelerados de erosión eólica e hídrica.

AMARILLO para las características eólicas.

VERDE para las características de cubierta vegetal.

NEGRO para las actividades humanas, incluidas las prácticas de cultivo y conservación mal diseñadas o localizadas.

La información recogida puede evaluarse cualitativamente o, de forma cuantitativa mediante una malla y una asignación numérica a cada elemento representativa de la intensidad de la erosión, erosividad, etc.

MORGAN (1986) presenta un sistema de codificación simple para evaluar la intensidad de la erosión en el campo. Este sistema, similar al de Bureau of Land Management, está basado en: el grado de exposición del sistema radical de las especies arbóreas, el encostramiento de la capa superficial del suelo, la formación de pedestales de erosión, el tamaño de regueros y cárcavas y el tipo y estructura de la cubierta vegetal.

El muestreo en el campo debe hacerse utilizando parcelas de 1 m² para evaluar el grado de encostramiento, el rebajamiento superficial del terreno y la cobertura de los estratos herbáceos; de 10 m² para la cobertura del matorral y estrato subarbusivo y de 100 m² para la cobertura arbórea y la densidad de regueros y cárcavas.

CUADRO XII.1.—SISTEMA DE EVALUACION DE LA INTENSIDAD DE EROSION
(MORGAN, 1986)

CODIGO	INDICADORES'
0	No hay raíces expuestas; no existe encostramiento superficial; cubierta vegetal superior al 70%.
1/2	Ligera exposición de raíces; ligero encostramiento; ligera acumulación de suelo en zonas protegidas por raíces, piedras, etc. 30-70% de cubierta vegetal.
1	Sistemas radicales expuestos; formación de pedestales de erosión; acumulaciones de suelo protegido por la vegetación con una altura entre 1-10 mm; ligero encostramiento; 30-70% de cubierta vegetal.
2	Raíces expuestas, pedestales de erosión y acumulaciones de suelo en zonas protegidas por la vegetación de 1 a 5 cm de espesor. Encostramiento de la superficie y cubierta vegetal entre el 30-70%.
3	Raíces expuestas, pedestales de erosión y acumulaciones de suelo entre 5 y 10 cm de espesor; costra superficial de 2 a 5 mm de espesor; derrames de material grueso ocasionados por arroyada superficial o viento. Cubierta vegetal de menos de 30%.
4	Raíces expuestas, pedestales de erosión y acumulaciones de suelo entre 5 y 10 cm; derrames de material grueso; regueros con una profundidad máxima de 8 cm; suelo desnudo.
5	Barrancos; regueros con una profundidad mayor de 8 cm; dunas; suelo desnudo.

DETERMINACION DE LAS CLASES DE EROSION
(U.S. Department of Interior, Bureau of Land Management)

MOVIMIENTO CAPA SUPERFICIAL	No hay evidencia visual del movimiento. (0-3)	Ligero movimiento de las partículas del suelo. (4-5)	Se observa un movimiento moderado del suelo. Ligero aterrizamiento con una altura menor de 2,5 cm. (6-8)	Hay movimiento del suelo después de cada tormenta. Hay depósitos de sedimentos detrás de cada obstáculo. (9-11)	El subsuelo está expuesto en gran parte del área. Hay inicios de formación de dunas o depósitos eólicos. (12-14)
ACUMULACION ELEMENTOS FINOS	Se acumulan en el mismo sitio donde se disgrega. (0-3)	Puede haber ligeros movimientos. (4-6)	Movimiento moderado. Existen depósitos cuando hay obstáculos. (7-8)	Hay grandes movimientos de suelo disgregado y acumulaciones. (9-11)	No hay apenas acumulaciones. El suelo es arrastrado en su totalidad. (12-14)
PEDREGOSIDAD	Si existen fragmentos de roca, su distribución es aleatoria. (0-2)	Si existen fragmentos de roca, se distribuyen de forma desigual arrastrados por la arroyada superficial. (3-5)	Si existen fragmentos de roca tiene una distribución siguiendo las líneas de flujo de la escorrentía. (6-8)	Los fragmentos de roca ofrecen signo de ser arrastrados por la arroyada y depositarse tras los obstáculos. (9-11)	Los fragmentos de roca están disecionados por barrancos o han sido totalmente removidos. (12-14)
PEDESTALES	No hay evidencia visual de «pedestales». (0-3)	Pequeños pedestales en las líneas de flujo. (4-6)	Existen pedestales en rocas y plantas en las líneas de flujo. (7-9)	Los pedestales en rocas y plantas son evidentes. Las raíces están expuestas. (10-11)	La mayoría de las raíces están expuestas. (12-14)
CARCAVAS Y REGUEROS	No se observan regueros. (0-3)	Se observan algunos regueros, con profundidad menor de 1,5 cm. (4-6)	Regueros de 1,5 a 15 cm de profundidad. Equidistantes 3 m aproximadamente. (7-9)	Regueros de 1,5 a 15 cm de profundidad. Equidistantes de 1,5 a 3 cm. (10-12)	Cárcavas de 7,5 a 15 cm de profundidad a intervalos de menos de 1,5 m. (13-14)
RED DE DRENAJE	No se observan incisiones de la red de drenaje. (0-3)	Se observan fenómenos de deposición en las líneas de flujo. (4-6)	Incisiones de drenaje bien definidas con depósitos intermitentes. (7-9)	Las líneas de drenaje contienen limos, arenas y depósitos en forma de abanicos aluviales. (10-12)	Las líneas de drenaje son numerosas. Pueden tener depósitos en forma de barras. (13-15)
BARRANCOS	Pueden estar presentes de forma estable. Se observa vegetación en el techo y márgenes. (0-3)	Se observan algunos barrancos con erosión ligera en cauce y márgenes. Existe vegetación en los márgenes. (4-6)	Los barrancos están bien definidos con una erosión activa en el 10% de su curso. (7-9)	Los barrancos son activos y bien desarrollados con una erosión activa a lo largo de 10-50% de su curso. Barrancos menos desarrollados con una erosión activa en más del 50% de su curso. (10-12)	Los barrancos profundos cubren la mayoría del área. (13-15)

2.4.2. Cartografía del riesgo de erosión

La elaboración de mapas de riesgo de erosión tiene como objetivo evaluar el riesgo de pérdidas de suelo por erosión hídrica en un área y, definiendo el grado y el tipo de erosión, formular estrategias de suelos: lucha contra la erosión y conservación.

Existen tres cuestiones básicas a la hora de realizar una cartografía de los riesgos de erosión:

- La identificación de los factores más significativos en la descripción del fenómeno de la erosión.
- La descripción espacial del territorio cartografiado.
- El método de integración de los factores considerados.

2.4.2.1. Factores de la erosión

La elección de los factores más significativos para la cartografía del riesgo de erosión depende de la escala o nivel de análisis y del tipo de erosión que consideremos.

CUADRO XII.2.—FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERDIDA DE SUELO POR FENÓMENOS EROSIVOS A DISTINTAS ESCALAS

ESCALA DE ANALISIS			Indicador del fenómeno
Macro	Meso	Micro	
Clima	Litología Relieve		Caudal sólido de los ríos
Clima	Litología Relieve	Micro-clima suelo	Densidad de drenaje
Clima	Altitud Relieve		Análisis de tasas de erosión
Clima		Cubierta vegetal Micro-clima	Estudios de pérdidas de suelo en laderas

La elaboración de mapas de riesgo de erosión a una macroescala, generalmente de carácter nacional, está basada en el análisis de la capacidad erosiva del clima, a partir del cálculo de los denominados índices de erosividad de la lluvia. A una escala regional la evaluación del riesgo de erosión deberá incluir una información añadida acerca de la erosionabilidad del suelo, el relieve y topografía local y la cubierta vegetal.

EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

La erosividad de la lluvia se define como la capacidad potencial de la lluvia para erosionar. Capacidad que está íntimamente relacionada con sus características físicas. La utilización de los datos de erosividad de la lluvia puede constituir un buen indicador del riesgo de erosión a escala nacional o regional.

Existen diversos índices de erosividad pluvial utilizados en los trabajos de análisis del riesgo de erosión y de estimación de pérdidas de suelo. Los más utilizados son:

Índice de erosión pluvial de WISCHMEIER Y SMITH. El índice de erosión pluvial R se define como el índice medio anual EI_{30} dividido por 100.

$$R = E \cdot I_{30} / 100 \text{ (J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$$

siendo E la energía cinética del aguacero ($\text{J} \cdot \text{m}^2$) e I_{30} la máxima intensidad de la lluvia en 30 minutos (cm/h).

Para calcular la energía cinética de cada aguacero se divide éste en incrementos de tiempo de intensidad uniforme. Para cada intervalo de tiempo se calcula la energía cinética específica, mediante la expresión $E: 210.2 + 89 \log_{10} I$, siendo I , la intensidad del intervalo en cm/h y la energía E medida en julios/ m^2 por cm de lluvia.

El índice de erosión pluvial total de la tormenta vendrá definido por:

$$R = \frac{\left[\sum_{i=1}^n E_i (T_i I_i) \right] I_{30}}{100}$$

Para establecer un valor medio interanual es necesario sumar la erosividad de todas las tormentas de un año durante un número suficiente de años. Se recomienda utilizar al menos una serie de registros pluviográficos de 22 años de duración.

El cálculo del índice de erosión pluvial presenta grandes dificultades en zonas con una escasa red de observatorios meteorológicos de los denominados completos que son los únicos que proporcionan datos de intensidades horarias de lluvia. La mayoría de los observatorios climatoló-

gicos registran los datos correspondientes a la precipitación total en 24 horas.

Para solventar esta dificultad se han desarrollado diversas ecuaciones del factor R en función de los parámetros y variables climatológicas más comunes en los observatorios pluviométricos de la red del I.N.M. El estudio más completo y actualizado sobre este tema es el elaborado por Icona y que se publicó el año

1988 bajo el título «Agresividad de la lluvia en España».

En este estudio se relaciona, mediante análisis de regresión, el índice de erosión pluvial con otros parámetros pluviométricos deducibles de las observaciones efectuadas en la red convencional. Las ecuaciones que ofrecieron un mayor ajuste estadístico fueron las siguientes:

Zona	Ecuación	Coefficiente correlación	Error estándar
3.1	$R = e^{0.834(PMEX)^{1.314} (MR)^{-0.388} (F24)^{0.563}}$	0.9763	0.1324
3.2	$R = e^{-1.235(PMEX)^{1.297} (MR)^{-0.511} (MV)^{0.366} (F24)^{0.414}}$	0.9646	0.1482
3.3	$R = e^{-0.754(T2)^{1.031} (T10)^{-0.828} (F)^{-0.482} (PMEX)^{1.628} (MR)^{-1.22} (MV)^{0.536} (F24)^{0.800} e^{(Z.7) (-0.211) e^{(Z.9) (-0.157)}}$	0.9639	0.1680

Los parámetros pluviométricos que intervienen en las ecuaciones de regresión son:

PMEX: Valor medio de las series anuales de lluvias mensuales máximas (mm).

MV: Precipitación media del período junio-septiembre (mm).

MR: Precipitación media del período octubre-mayo (mm).

T2: Precipitación máxima en 24 horas con un período de retorno de 2 años (mm).

T10: Precipitación máxima en 24 horas con un período de retorno de 10 años (mm).

F: Índice de agresividad climática de Fournier.

F24: Factor de concentración de la máxima lluvia diaria. Se obtiene de forma análoga al índice de Fournier, mediante la división de la máxima lluvia en 24 horas del año, elevada al cuadrado, por la suma de las máximas en 24 h. de todos los meses de ese mismo año.

presenta en la Figura XII.3, se incluyen dos subzonas características:

Zona 7: Zona Guadalquivir, Sureste y Cuenca Sur, zona del Estrecho.

Zona 9: Cuenca Sur. Zona de Granada.

Índice de agresividad climática.

El índice de agresividad climática fue definido por Fournier en 1960 para su estudio de la degradación específica de las cuencas hidrográficas de los grandes ríos. El índice se define como la relación p^2/P , donde p es la precipitación del mes más lluvioso del año, en mm, y P la precipitación anual.

Para su cálculo se recomienda definir un índice anual para una serie de años y obtener el índice de agresividad como el valor medio de la serie anual.

Arnoldus (1977) presenta una nueva ecuación para el cálculo del índice de agresividad climática:

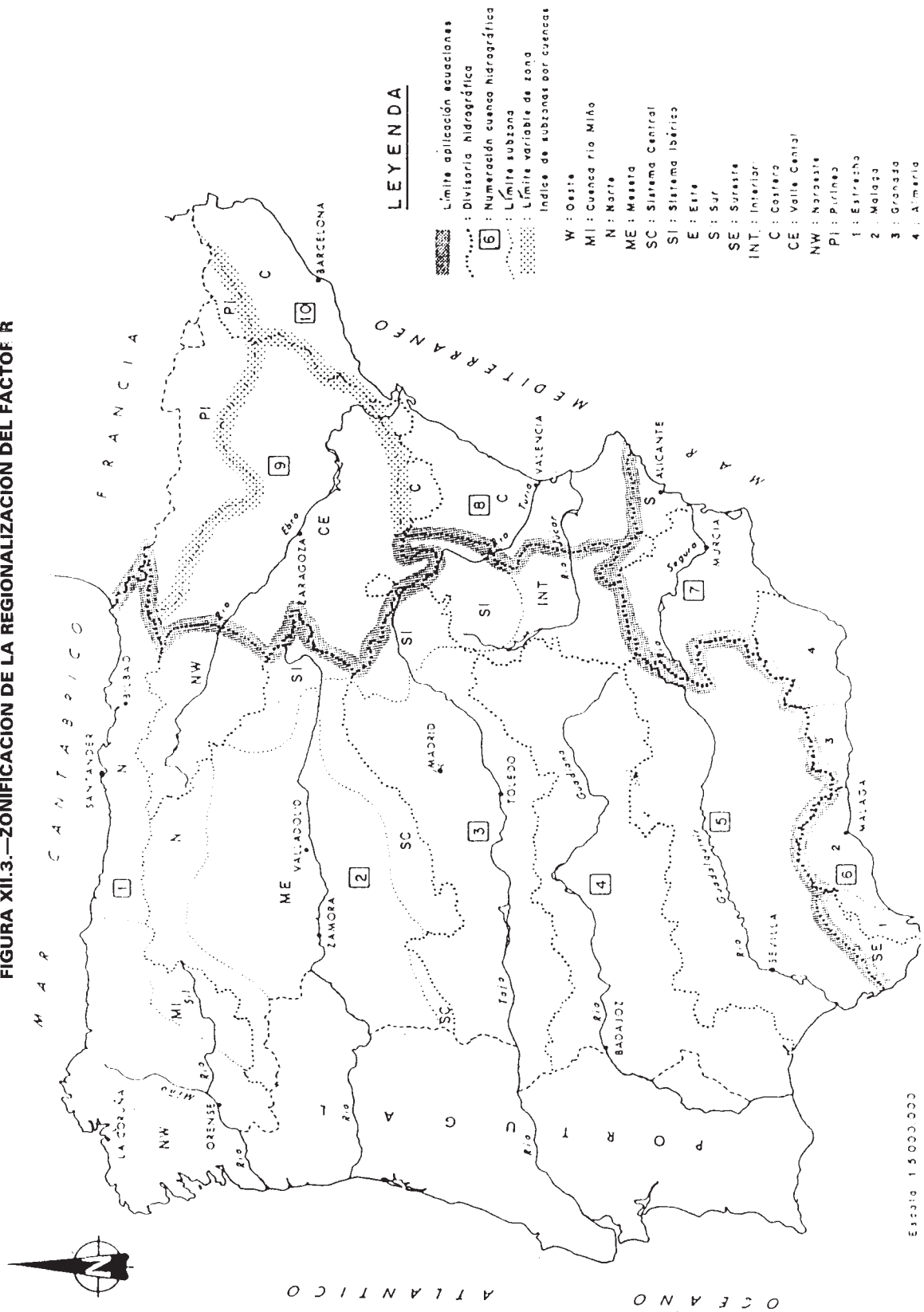
$$\sum_{i=1}^{12} P_i^2/P$$

P_i = precipitación media mensual

P = precipitación media anual

Además de la zonificación general que se re-

FIGURA XII.3.—ZONIFICACION DE LA REGIONALIZACION DEL FACTOR R



Otros índices

La validez del índice de WISCHMEIER es discutible sobre todo para su aplicación en zonas tropicales. Las mayores críticas que ha recibido es por no estimar un umbral mínimo de lluvia con capacidad erosiva.

HUDSON (1965) define el índice KE>25 como indicador del poder erosivo de la lluvia, igual a la energía cinética de todas las lluvias con una intensidad superior a los 25 mm/h. En climas templados esta cifra umbral se sitúa en torno a los 10 mm/h.

LAL (1976) al estudiar las tormentas en climas tropicales considera que éstas se caracterizan por una alta intensidad, un gran tamaño de las gotas de lluvia y la presencia de un fuerte viento. Analizando la relación de las pérdidas de suelo con las características de la tormenta estableció el siguiente índice de erosividad:

$$\left[\sum_{i=1}^k A_k I_k \right] / 100$$

A_k : Precipitación de la tormenta, mm.

I_k : Intensidad máxima en 7,5 minutos, mm/h.

K : Número de tormentas o aguaceros al año.

EROSIONABILIDAD DEL SUELO

El segundo factor que influye en el riesgo de erosión de un terreno es la mayor o menor susceptibilidad del material edáfico a ser disgregado y transportado por los agentes erosivos; es lo que denominamos erosionabilidad del suelo.

Aunque la resistencia del suelo a la erosión depende en parte de la posición topográfica, la pendiente del terreno o la incidencia directa de las actividades humanas, las propiedades del suelo son los condicionantes más importantes.

Existen muy diversos índices que expresan la erosionabilidad de un suelo en función de su textura, la estructura, el contenido en materia orgánica, la estabilidad de agregados o la capacidad de infiltración. En la tabla se expresan los más utilizados.

Otros índices relacionan directamente la erosionabilidad del terreno con el sustrato litológico (Cuadro XII.3):

CUADRO XII.3.—ÍNDICES LITOLÓGICOS DE LA F.A.O.

	Tipo de roca	Índice de resistencia a la erosión
Rocas duras	Rocas básicas	0,9 - 0,8
	Rocas ácidas	0,9 - 0,5
	Rocas metamórficas	0,8 - 0,6
	Areniscas consolidadas	0,6 - 0,5
Rocas blandas	Calizas friables	0,7 - 0,6
	Dolomitas	0,7 - 0,5
	Esquistos blandos muy friables	0,3 - 0,2
	Terrenos plásticos (fleys)	0,4 - 0,3
	Margas y arcillas	0,2 - 0,1
	Yesos	0,2 - 0,1
Depósitos antiguos (depósitos fluviales, glaciares consolidados, etc.): 0,6 - 0,2.		
Depósitos recientes (morrenas, glaciares, coluviales no estabilizados, torrenciales no consolidados): 0,3 - 0,1.		

RELIEVE

La consideración del relieve en los estudios de erosión difiere según sea la escala de trabajo. A nivel de parcelas, campos de cultivo o laderas los dos factores que más influyen en las pérdidas de suelo por erosión hídrica (A) son el grado de inclinación de la ladera (S) y su longitud (L).

De forma general en todos los métodos de estimación cuantitativa de pérdidas de suelo se incluye una relación entre estos dos factores del relieve y la pérdida de suelo de la forma

$$A \propto S^m L^n$$

donde m y n son constantes que expresan las variaciones locales en la relación entre el relieve y la erosión.

En los estudios de planificación a nivel de cuenca de drenaje y en las determinaciones de los sedimentos producidos en una unidad de drenaje, se han utilizado diversos índices para describir el relieve. Los más frecuentes son:

— Pendiente media:

$$P = \frac{D \cdot L}{A}$$

D = Diferencia de cotas entre curvas de nivel contiguas.

L = Longitud total de curvas de nivel.

A = Superficie de la cuenca.

Índice	Formulación	Clasificación	Autor
Coeficiente de dispersión	$Cd = \frac{\% \text{ (limo + arcilla) sin utilizar dispersante}}{\% \text{ (limo + arcilla) utilizando dispersante}} \times 100$	Cd > 15 Fácilmente erosionable Cd < 15 No erosionable	Middleton (1930)
Relación de coloides a equivalente de humedad	$Cr = \frac{\% \text{ de coloides}}{\text{equivalente de humedad}}$	Cr > 1,5 Difícilmente erosionables Cr < 1,5 Suelos erosionables	Middleton (1930)
Coeficiente de erosión	$Ce = \frac{Cd}{Cr}$	Ce > 10 Suelos fácilmente erosionables. Ce < 10 Suelos resistentes a la erosión	Middleton (1930)
Coeficiente de superficie y agregación	$Cs = \frac{\text{Superficie específica en cm}^2/\text{gr de las partículas cuyo diámetro está comprendido entre 0,05 mm y 2 mm}}{\% \text{ de limo + arcilla existente en el suelo dispersado menos el \% de la misma fracción en el suelo no dispersado}}$		Anderson (1954)
Índice de Bouyoucos	$A = \frac{\% \text{ (arena + limo)}}{\% \text{ de arcilla}}$		Bouyoucos (1935)
Índice de erosionabilidad	$\frac{1}{\text{Resistencia media al esfuerzo cortante} \times \text{permeabilidad}}$		Chorley (1959)
Contenido de agregados estables (WSA)	% de agregados estables > 0,5 mm después de una simulación de lluvia		Bryan (1968)
Test de gotas de agua	% agregados destruidos por un número preseleccionado de impactos de gotas de lluvia		Bruce-Okine and Lal (1975)
Índice de erosionabilidad K	Pérdida de suelo por unidad de EI_{30}		Wischmeier and Mannering (1969)

— Altura media:

$$h = \frac{\text{Volumen total del relieve de la cuenca}}{\text{Superficie de la cuenca en proyección horizontal}}$$

El cálculo de h se efectúa mediante una curva hipsográfica, llevando cotas de curvas de nivel en ordenadas y superficies de cuenca correspondientes en abcisas.

— Coeficiente de masividad de MARTONNE.

$$tg x = \frac{\text{Altura media}}{\text{Superficie de la cuenca en proyección horizontal}}$$

Este coeficiente constituye una medida de la pendiente de la cuenca. Alcanza valores muy grandes para cuencas muy pequeñas que presentan grandes desniveles, y valores muy peque-

ños para grandes cuencas de relieve poco acentuado.

— Coeficiente orográfico:

$$Co = h \cdot tgx$$

h = Altura media de la cuenca.

tgx = Coeficiente de masividad.

Los cuatro índices anteriores (los que caracterizan el relieve) son reflejo (aunque muy grosero) de la erosionabilidad de la cuenca. Aquella crece con el valor de los índices.

CUBIERTA VEGETAL

A pesar de la evidente influencia de la vegetación y los usos del suelo en la magnitud e intensidad de los procesos de erosión, existen pocos índices que expresen de forma cuantitativa esta relación independientemente de los distintos parámetros de vegetación que intervienen en los diversos modelos y ecuaciones de estimación de pérdidas de suelo.

Uno de los métodos más utilizados para reflejar el grado de protección de la cubierta vegetal frente a la erosión hídrica son los denominados índices de protección. Estos índices se construyen combinando los efectos protectores de la cubierta vegetal, según su clase y estado, con la pendiente del terreno.

Como el grado de protección que alcanza una cuenca es el complementario del grado de erosionabilidad (a mayor índice de protección, menor erosionabilidad), el Cuadro XII.4 puede servir como pauta para una zonificación del territorio que se está estudiando en clases de erosionabilidad. El procedimiento, en este caso, sería comenzar distinguiendo las clases de suelos, seguidamente hacer divisiones sucesivas por el tipo de vegetación, estado de la vegetación y pendiente. A cada parcela finalmente obtenida se le atribuirá el grado de erosionabilidad siguiente:

Grado de erosionabilidad = 1 – Índice de protección.

Otros procedimientos similares pueden emplearse con los índices referentes al suelo y relieve.

En cualquiera de estos casos podría evaluarse el riesgo de erosión con varios índices combinados e incluso el sistema más completo sería utilizar índices referentes a los tres factores: suelo, relieve y cubierta vegetal, simultáneamente.

2.4.2.2. Representación espacial del territorio y métodos de integración.

Definidos los factores que influyen en la evaluación del riesgo de erosión, la segunda cuestión es determinar cómo se representa espacialmente el territorio estudiado.

Existen dos métodos principales:

- La utilización de unidades geométricas pre-determinadas para cada una de las cuales se definen los factores básicos que influyen en el riesgo de erosión. Después de cuantificar el riesgo de erosión, las unidades se agrupan posteriormente según el valor de éste.
- La identificación de unidades cartográficas homogéneas mediante la combinación de los factores que regulan los procesos de erosión.

CUADRO XII.4.—ÍNDICES DE PROTECCION

Tipo de vegetación	Estado de la vegetación	Pendiente	Índices de protección
Forestal	Masas arbóreas densas (densidad: 0,7).	Para cualquier pendiente.	1,0
	Masas arbóreas de densidad inferior a 0,7, con sustrato arbustivo o herbáceo no degradado.	Para cualquier pendiente.	1,0
	Masas arbóreas de densidad inferior a 0,7, con sustrato arbustivo o herbáceo degradado.	3	0,4
		2	0,8
		1	1,0
	Vegetación arbustiva no degradada.	Para cualquier pendiente.	1,0
	Vegetación arbustiva degradada.	3	0,2
		2	0,6
		1	0,8
Pastizales bien conservados.	Inferiores al 30 por 100. Superiores al 30 por 100.	0,9 0,6	
Pastizales degradados.	Para cualquier pendiente.	0,3	
Agrícola	Cultivos agrícolas sin prácticas de conservación.	3	0,0
		2	0,5
		1	0,9
	Cultivos agrícolas con prácticas de conservación.	1 y 2	1,0
		3	0,3
Terrenos desnudos.		3	0,0
		2	0,5
		1	0,9

(1) Pendiente inferior a la de iniciación de la erosión.

(2) Pendiente comprendida entre la iniciación de la erosión y de arrastre total.

(3) Pendiente superior a la de arrastre total.

Estos valores son relativos a cada tipo de suelo diferenciado en la cuenca.

CARTOGRAFIA MEDIANTE UNIDADES GEOMÉTRICAS. MODELOS DE VULNERABILIDAD

Uno de los métodos pioneros desarrollados para la zonificación y cartografía automática del riesgo de erosión de un territorio es el desarrollado por STEINITZ y SINTON, 1975, basado en el programa IMGRID.

El método ha sido elaborado como modelo para la planificación y evaluación de los estudios integrados del medio físico, pero una fase del mismo, el modelo de vulnerabilidad, puede ser aplicado a la inventariación de factores complejos, como el riesgo de erosión, basados en la tipificación de otros elementos del medio.

El método consiste en:

A) Se identifican los tres elementos del medio, cartografiados, que a juicio de los expertos se consideren más importantes, en la zona de estudio, para evaluar la erosionabilidad del territorio. Es frecuente escoger factores como *pendiente, vegetación, depósitos superficiales, litología, morfología, hidromorfología, etc.*

Seguidamente se clasifican los tipos de dichos factores en cuatro clases indicativas de su sensibilidad a la erosión:

H. Alta sensibilidad.

M. Media.

L. Baja.

N. Sensibilidad nula.

B) Los elementos 2 y 3 (los de menor importancia) se combinan en uno solo mediante una matriz de reducción. Esto se realiza combinando los distintos grados de sensibilidad de los dos elementos. La matriz utiliza las clases *H, M y L* de la primera etapa y las recodifica en otras tres, *A, B y C*, de mayor a menor vulnerabilidad a la erosión.

C) La última fase consiste en refundir el elemento 1 con el resultado de la combinación del 2 y 3, para obtener unas categorías de erosionabilidad que se definen según su importancia relativa. El nivel de apreciación depende del afinamiento requerido en la diagnosis del experto y de las características del territorio. A modo de ejemplo pueden servir los siguientes niveles:

Segundo elemento

	H	M	L
H	A	A	B
M	A	B	C
L	B	C	C

Tercer elemento

- A. Más vulnerable.
- B. Medio.
- C. Menos vulnerable.

Nota: El resultado de la matriz es ilustrativo.

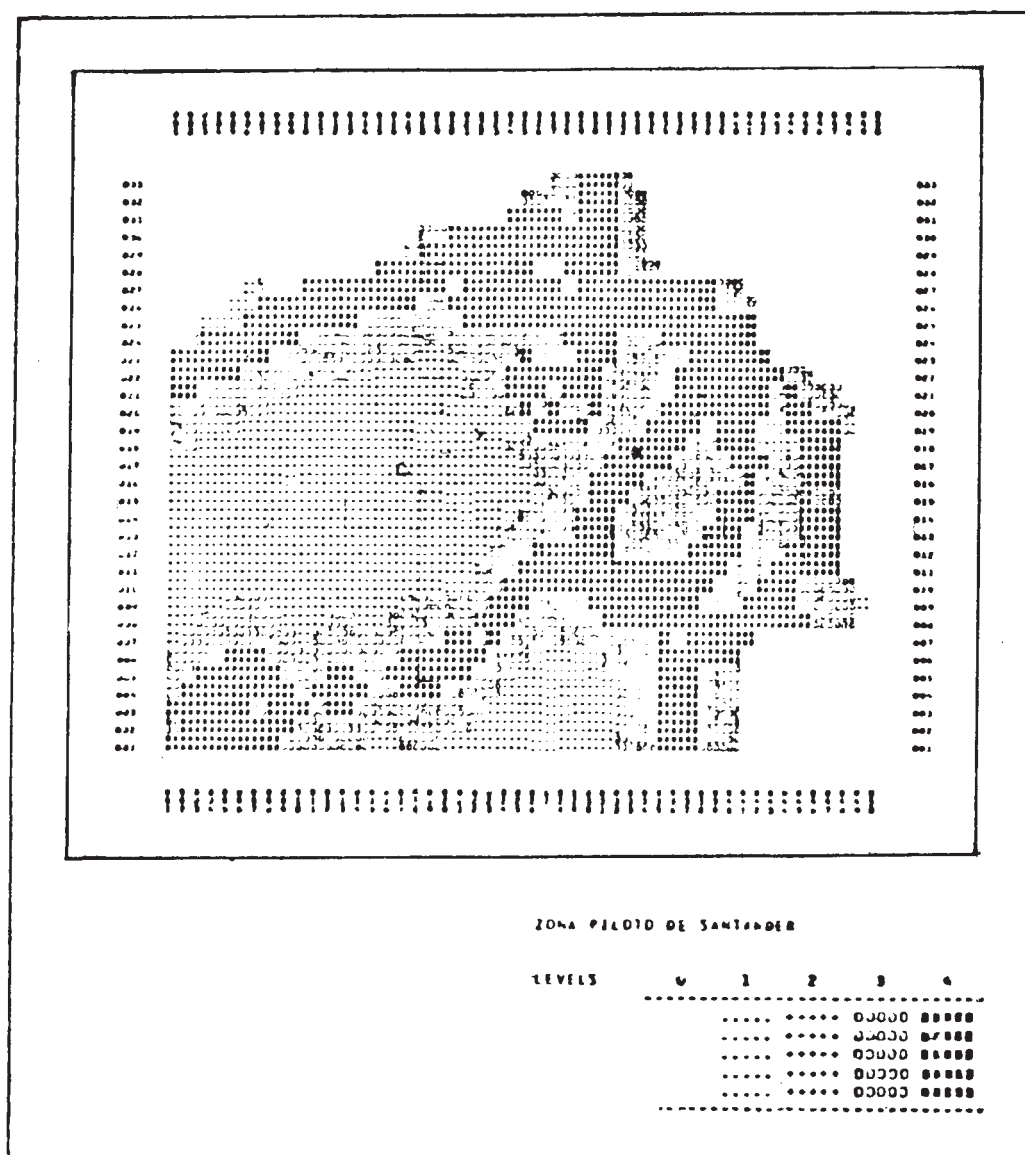
1. Erosionabilidad nula.
2. Baja erosionabilidad.
3. Moderada erosionabilidad.
4. Alta erosionabilidad.

El resultado de la matriz previamente codificado se cartografía automáticamente obteniéndose una salida gráfica del tipo de la figura XIII. 4, que representa, debidamente zonificados, los niveles de erosionabilidad fijados de acuerdo con el intervalo de variación de ésta.

	H	M	L
A	4	3	2
B	2	2	1
C	2	1	1

Nota: El resultado de la matriz es ilustrativo.

FIGURA XII.4.—REPRESENTACION DE NIVELES DE EROSIONABILIDAD



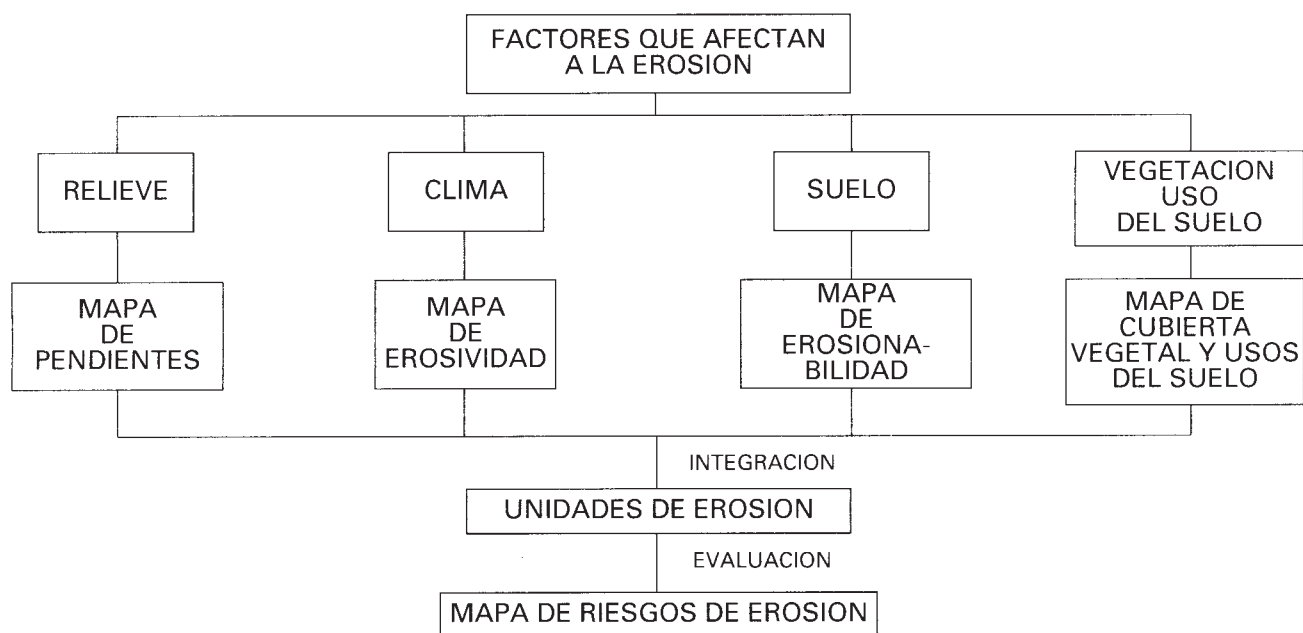
La limitación a tres factores que existía en el primitivo método está hoy ampliamente superada. Las nuevas técnicas de cartografía automática y la progresiva utilización de los sistemas de información geográfica, permiten predecir el riesgo de erosión en función de un número ilimitado de elementos mediante un sistema de ponderación o de evaluación multidimensional asociados a una salida gráfica en el ordenador.

CARTOGRAFIA MEDIANTE AREAS HOMOGENEAS POR SU RIESGO DE EROSION

Método de ALBALADEJO *et al.* (1988)

Se expone este método como un ejemplo representativo de las distintas metodologías propuestas para la realización de la cartografía del riesgo de erosión basada en la definición previa de unidades homogéneas.

El método se basa en la preparación de una serie de mapas temáticos básicos que en una posterior integración, utilizando transparencias o medios automáticos, darán lugar a las unidades homogéneas buscadas.



Para la delimitación y definición de las unidades homogéneas se propone un sistema jerarquizado en el que se distinguen cuatro categorías que, a semejanza de la nomenclatura utilizada en la Soil Taxonomy, se denominan: orden, suborden, gran grupo y subgrupo.

Las órdenes constituyen la categoría más alta del sistema. Se definen en función del ángulo de la pendiente y la densidad de la cobertura vegetal o uso del suelo. El número total de órdenes es de 15 tal y como se describen en el Cuadro XII.5.

La segunda categoría, los subórdenes, se construyen a partir de los órdenes, añadiéndoles una nueva característica de diferenciación, que varía según el orden que se trate (ver Cuadro XII.7). Las categorías posteriores, gran grupo y subgrupo, se construirían considerando los tipos y prácticas de cultivo, la longitud de la ladera, el tipo de vegetación, etc. El nivel de clasificación que se obtenga dependerá en gran medida de la escala de trabajo y de los objetivos del estudio que estemos realizando. Podemos no obstante, considerar una clasificación a nivel de suborden como válida para la planificación de usos del suelo a escala regional.

Una vez delimitadas y definidas las unidades de erosión podemos cuantificar el grado de erosión actual del terreno mediante la utilización de modelos paramétricos. El modelo más utilizado

para estos objetivos es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo. Para su uso es necesario identificar en cada unidad de erosión los valores característicos de cada uno de los factores de la erosión y posteriormente estimar las pérdidas de suelo en t/ha.año. Un ejemplo de esta aplicación de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo se presenta en el Cuadro XII.6.

CUADRO XII.5.—ORDENES DE LAS UNIDADES DE EROSION

Características	Nomenclatura
— Areas donde el suelo está cultivado - C	
• Pendientes menores del 5%	P_1C
• Pendientes comprendidas entre el 5 y el 15%	P_2C
• Pendientes mayores del 15%	P_3C
— Areas sin cultivar	
• Con densidad de la cobertura vegetal menor del 2%	V_1
— Pendientes menores del 5%	P_1V_1
— Pendientes comprendidas entre el 5 y el 15%	P_2V_1
— Pendientes mayores del 15%	P_3V_1
• Con densidad de la cobertura vegetal de 2-35%	V_2
— Pendientes menores del 5%	P_1V_2
— Pendientes comprendidas entre el 5 y el 15%	P_2V_2
— Pendientes mayores del 15%	P_3V_2
• Con densidad de la cobertura vegetal de 35-70%	V_3
— Pendientes menores del 5%	P_1V_3
— Pendientes comprendidas entre el 5 y el 15%	P_2V_3
— Pendientes mayores del 15%	P_3V_3
• Con densidad de la cobertura vegetal superior al 70%	V_4
— Pendientes menores del 5%	P_1V_4
— Pendientes comprendidas entre el 5 y el 15%	P_2V_4
— Pendientes mayores del 15%	P_3V_4

CUADRO XII.6.—PERDIDA DE SUELO EN LAS UNIDADES DE EROSION (*)
(ALBADALEJO MONTORO, ORTIZ SILLA y MARTINEZ-MENA GARCIA, 1988)

Unidad	R	K	LS	C	P	Pérdida de suelo (t/ha/año)
P ₁ CE ₁	60	0,31	0,22	0,4	0,12	0,19
P ₁ CE ₂ I II & III	60	0,41	0,10	0,4	0,12	0,12
	60	0,41	0,22	0,4	0,12	0,26
P ₂ CR ₁ XII II, III, IV, V, VII, VIII I, VI, IX, X, XI, XIII, XIV	60	0,37	0,82	0,4	0,10	0,73
	60	0,33	0,62	0,4	0,10	0,49
	60	0,33	0,82	0,4	0,10	0,65
P ₃ CR ₁ I III II, IV, VIII	60	0,31	1,26	0,4	0,10	0,94
	60	0,34	1,26	0,4	0,10	1,09
	60	0,23	1,26	0,4	0,10	0,69
P ₃ V ₁ S ₁ I, II III-VI	60	0,38	10,91	0,45		112,00
	60	0,33	10,91	0,45		97,20
P ₁ V ₂ S ₁ I-XIV XV XVI XVII	60	0,38	0,50	0,32		3,64
	60	0,38	0,67	0,32		4,89
	60	0,31	0,62	0,32		3,70
	60	0,38	0,62	0,32		4,52
P ₂ V ₂ S ₂ I II III, V IV VI	60	0,36	3,23	0,32		22,32
	60	0,36	2,95	0,32		20,39
	60	0,36	2,77	0,32		19,14
	60	0,23	2,95	0,32		13,02
	60	0,43	2,77	0,32		22,86
P ₂ V ₂ S ₁ I II III IV V-XI	60	0,34	2,96	0,28		16,90
	60	0,26	2,96	0,28		12,92
	60	0,26	2,53	0,28		11,05
	60	0,38	2,96	0,28		18,89
	60	0,25	2,53	0,25		9,48
P ₃ V ₂ S ₁ I II III-IV	60	0,25	8,63	0,28		36,24
	60	0,25	5,72	0,28		24,02
	60	0,25	5,72	0,32		27,45
P ₃ V ₂ S ₂ I II III IV V, VI VII VIII	60	0,31	15,81	0,30		88,21
	60	0,43	5,72	0,28		41,32
	60	0,23	6,24	0,28		24,11
	60	0,23	15,42	0,28		59,58
	60	0,23	5,72	0,28		22,10
	60	0,23	21,86	0,28		84,46
	60	0,23	26,76	0,28		103,40
	60	0,23	26,76	0,28		103,40
P ₃ V ₃ R ₁ I II III IV	60	0,25	15,42	0,17		39,32
	60	0,25	4,19	0,17		10,68
	60	0,25	7,89	0,17		20,11
	60	0,25	3,67	0,17		9,35

(*) Los números romanos indican subunidades pertenecientes a la misma clase de unidad de erosión.

Metodología para la definición de estados erosivos. ICONA (1982)

La mayoría de las metodologías para la cartografía y evaluación de los riesgos de erosión utilizan un modelo de integración de tipo lineal de todos los factores implicados en el fenómeno de la erosión.

El modelo lineal, cuyo ejemplo más difundido es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, presenta dos grandes inconvenientes. Por una parte

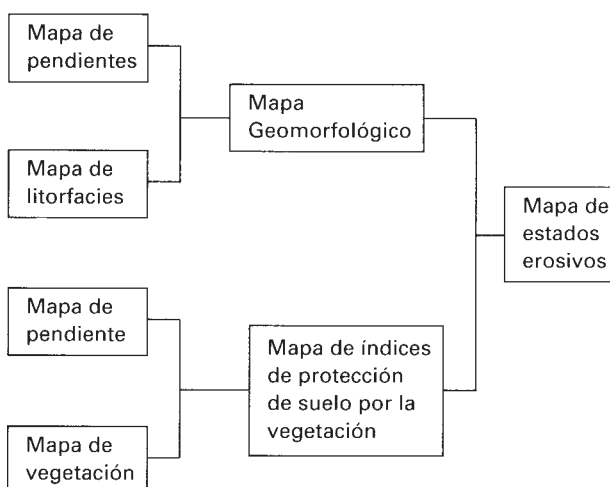
considera cada factor de forma independiente sin tener en cuenta las interrelaciones no lineales que pudieran existir entre ellos. Un segundo inconveniente es que todos los factores se ponderan de igual modo cualquiera que sea las características ambientales que concurren en el área.

La metodología propuesta por el ICONA en su monografía 26 «Paisajes erosivos en el sureste Español» para la definición de estados erosivos utiliza un método de integración no lineal de los factores considerados.

CUADRO XII.7.—SISTEMA DE CLASIFICACION DE UNIDADES DE EROSION
(ALBADALEJO MONTORO, ORTIZ SILLA Y MARTINEZ, MENA GARCIA, 1988)

Ordenes	Subórdenes	Característica diferenciadora
P ₁ C	P ₁ CE ₁ P ₁ CE ₂ P ₁ CE ₃	Erosionabilidad del suelo E
P ₂ C	P ₂ CR ₁ P ₂ CR ₂ P ₂ CR ₃	Torrencialidad climática R
P ₃ C	P ₃ CR ₁ P ₃ CR ₂ P ₃ CR ₃	Torrencialidad climática R
P ₁ V ₁	P ₁ V ₁ S ₁ P ₁ V ₁ S ₂ P ₁ V ₁ S ₃	Porcentaje de pedregosidad superficial (S)
P ₂ V ₁	P ₂ V ₁ S ₁ P ₂ V ₁ S ₂ P ₂ V ₁ S ₃	Porcentaje de pedregosidad superficial (S)
P ₃ V ₁	P ₃ V ₁ S ₁ P ₃ V ₁ S ₂ P ₃ V ₁ S ₃	Porcentaje de pedregosidad superficial (S)
P ₁ V ₂	P ₁ V ₂ S ₁ P ₁ V ₂ S ₂ P ₁ V ₂ S ₃	Porcentaje de pedregosidad superficial (S)
P ₂ V ₂	P ₂ V ₂ S ₁ P ₂ V ₂ S ₂ P ₂ V ₂ S ₃	Porcentaje de pedregosidad superficial (S)
P ₃ V ₂	P ₃ V ₂ S ₁ P ₃ V ₂ S ₂ P ₃ V ₂ S ₃	Porcentaje de pedregosidad superficial (S)
P ₁ V ₃	P ₁ V ₃ R ₁ P ₁ V ₃ R ₂ P ₁ V ₃ R ₃	Torrencialidad del clima (R)
P ₂ V ₃	P ₂ V ₃ R ₁ P ₂ V ₃ R ₂ P ₂ V ₃ R ₃	Torrencialidad del clima (R)
P ₃ V ₃	P ₃ V ₃ R ₁ P ₃ V ₃ R ₂ P ₃ V ₃ R ₃	Torrencialidad del clima (R)
P ₁ V ₄	P ₁ V ₄ B P ₁ V ₄ M P ₁ V ₄ Pr	Tipo de vegetación: B: bosque M: matorral Pr: pastizal
P ₂ V ₄	P ₂ V ₄ B P ₂ V ₄ M P ₂ V ₄ Pr	Tipo de vegetación
P ₃ V ₄	P ₃ V ₄ B P ₃ V ₄ M P ₃ V ₄ Pr	Tipo de vegetación

El esquema de la metodología propuesta es el siguiente:



La definición del estado erosivo de un territorio surge de la conjunción de dos matrices de evaluación: la matriz de protección del suelo por la vegetación y la matriz de susceptibilidad a la erosión (mapa geomorfológico).

La primera de estas matrices está basada en la Tabla de índices de protección del suelo por la vegetación. Con esta matriz se indica la mayor o menor protección frente a la erosión que produce una formación vegetal dependiendo de la pendiente del terreno (ver Cuadro XII.8).

El mapa geomorfológico se obtiene de la intersección de un mapa de pendientes y el mapa de las características litológicas del terreno de acuerdo con una matriz de susceptibilidad a la erosión (ver Cuadro XII.9) que refleja el grado de estabilidad del suelo en función de la pendiente del terreno y de la constitución propia de los materiales que lo componen.

De la combinación de las clases que resultan de los mapas geomorfológicos y de protección de la vegetación se deducen los estados erosivos del territorio analizado. En el caso del Sureste de España, donde se aplicó con carácter experimental esta metodología, el número total de estados (o paisajes) erosivos definidos fueron siete. La definición de estos siete tipos es la siguiente.

Tipo 7: Paisaje con erosión controlada; vegetación arbórea densa; índice de protección del suelo por la vegetación, 1,0; cualquier aspecto geo-

morfológico, pero predominan fuertes pendientes, clase A (dentro de la definición geomorfológica definida en este estudio).

Tipo 6. Paisaje de cultivos intensivos en pendientes generalmente >5%, pero que pueden llegar al 12%, cuando existen prácticas de defensa

del suelo de manera integral. Índice de protección del suelo por la vegetación, 0,9; clase geomorfológica C.

Tipo 5: Paisaje definido por su litología de tipo plutónico moderno. Presenta escasa superficie dentro del área de estudio.

CUADRO XII.8.—MATRIZ DEFINIDORA DEL MAPA DE PROTECCION DEL SUELO POR LA VEGETACION

Vegetación			Pendiente %					
Código	Estratos de la vegetación en el mapa	Estratos en la tabla «Índices de protección de la vegetación»	I 0-12	II 12-18	III 18-24	IV 24-35	V 35-60	VI >60
8	Arbolado denso	Masas arbóreas de densidad > 0,7 o masas arbóreas de densidad < 0,7 con sustrato arbustivo o herbáceo no degradado.	1	1	1	1	1	1
7	Arbolado claro	Masas arbóreas de densidad < 0,7, con sustrato arbustivo o herbáceo degradado.	1	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4
6	Matorral	Vegetación arbustiva degradada.	0,8	0,6	0,4	0,4	0,2	0,2
5	Pastizales de montaña	Pastizales bien conservados.	0,9	0,8	0,8	0,7	0,4	0,4
4	Erial a pastos	Pastizales degradados.	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
3	Cultivos de secano							
2	Cultivos arbóreos y viñedos	Cultivos	0,6	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0
1	Cultivos en regadío	Cultivos en regadío	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0	Improductivo	Terrenos desnudos	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

CUADRO XII.9.—MATRIZ DEFINIDORA DEL MAPA GEOMORFOLOGICO

Tipos de suelo de acuerdo con su litofacies	Pendiente %					
	I 0-12	II 12-18	III 18-24	IV 24-35	V 35-60	VI >60
1. Rocas ígenas: ácidas, básicas y volcánicas	D	D	D	D	D	D
2. Rocas calcáreas bien cementadas: calizas, dolomitas, carniolas, calcoesquistos, mármoles y rocas afines	C	B	B	A ₃	A ₂	A ₂
3. Rocas silíceas compactas: micaesquistos, esquistos, pizarras duras, filitas, areniscas cuarzosas, cuarcitas, pudingas duras y similares	C	B	B	A ₃	A ₂	A ₂
4. Rocas poco consolidadas: areniscas con poco cuarzo, molasas y grauvacas, conglomerados, maciños, calizas arenosas y magosas y rocas semejantes	C	B	A ₃	A ₂	A ₂	A ₂
5. Formaciones blandas; argilitas, margas, yesos, facies flysch, pelitas, pizarras arcillosas, launas, margas arcillosas, láguenas y afines	C	B	A ₃	A ₂	A ₂	A ₂
6. Arcillas, arenas y depósitos cuaternarios	C	B	A ₃	A ₂	A ₂	A ₂

Tipo 4: Paisaje caracterizado por pendientes inferiores al 12%, suelo cubierto por cultivos de secano, a veces los cultivos han sido abandonados, áreas de matorral-erial o pastizal de secano. Índice de protección del suelo por la vegetación oscilando entre 0,8 y 0,3 (este último sólo en pastizales degradados), lo normal es 0,6. Suelos modernos.

Tipo 3: Paisaje formado por terrenos con pendientes comprendidas entre el 12% y el 18 ó 24% de límites inferior y superior, respectivamente; este último condicionado a la mayor o menor erosionabilidad de su litofacies.

Suelo protegido por matorral, índice de protección oscilando entre 0,6 y 0,8, este último excesivo para el área a que se refiere. Clase geomorfológica B dentro del presente estudio.

Tipo 2: Las áreas de cultivo con pendientes superiores al 12% se agrupan en este tipo de paisajes erosivos. Este paisaje puede estar fuertemente afectado por prácticas de conservación de suelos o labores agrícolas. Índice de protección del suelo por la vegetación, 0,0. Clase geomorfológica A o B, predominando la primera.

Tipo 1: Paisaje erosivo formado por todas aquellas superficies con pendientes superiores a la de arrastre total, clase geomorfológica A (que no están cultivadas o con arbolado denso, en cuyo caso están representadas en otros tipos). Su protección es a base de matorral o pastizal. Cuando el índice de protección del suelo por la vegetación no llegue a 0,4, este tipo de paisaje se extiende también a todas aquellas superficies de pendientes superiores al 12%.

Estos paisajes aparecen resumidos en la matriz siguiente:

2.5. MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LA EROSION HIDRICA

La mayoría de los modelos establecidos para el estudio de la erosión hídrica son de tipo empírico y están basados en la definición de los factores más importantes que regulan los mecanismos de la erosión y mediante el uso de observaciones, medidas, experimentos y técnicas de análisis estadístico establecer relaciones significativas entre estos factores y las pérdidas de suelo. Este análisis puede limitarse simplemente a los principales «inputs» y «outputs» del sistema (modelos de caja negra); puede identificar alguna de las relaciones causa-efecto dentro del sistema (modelos de caja gris); establecer ecuaciones simplificadas de todos los procesos que intervienen en el fenómeno (modelos conceptuales o de caja blanca) o basarse en la resolución de las ecuaciones físicas que regulan el fenómeno (modelos físicos).

De forma esquemática el conjunto de modelos y métodos desarrollados para el estudio de la erosión hídrica puede clasificarse en :

- Modelos empíricos para el estudio de la erosión en parcelas y campos de cultivo.
- Modelos empíricos para el estudio de la erosión en cuencas hidrográficas.
- Adaptación de modelos empíricos de estimación de pérdidas de suelo en parcelas para su utilización en cuencas hidrográficas.
- Métodos de estimación de la degradación específica de una cuenca hidrográfica.
- Modelos conceptuales de erosión y transporte en cuencas hidrográficas.
- Modelos físicos.

INDICE DE PROTECCION DEL SUELO POR LA VEGETACION

			1,0	0,9	0,8-0,7	0,4-0	0,0
		Códigos	8	7	6 5 4	3 2 1	0
GEOMORFOLOGIA	A2	1	7	—	1	1	2
	A3	2	7	—	3	1	2
	B	3	7	—	3	3	2
	C	4	7	6	4	4	—
	D	5	7	5	5	5	5

2.5.1. Modelos empíricos para el estudio de la erosión en parcelas y campos de cultivo. La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo

Los modelos de erosión hídrica han sido diseñados para predecir y controlar las alteraciones en las condiciones del suelo debidas a la erosión superficial, que puede darse tanto de forma natural como provocada por las actividades humanas. Dichos modelos tienen perfecta aplicación a la planificación física. Sirven para calcular la pérdida de suelo que se produce en determinada zona, para predecir unos niveles de erosión quizá excesivos, o un aporte excesivo de sedimentos a los cursos de agua y zonas húmedas, para así poder proyectar los niveles de tolerancia del fenómeno.

Los comienzos de la cuantificación de las pérdidas de suelo se remontan a unos cincuenta años y se deben al Soil Conservation Service y al Agricultural Research Service de U.S.A., pero la formulación más comprensiva y útil, que ha llegado a conocerse como la «Ecuación universal de pérdida de suelo», o, simplemente «Ecuación universal», es bastante más tardía (WISCHMEIER y SMITH, 1958). Una investigación muy completa sobre las ecuaciones de pérdida de suelo ha sido hecha por KIRKBY y MORGAN (1980), MINTEGUI *et al* (1984) o MORGAN (1986). La expresión de la ecuación Universal de Pérdidas de Suelo es:

$$A: R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

A: pérdida media anual de suelo en t/ha.año.

R: factor de lluvia.

K: factor de erosionabilidad del suelo.

L: factor de longitud de pendiente.

S: factor de inclinación de la pendiente.

C: factor de ordenación de cultivos.

P: factor de control de la erosión mediante prácticas de cultivo.

La estimación de cada uno de los factores que intervienen en la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo se realiza de la forma siguiente :

Factor de lluvia R

El factor R se define como el índice medio anual de la erosividad de la lluvia EI_{30} (ver Apartado 2.4.2) dividido por 100 :

$$R = \frac{EI_{30}}{100} \quad \text{En el sistema métrico}$$

este índice tiene como unidades $\frac{\text{julios-cm}}{\text{m}^2 \cdot \text{hora}}$

Factor de erosionabilidad del suelo K

Expresa la influencia de las propiedades químicas y físicas del suelo en la erosión, a través de la infiltración, permeabilidad, capacidad de retención de agua, resistencia a la dispersión, aplastamiento, abrasión y a las fuerzas de transporte.

Se determina empíricamente y se expresa en t/ha por unidad de pluviosidad EI_{30} en condiciones estándar de pendiente del 9 por 100 , longitud 22,13 m y en barbecho continuo.

Generalmente son menos erosionables los suelos profundos permeables de arenas gruesas. Los más erosionables serán los suelos arenosos y pocos profundos sobre subsuelo impermeable.

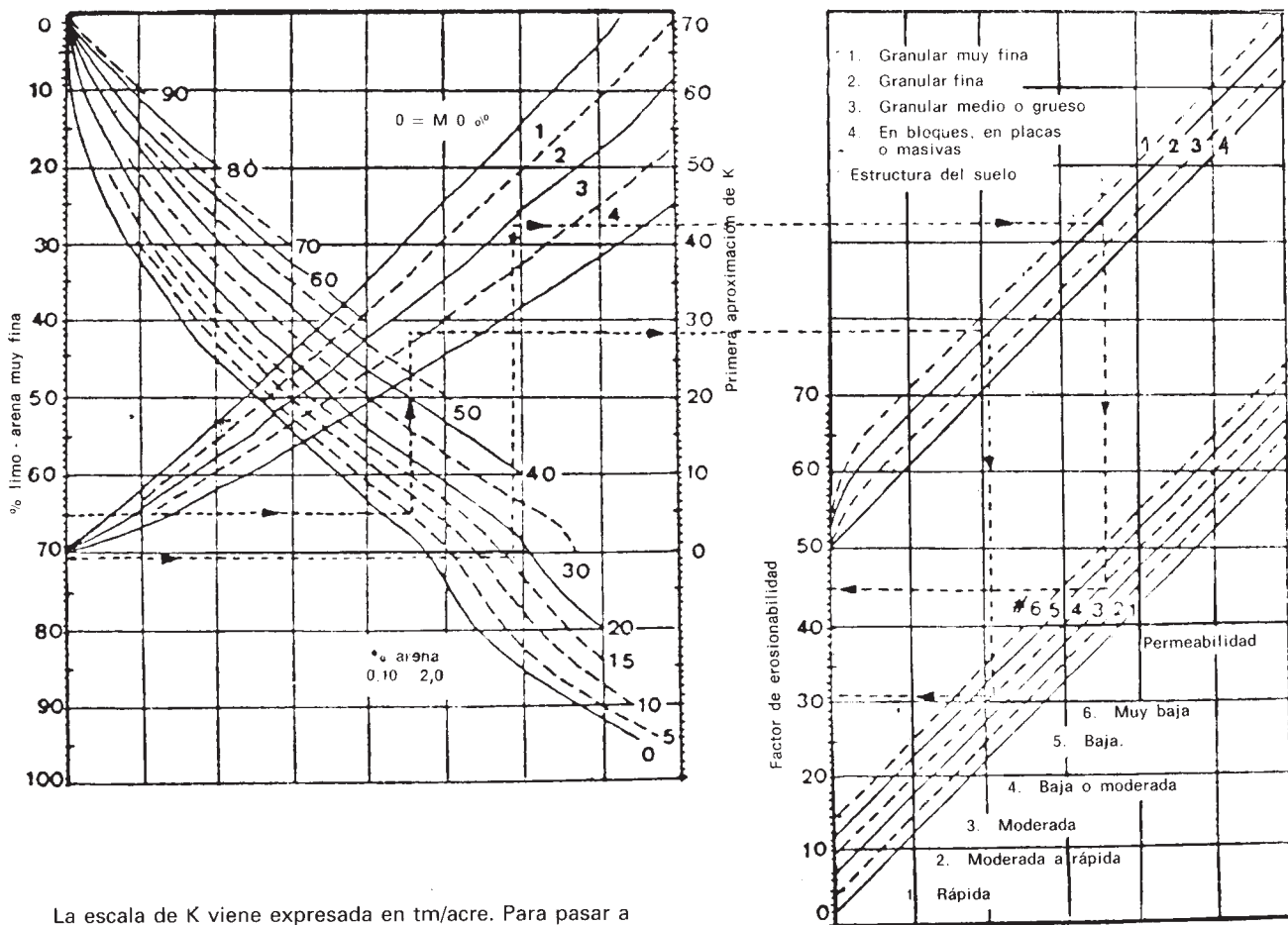
Para la mayoría de los suelos, K varía entre 0,74 y 1,70, pero su magnitud relativa puede llegar a variar de 1 a 20, lo que ya da idea de la profunda influencia que ejerce. En la práctica, no obstante su peso es escaso, pues para los suelos más corrientes (los franco limosos) varía de 0,60 a 1,12 t/ha.

Para facilitar el cálculo de K, WISCHMEIER y colaboradores (1971) han elaborado un nomograma (Fig. XII.5) que resuelve gráficamente la ecuación que liga las variables del proceso de erosión. Su utilización parece ser especialmente interesante cuando el horizonte del suelo expuesto a la erosión por las actividades llevadas a cabo en el terreno puede ser cualquiera de los del perfil.

Para utilizarlo se procede de la siguiente manera.

A partir de los datos detallados de suelo, se conocen las características físicas de los principales horizontes del perfil. Con ayuda de esta información se entra en el nomograma precisamente por el orden que se indica: por ejemplo, con un valor del 65 por 100 de limo más arena muy fina (0,002 a 0,10mm), desplazarse horizontalmente hasta la curva del 5 por 100 de arena; luego, verticalmen-

FIGURA XII.5.—NOMOGRAMA DE WISCHMEIER, 1971



La escala de K viene expresada en tm/acre. Para pasar a tm%ha, multiplicar el resultado final por 2,47 (1 Ha = 2,47 acres).

te, hasta la curva del 2,8 por 100 de materia orgánica (OM); luego, horizontalmente, hasta la «estructura» 2, y, por fin, verticalmente hasta la «permeabilidad» 4. En la escala correspondiente se leerá $K = 0,21$ t/acre, que habrá que convertir a t/ha. Siguiendo un procedimiento similar podrían obtenerse los valores de K para cada uno de los horizontes que se prevea vayan a ser afectados por las operaciones a desarrollar en el terreno.

Otro procedimiento para calcular el valor del factor de erosionabilidad utiliza la ecuación de ajuste que liga dicho factor con las características físico-químicas del suelo. La regresión establecida viene expresada por la ecuación :

$$100K = 10^{-4} \cdot 2,71 M^{1,14} (12-a) + 4,20(b-2) + 3,23(c-3)$$

Siendo: M, factor representativo de la textura. Se calcula como el producto del porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002-0,1 mm de diámetro, expresado en porcentaje,

por el porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002-2 mm de diámetro, expresado también en porcentaje, o, lo que es igual, a 100 menos el porcentaje de arcilla de la muestra. Es decir:

$$M = (100 - \% \text{ arcilla}) [\% (\text{limo} + \text{arena fina})]$$

a, % de materia orgánica.

b, número correspondiente a la estructura del suelo según la siguiente codificación:

1, gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1mm).

2, gránulo fino y grumo fino (1-2mm).

3, gránulo y grumo medio (2-5mm.) y gránulo grueso (5-10mm).

4, gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (>10mm).

c, clase de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación del USDA-Soil Survey Manual:

- 1, rápida a muy rápida.
- 2, medianamente rápida.
- 3, moderada.
- 4, moderadamente lenta.
- 5, lenta.
- 6, muy lenta.

Factor topográfico $L \cdot S$.

El factor L , longitud del declive, viene definido por :

$$L = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^m$$

En donde λ es la longitud del declive en metros y m un exponente influenciado principalmente por la interacción entre la longitud del declive y la pendiente. La longitud λ se define como la distancia desde el origen de la escorrentía superficial hasta el inicio del depósito de sedimentos, o hasta donde la escorrentía se concentre en un cauce.

El factor pendiente S se expresa por :

$$S = \frac{0,43 + 0,30 s + 0,043 s^2}{6,613}$$

siendo s la pendiente en porcentaje.

Suele agruparse bajo la denominación de factor topográfico $L \cdot S$ los dos factores que integran el efecto del relieve, longitud del declive o ladera y pendiente.

La ecuación obtenida del análisis estadístico de los datos para representar el producto $L \cdot S$ es la siguiente :

$$L \cdot S = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^m \cdot \left[\frac{0,43 + 0,30 s + 0,043 s^2}{6,613} \right]$$

Se ha venido utilizando:

$$L \cdot S = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,5} [0,065 + 0,0454 s + 0,0065 s^2] = \lambda^{0,5} (0,0138 + 0,00965 s + 0,00138 s^2)$$

para pendientes menores del 20% y longitudes de declive menores de 350m, y:

$$L \cdot S = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,6} \cdot \left[\frac{s}{9} \right]^{1,4}$$

para pendientes mayores del 20%.

Más recientemente, Wischmeier (1982) ha obtenido para el cálculo del factor topográfico las siguientes ecuaciones :

Para pendientes menores del 9% :

$$L \cdot S = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \cdot \left[\frac{0,43 + 0,30 s + 0,043 s^2}{6,613} \right]$$

Tratándose de pendientes iguales o mayores del 9% :

$$L \cdot S = \left[\frac{\lambda}{22,1} \right]^{0,3} \cdot \left[\frac{s}{9} \right]^{1,3}$$

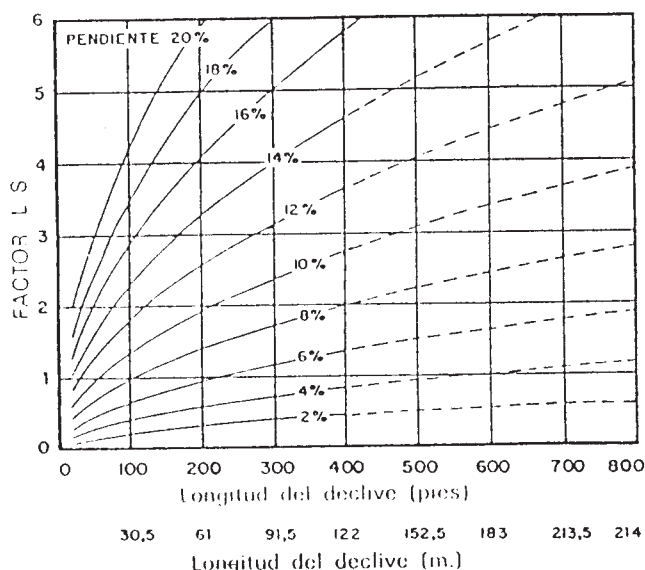
Estas ecuaciones son estrictamente aplicables en el caso de laderas de pendiente uniforme con un mismo tipo de suelo y vegetación en toda su longitud, debiendo utilizarse factores correctores para el caso en que a lo largo del recorrido de la lámina de escurrimiento se produzcan cambios sensibles de pendiente o de alguno de los otros factores.

La obtención de los parámetros λ y s que definen el factor topográfico no presentan dificultades cuando se trata de una parcela concreta de terreno, siempre que se tenga en cuenta que λ está determinado, como se ha dicho, por la distancia entre el origen del flujo superficial y donde se produce el depósito de sedimentos o el flujo se concentra en un cauce.

Existen también gráficas elaboradas para evaluar conjuntamente el factor LS .

La determinación de los valores representativos de los parámetros λ y s en el caso de aplicarse el modelo a superficies de cierta extensión o pequeñas cuencas hidrográficas en que, a pesar de la homogeneidad de otros factores, estas va-

FIGURA XII.6.—CÁLCULO DEL FACTOR LS
(WAY, 1978)



riables pueden presentar amplias variaciones, resulta más compleja y puede obtenerse por los métodos de la «densidad de drenaje» y de «pendiente media» de Horton y de «contorno-punto extremo» de Williams y Berndt (1976). Horton considera que el valor de λ en una cuenca pequeña puede ser estimado como la mitad de la inversa de la densidad de drenaje. Como la densidad de drenaje es la relación entre la suma de longitud de los cauces que constituyen dicha red y la superficie de la cuenca, la expresión de λ será :

$$\lambda = 0,5 \frac{\omega}{\Sigma l}$$

ω (km²), superficie de la cuenca.

Σl (km), longitud total de cauces.

En cuanto a la pendiente, viene medida entre dos curvas de nivel por :

$$s_i = 100H \frac{LC_j + LC_{j+1}}{2\omega_i}$$

s_i = Porcentaje medio de pendiente para la superficie ω_i entre los contornos (curvas de nivel) J y $j+1$.

H = Diferencia de nivel entre los dos contornos (km).

LC_j = Longitud del contorno j (km).

LC_{j+1} = Longitud del contorno $j+1$ (km).

ω_i = Superficie entre los contornos j y $j+1$ (km²)

La pendiente media de la cuenca será :

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n} = \frac{\omega_i}{\omega}$$

ω = Superficie de la cuenca.

n = Número de áreas entre contornos de la cuenca.

Sustituyendo s_i por su valor, se llega a:

$$s = \frac{H}{\omega} \cdot \left[\frac{(LC_1 + LC_{n+1})}{2} + \sum_{i=2}^n LC_i \right]$$

ecuación de más fácil aplicación, porque solamente utiliza las longitudes de contorno y la superficie de la cuenca. Williams y Berndt simplifican la aplicación de esta fórmula considerando tres contornos correspondientes al 25, 50 y 75% de la altura o desnivel de la cuenca. La pendiente vendría definida por :

$$s = 0,25 Z \left[\frac{LC_{25} + LC_{50} + LC_{75}}{\omega} \right]$$

Z (km), altura o desnivel total de la cuenca.

LC_{25} , LC_{50} , LC_{75} , longitud (km) de los contornos en el 0,25, 0,50, y 0,75 de Z .

En cuanto al método «contorno-punto extremo» de Williams y Berndt para el cálculo de λ , se basa en que tanto la longitud del contorno como el número de «puntos extremos» en el contorno deben ser tenidos en cuenta, ya que esos puntos de cruce del cauce con el contorno son máximos locales en una dirección ascendente. Así establece que λ puede estimarse aproximadamente dividiendo la longitud del contorno por dos veces el número de «puntos extremos», en definitiva los puntos en que la curva de nivel corta la red de drenaje.

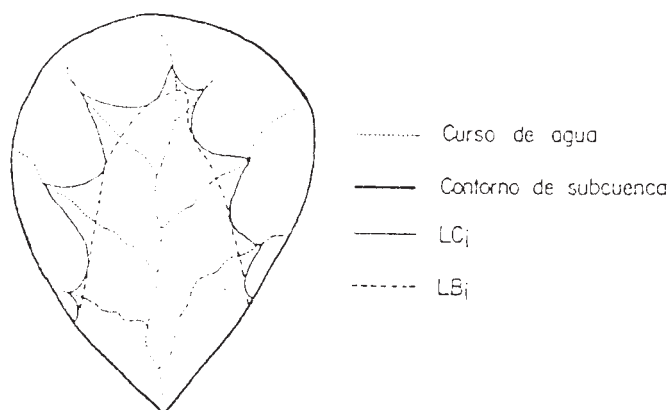
Por consideraciones geométricas, los autores llegan a la ecuación:

$$\lambda = \frac{LC \cdot LB}{2n \sqrt{LC^2 - LB^2}}$$

LC (km.), longitud curva de nivel.

LB(km), longitud de contorno base (ver Figura)

n número de «puntos extremos»; es decir, número de puntos en que la curva de nivel corta a la red del drenaje.



Así se calcula λ para las curvas de nivel LC_{25} , LC_{50} , LC_{75} , y el λ medio para la cuenca sería :

$$\lambda = \frac{\lambda_{25} + \lambda_{50} + \lambda_{75}}{3}$$

Esta estimación de λ se juzga suficientemente aproximada, sobre todo teniendo en cuenta que es mucho más importante la exactitud en la determinación de s .

Finalmente, en uno y otro caso, métodos de Horton y de Williams y Berndt, para el cálculo del factor topográfico $L \cdot S$, se entrará con los valores de λ y s así obtenidos en las fórmulas de Wischmeier correspondientes.

Factor cultivo y ordenación (c)

La influencia del cultivo en la erosión se manifiesta a través de la especie cultivada, de la alternancia de cultivos, la forma y número de las labores, la productividad, la existencia de mayor o menor erosividad de la lluvia en el período del año en que se realiza el cultivo, etc.

Como es fácil deducir, el número de combinaciones posibles es muy elevado y no es posible separar los efectos de cada uno de los supuestos, por lo cual estos efectos se evalúan a través de un solo factor.

El factor de cultivo (c) es un factor combinado que refleja la influencia de: a) las secuencias en la cubierta vegetal (en el caso de cultivos); b) los tipos de cubierta vegetal, y c) la cantidad de aguaceros caídos durante los períodos en que las prácticas agrícolas dejan desprotegido el suelo.

Es difícil de fijar, debido a la infinidad de formas de vegetación, cultivo y tratamiento.

El factor C es la relación entre la pérdida de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y la pérdida correspondiente del suelo en barbecho continuo. Esta comparación se hace suponiendo que son semejantes las condiciones de suelo, pendiente y lluvia.

El U. S. Soil Conservation Service tiene tabulados los valores de C para distintos tipos de especies de cultivos extensivos. Asimismo, posee tablas para áreas forestales que pueden ser aplicadas en nuestro país (Cuadro XII.10) y para pastizales y terrenos baldíos (Cuadro XII.11).

CUADRO XII.10.—FACTOR DE CULTIVO Y ORDENACION C PARA AREAS FORESTALES
(U. S. Soil Conservation Service, 1975)

Cubierta arbórea (% del área)	% del área cubierta por una capa de 2 pulgadas de despojos vegetales	Sotobosque	C
100 - 75	100 - 90	Pastoreo y quema controlada Intensamente pastoreado y quemado	0,001 0,003 - 0,011
70-40	80-75	Pastoreo y quema controlada Intensamente pastoreado y quemado	0,002 - 0,004 0,01 - 0,04
35-20	70 - 40	Pastoreo y quema controlada Intensamente pastoreado y quemado	0,003 - 0,0009 0,02 - 0,09

CUADRO XII.11.—FACTOR DE CULTIVO Y ORDENACION C PARA PASTIZALES Y TERRENOS BALDIOS
(U. S. Soil Conservation Service, 1975)*

Tipo de cubierta y promedio de altura de caída del goteo de agua	Cubierta arbórea y arbust. (%)	Cubierta herbácea y despojos vegetales	Porcentaje de cubierta herbácea y de despojos vegetales					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta no apreciable		G W	0,45 0,45	0,20 0,24	0,10 0,15	0,042 0,090	0,013 0,043	0,003 0,011
Cubierta de maleza alta o arbustos bajos (0,5 m altura de caída)	25	G W	0,36 0,36	0,17 0,20	0,09 0,13	0,038 0,082	0,012 0,041	0,003 0,011
	50	G W	0,26 0,26	0,13 0,16	0,07 0,11	0,035 0,075	0,012 0,039	0,003 0,011
	75	G	0,17	0,10	0,06	0,031	0,011	0,003
Arbustos (2 m de altura de caída)	25	G W	0,40 0,40	0,18 0,22	0,09 0,14	0,040 0,085	0,013 0,042	0,003 0,011
	50	G W	0,34 0,34	0,16 0,19	0,085 0,13	0,038 0,081	0,012 0,041	0,003 0,011
	75	G W	0,28 0,28	0,14 0,17	0,08 0,12	0,036 0,007	0,012 0,040	0,003 0,011
Arboles, sin sotobosque de arbustos bajos (4 m altura de caída)	25	G W	0,42 0,42	0,19 0,23	0,10 0,14	0,041 0,087	0,013 0,042	0,003 0,011
	50	G W	0,39 0,39	0,18 0,21	0,09 0,14	0,040 0,085	0,013 0,042	0,003 0,011
	75	G W	0,36 0,36	0,17 0,20	0,09 0,13	0,039 0,083	0,012 0,041	0,003 0,011

*G = La cubierta de la superficie es césped o plantas similares, con despojos vegetales compactados o «pinocha» de por lo menos 2 pulgadas de profundidad (1 pulgada = 2,54 cm).

W = La cubierta de la superficie consiste principalmente en plantas herbáceas de hoja ancha (por ejemplo, de malas hierbas con un reticulado de raíces superficial y sin despojos vegetales).

Pero, generalmente, para estudios de aproximación al fenómeno erosivo, en los que no se precisa una gran exactitud, y sí, más bien, cifras comparativas de unas áreas con otras, es adecuado utilizar tablas más sencillas (Cuadros XII.12 y XII. 13).

CUADRO XII.12.—VALORES DE 100 C PARA MEDIR LOS EFECTOS DE LA CUBIERTA ARBÓREA Y ARBUSTIVA
(WISCHMEIER, 1974)

Tipo de cubierta	% de cubierta herbácea y despojos vegetales			
	25	50	75	100
Arboles grandes (altura de la copa, 4 m)	0,93	0,97	0,80	0,73
Arboles medios (altura de la copa, 2 m).....	0,87	0,75	0,63	0,50
Arbustos altos (altura de la copa, 1 m).....	0,83	0,65	0,47	0,30
Arbustos bajos (altura de la copa, 0,5 m).....	0,79	0,58	0,37	0,16

CUADRO XII.13.—VALORES DE C PARA COBERTURAS HERBACEAS
(WISCHMEIER, 1974)

% de cobertura	Establecimiento o consolidación	Valor de C
95-100.....	Bien	0,003
80	Moderadamente	0,012
40	Pobrememente	0,10
20	Muy pobrememente	0,20

Sin embargo, hay que decir que la utilización generalizada de estas tablas presenta sus dificultades: la oscilación de valores de unas a otras es ostensible. Esto se debe a que han sido preparadas para estaciones y situaciones bastante concretas y no siempre es fácil encontrar similitudes con las condiciones del terreno del área de estudio.

Por estas razones, en nuestro país se han utilizado escalas muy simples, sobre todo en el cam-

po de los estudios hidrológicos forestales (Cuadro XII.14)

CUADRO XII.14

Tipo de vegetación		Valor de C
Agrícola		0,3
Pastizal	Césped bien consolidado: 0,01 a 0,005	0,05
	Cubierta irregular, maleza: 0,20 a 0,10	
Repoblación forestal		0,02
Terreno raso (suelo removido)		1,0

Factor de prácticas de conservación (P)

Expresa la influencia que ejercen las prácticas de cultivo, corrección y conservación en la erosión hídrica. La función de este factor es disminuir el valor de pérdida de suelo obtenido, suponiendo que existen o van a llevarse a cabo prácticas de conservación (tales como cultivo en fajas, aterrazado) en el área de estudio.

Los valores de *P*, para introducir en la ecuación general, pueden obtenerse del Cuadro XII.15.

CUADRO XII.15.—FACTOR DE PRACTICAS DE CONSERVACION (P)

(U.S. Soil Conservation Service, 1975)

VALORES FACTOR PRACTICAS CONSERVACION (P)			
% pendiente	Cultivo nivel	Cultivo en fajas siguiendo curvas de nivel	Cultivo en terrazas
1,1 - 2,0	0,60	0,30	20 % factor cultivo a nivel.
2,1 - 7,0	0,50	0,25	
7,1 - 12,0	0,60	0,30	
12,1 - 18,0	0,80	0,40	
18,1 - 24,0	0,90	0,45	

La ecuación universal puede utilizarse con distintas finalidades, entre otras:

- Calcular el promedio anual de pérdida de suelo para diferentes tipos de cubiertas vegetales, con objeto de hacer un análisis comparativo.
- Determinar la pérdida potencial de suelo en áreas en las que se efectúan operaciones de preparación para la construcción u otras actividades y en las que se supone que el suelo queda desnudo durante y/o

después de las operaciones; asimismo, en terrenos agrícolas en los que el suelo queda desprotegido (en barbecho continuo) durante ciertas épocas del año y ligeramente protegido en otras. Precisamente, uno de los usos de la ecuación más corrientes en la planificación física se basa en fijar los valores de *R*, *K*, *L* y *S*, y hacer variar *C* y *P* con el fin de que *A* oscile hasta los niveles tolerables.

Los niveles tolerables de pérdida de suelo admitidos pueden variar entre 2 t y 12,5 t por hectárea, según el tipo de suelo, espesor de éste y propiedades físicas del mismo. Se entiende que se puede admitir una pérdida de 12,5 t/ hectárea al año solamente en suelos permeables y de gran espesor. Sin embargo, se pierden con frecuencia, en cultivos limpios, de 20 a 30 t/ hectárea/año.

Según el U. S. Department of Agriculture, la ecuación puede ser utilizada para estimar la pérdida de suelo o la sedimentación producida en una cuenca. (Esto sólo si la mayor parte de la cuenca está dedicada a cultivo agrícola y la unidad de drenaje se puede dividir en secciones relativamente homogéneas en uso y tratamiento. La longitud del declive y el factor de pendiente son difíciles de determinar, y el factor *R* puede dar valores mayores que los promedios anuales reales.) Sin embargo, la ecuación sólo calcula la cantidad de tierra y no los valores netos entre suelo movilizado y suelo depositado.

La aplicación de la ecuación universal al inventario y cartografía de la erosión actual y al riesgo de erosión futura exige dividir previamente el territorio en unidades de estudio. Esto puede hacerse en las tres formas ya descritas al comienzo de este capítulo.

- Unidades homogéneas.
- Cuencas.
- Unidades geométricas.

Por cualquiera de los tres procedimientos es posible emprender el estudio de erosión. Con todos ellos se puede hallar la erosión en el momento actual y la erosión que es susceptible de producirse por efecto de alguna actuación humana, esto es, un cambio en el uso del suelo.

La diferencia, para hallar un tipo u otro de erosión, estriba en el valor de los factores que se introducen en la ecuación. Cuando se introducen valores de K , C y P correspondientes al estado del suelo, cubierta vegetal y práctica de conservación, la ecuación universal expresa la pérdida actual de suelo. Si se introducen los valores de K , C y P , que se prevé encontrar después del cambio de uso, se obtiene la pérdida de suelo que se ocasionaría en esa situación, es decir, la erosionabilidad en términos cuantitativos.

La utilización de unidades tipo cuenca para aplicar el método de la ecuación universal presenta, no obstante, las dificultades ya apuntadas en párrafos anteriores (falta de homogeneidad de la cuenca, valores exagerados de R , etc.).

CUADRO XII.16.—GUIA PARA VALORES DE TOLERANCIA DE PERDIDAS DE SUELO PARA DISTINTAS PROFUNDIDADES DE RAICES

Profundidad de raíces (cm)	Valores de tolerancia de pérdidas de suelo $t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$	
	a	b
0,25	2,2	2,2
25-50	4,5	2,2
50-100	6,7	4,5
100-150	9,0	6,7
> 150	11,2	11,2

a = Suelos con un sustrato favorable que pueden ser renovados por labores, fertilizantes, adición de materia orgánica y otras prácticas de cultivo.

b = Suelos con un sustrato desfavorable, como es el caso de rocas o rocas descompuestas, en las que no resulta económica su renovación artificial.

Véase seguidamente la aplicación de una malla cuadrada a un modelo de erosión basado en la EUPS (WAY, 1978).

La aplicación del modelo se hace por medio de un programa automático que codifica y procesa los datos de tal forma que el producto final son representaciones gráficas con el territorio dividido en cuadrículas.

El primer paso sería determinar los factores R , L y S , o estos dos conjuntamente ($L S$) para cada celda de la malla. El factor R , normalmente será el mismo para todo el área de estudio. Si las celdas se toman de 1 ha, su longitud es 100 m. y se puede calcular L :

$$L = \left(\frac{100}{22,13} \right)^m$$

$m = 0,5$ si la pendiente es $> 10 \%$.

$m = 0,6$ si la pendiente es $< 10 \%$.

Con este valor puede obtenerse $L S$ por medio de la Figura XII.6.

Si se pretende hallar la erosión en el momento actual, el resto de los factores se determina por las tablas y métodos ya descritos.

Si se pretende hallar la erosionabilidad de un área que va a sufrir un cambio de uso (se van a desarrollar actividades de tipo constructivo, por ejemplo), el valor de K será el correspondiente al suelo expuesto a la erosión: el valor de C suele tomarse igual a 1 si se prevé la eliminación total de la cubierta vegetal; el valor de P se tomará también igual a 1, si no se prevén, asimismo, medidas preventivas contra la erosión.

La Figura XII.7. muestra el diagrama de flujos del modelo.

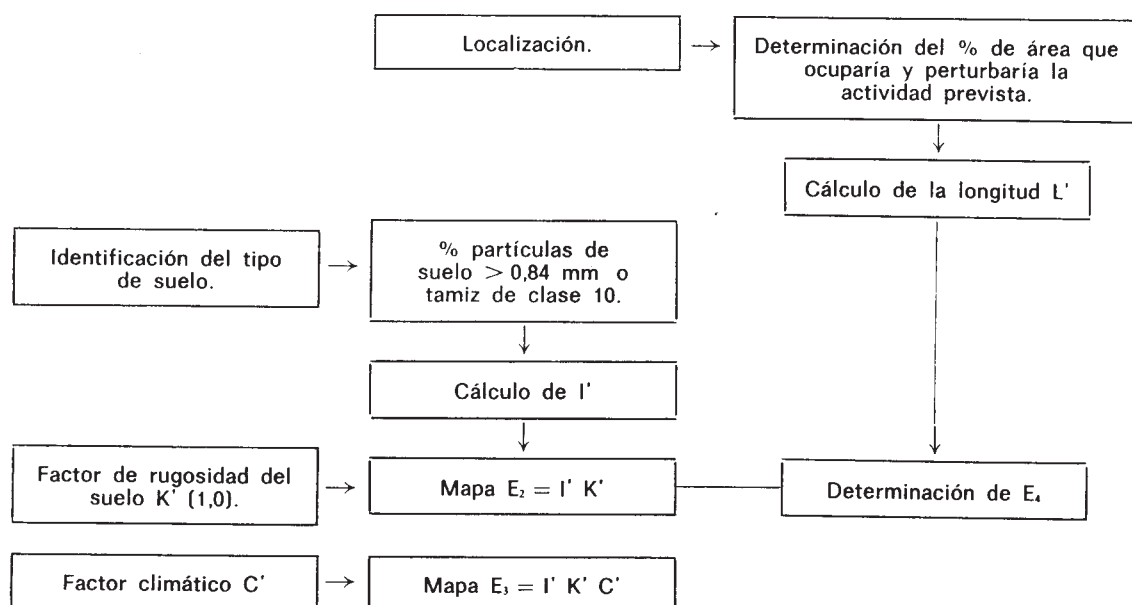
Los datos anteriores codificados para cada celda e introducidos en un banco de datos se procesan según el diagrama de flujos y se obtiene una salida gráfica de ordenador que expresa la pérdida de suelo en $t/ha/año$ para cada celda. Los valores de pérdida de suelo van agrupados en clases, y la diferente intensidad de *color* significa los distintos grados de erosión.

2.5.2. Modelos empíricos para el estudio de la erosión en cuencas hidrográficas

2.5.2.1. Extensión de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo a cuencas hidrográficas: M.U.S.L.E. (Modified Universal Soil Loss Equation)

Al comienzo de la década de los setenta, cuando aún se continuaba con las investigaciones encaminadas al mejor conocimiento de los parámetros que conforman la U.S.L.E. empieza a vislumbrarse su aplicación a cuencas hidrográficas. Son obvias las ventajas que ello supone, ya que la cuenca vertiente es la unidad hidrológica de actuación y, asimismo, se pretendía ampliar las investigaciones al problema de la contaminación

FIGURA XII.7.—DIAGRAMA DE FLUJOS DEL MODELO
(WAY, 1978)



de las aguas dentro de la cuenca, fundamentalmente los problemas planteados por los contaminantes agrarios, fenómenos de eutrofización, entarquinamiento, etc. Este problema se planteó bajo dos puntos de vista:

A. Extender la U.S.L.E. a cuencas hidrográficas en función de su homogeneidad, aplicando a distintos puntos concretos de las mismas la mencionada ecuación.

Como cuencas homogéneas se entienden aquéllas en las que la variación que existe en cada uno de los parámetros que definen la U.S.L.E. dentro de la cuenca es muy pequeña, prácticamente inexistente, para cualquier punto de las mismas.

Así, para unas condiciones especiales de extensas áreas semiáridas del suroeste de los Estados Unidos, RENAD (1974) y sus colaboradores utilizaron la U.S.L.E. para estimar la producción de sedimentos en pequeñas cuencas hidrográficas, describiendo la producción de sedimentos como :

$$A = (R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P) \cdot E_c$$

donde el factor E_c representa el factor de emisión, que puede oscilar entre 0 y 1, aún cuando nor-

malmente no suele alcanzar los valores extremos.

Los restantes términos son idénticos a los utilizados en la U.S.L.E.

El factor de emisión representa el coeficiente que transforma el total de la erosión de la cuenca en la porción que sale al exterior de la misma.

B. Efectuar modificaciones en la U.S.L.E. con las que se trata de analizar la erosión en la cuenca, distinguiéndose entre la erosión procedente de los canalillos producidos por la escorrentía (rill) y la erosión que se verifica en el área entre canalillos (inter-rill). Dentro de esta línea se encuentran las ecuaciones propuestas por Foster y colaboradores a partir de 1973 y que pueden expresarse mediante la ecuación :

$$A = W \cdot K \cdot C \cdot P \cdot S \cdot L$$

donde el término W tiene un carácter hidrológico más complejo que el índice de erosión pluvial R , ya que en él influyen tanto el efecto de la lluvia como de la escorrentía. Onstad y colaboradores (1976) definieron como valor de W el siguiente:

$$W = a R_{st} + (1-a) 0,40 Q q_s^{1/3}$$

dónde:

- R_{st} , es el factor aguacero, en unidades El de la U.S.L.E.
 Q , es el volumen de escorrentía del aguacero en mm.
 q_s , es el pico de la escorrentía en mm/h.
 a , es un coeficiente que oscila ($0 < a < 1$), y que representa la importancia relativa de la energía del aguacero comparada con la energía de la escorrentía para arrancar el suelo.

El valor del término "a" en la ecuación anterior fue estimado en 0,5 por ONSTAD y FOSTER (1975).

El resultado de todas estas investigaciones, fue el desarrollo de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Modificada (WILLIAMS y BERNDT, 1977) cuya expresión es :

$$Y = 11.8 (Q q_p)^{0.56} K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde:

- Y , son los sedimentos producidos por una tormenta en t .
 Q , volumen de la escorrentía en m^3
 q_p , el caudal máximo en m^3/s
 K, L, S, C, P , son los mismos factores empleados en la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo.

La ecuación puede ser usada para predecir los arrastres totales de grandes cuencas, si los valores de K, L, S, C y P están distribuidos uniformemente sobre la cuenca y si los cauces tributarios más importantes son hidráulicamente similares.

2.5.3. Métodos de estimación de la degradación específica de una cuenca hidrográfica

Modelo de F. Fournier (1960)

Trata de evaluar la degradación específica de una cuenca, con base en sólo dos factores que intervienen en el fenómeno de la erosión hídrica: el

clima, como precipitación y temperatura, y el relieve.

Fournier establece como parámetros representativos de ambos factores los siguientes :

- El índice de agresividad del clima, definido por la relación $\frac{P^2}{L}$; siendo p , la precipitación en mm del mes más lluvioso del año y P , el módulo pluviométrico en mm. Esta evaluación del factor climático se complementa con la consideración del tipo de clima de la cuenca, utilizando la clasificación de Turc:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 + P^2/L^2}}$$

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

P = Precipitación media anual.

T = Temperatura media del año.

Si $D = P$,

$$\frac{P^2}{L^2} = 0,1$$

$$P_2 = \sqrt{0,1} \quad L = 0,316 L \quad P_1 = 0,632 L$$

$P > P_1$ Clima húmedo

$P_2 < P < P_1$ Clima semiárido

$P < P_2$ Clima árido.

- Para el relieve se emplea el coeficiente orográfico $h \operatorname{tg} \alpha$, siendo h , la altura media del relieve de la cuenca en m y $\operatorname{tg} \alpha$, el coeficiente de masividad de Martone

($\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{S}$, siendo S la proyección horizontal de la superficie de la cuenca en km^2).

El estudio de la correlación lineal establecida entre el valor de X , degradación específica de la cuenca expresada en t/km^2 año, y el valor de Y (índice de agresividad del clima) en mm, indica un alto grado de confianza, representándose la dependencia entre ambas variables mediante cuatro rectas de regresión según los valores representativos de los otros parámetros utilizados, de la forma siguiente:

$$\text{con } p^2/P < 20 : X = 6,14 Y - 49,78$$

Para $h \cdot \text{tg} \alpha < 6$

con $p^2/P > 20$: $X = 27,12$ Y-475,4

con clima no semiárido : $X = 52,49$ Y-513,12

Para $h \cdot \text{tg} \alpha > 6$

con clima semiárido : $X = 91,78$ Y-737,62

Posteriormente, se procedió a refundir en una relación única estas cuatro ecuaciones, estableciendo la ecuación de regresión de la degradación específica simultáneamente con los dos factores de clima y relieve, representados igualmente por los parámetros; índice de agresividad del clima y coeficiente orográfico. Mediante un ajuste de regresión doble a escala logarítmica se obtuvo la relación :

$$E = 2,65 C + 0,46 M - 1,56$$

Siendo:

E , log. de la degradación específica DE

C , log. p^2/P

M , log. $h \cdot \text{tg} \alpha$

estando evaluados todos estos parámetros en las mismas unidades ya utilizadas.

Esta relación puede escribirse de la forma:

$$DE = 0,0275 \left(\frac{p^2}{P} \right)^{2,65} \cdot (h \cdot \text{tg} \alpha)^{0,46} \text{ t/km}^2 \cdot \text{año}$$

en la que aparece claramente de manifiesto la importancia que el factor precipitación tiene dentro de los procesos de degradación específica, al menos en grandes cuencas, puesto que el parámetro que lo define (índice de agresividad del clima) aparece afectado por un exponente más de cinco veces superior al que representa el factor relieve (coeficiente orográfico).

Este modelo puede ser válido para estudios generales a gran escala y siempre que las cuencas cuya degradación se intenta valorar sean mayores de 100 km² y en ellas la acción del hombre no sea acusada.

2.5.4. Modelos conceptuales y modelos físicos para el estudio de la erosión

El desarrollo y aplicación de los modelos conceptuales y físicos para el estudio de la erosión en

terrenos cultivados y cuencas hidrográficas queda fuera de los contenidos propuestos en esta guía.

No obstante, dada la creciente importancia de los modelos de erosión de tipo físico conviene destacar algunas de sus características más relevantes.

Los denominados modelos físicos incorporan las leyes de conservación de masa y energía a través de la ecuación de continuidad:

ENTRADA - SALIDA = PERDIDA O GANANCIA DE SEDIMENTOS

para cada elemento espacial.

Si consideramos un elemento de una ladera, la entrada de material es el resultado del "input" de material procedente del tramo superior y la disgregación de material, por lluvia y por escurrimiento, y existe una salida debida a la capacidad de transporte de la salpicadura y el flujo de escorrentía superficial. Si la capacidad de transporte es capaz de desplazar todo el material disgregado existe una pérdida de material; si no es así existe una ganancia.

Este enfoque fue propuesto por MEYER y WISCHMEIER en 1969. Estos autores elaboran un modelo que analiza la erosión hídrica como un conjunto de cuatro subprocesos (ver Figura XII.8):

Disgregación del suelo por la lluvia. Función del cuadrado de la intensidad de la lluvia.

Disgregación del suelo por escorrentía. Función de la pendiente del terreno y el caudal de escorrentía.

Transporte del suelo erosionado por salpicadura. Función de la intensidad de la lluvia y la pendiente del terreno.

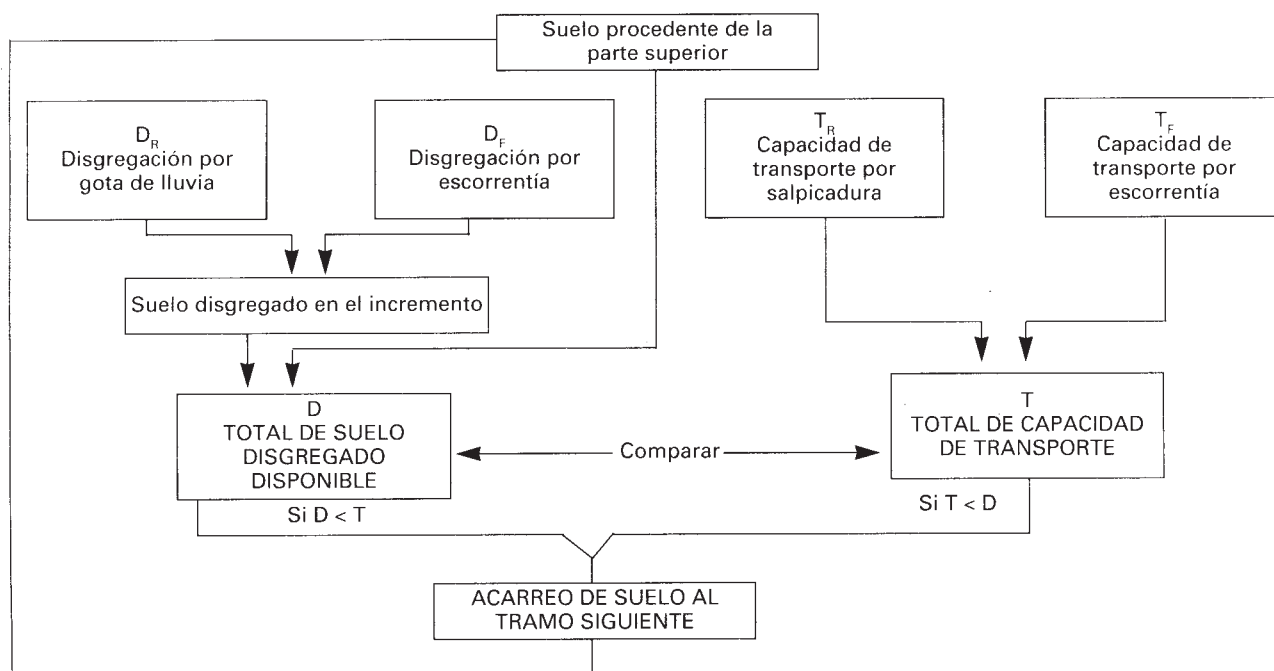
Transporte del suelo erosionado por escorrentía superficial. Función de la pendiente del terreno y el caudal de escorrentía.

El modelo permite predecir la distribución de las tasas de erosión y sedimentación a lo largo de una ladera. A pesar de las limitaciones del mode-

lo: su carácter estático, no considera los efectos de la cubierta vegetal y el almacenamiento en depresiones o no hay un transporte de los sedimentos en la base de la ladera.

El modelo de Meyer y Wischmeier se reconoce como punto de partida para la elaboración de modelos desarrollados posteriormente.

FIGURA XII.8.—MODELO FISICO: ESQUEMA CONCEPTUAL



2.6. CLASIFICACIONES DE LA EROSION EOLICA

2.6.1. Modelo para evaluar la pérdida de suelo

En este apartado se incluye un modelo para evaluar la erosión eólica, basado en una expresión de corte similar a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Los primeros estudios sobre el tema se comenzaron hace unos treinta años por CHEPIL, que identificó las variables de la ecuación; información más completa ha sido recogida por SKIDMORE y WOODRUFF (1968), de la Kansas Agricultural Experiment Station.

La ecuación se expresa como sigue:

$$E = (I' K' C' L' V)$$

donde

E' = Pérdida de suelo en t/ha/año.

I' = Índice de erosionabilidad del suelo.

K' = Factor de rugosidad del suelo.

C' = Factor climático.

L' = Longitud del terreno en la dirección del viento dominante.

V = Factor de vegetación.

Índice de erosionabilidad (I')

Representa el potencial de pérdida de suelo dependiente de las características texturales de éste. Se expresa en t/ha, y se determina a partir del % de partículas de suelo seco mayores de 0,84 mm de diámetro (Cuadro XII.17.)

La dificultad real, en la práctica, está en saber

los porcentajes de suelo seco > 0,84 mm para cada caso.

Factor de rugosidad del suelo (K')

Expresa la influencia de los surcos o rugosidad del suelo en la erosión eólica. En suelos agrícolas se mide la distancia entre surcos K_r , y el cuadro 13 proporciona el valor de K' . En los suelos no agrícolas se supone que la rugosidad del suelo es nula $K = 0$ y, por tanto, se toma $K' = 1$.

nante. La Figura XII.10 muestra la forma de calcularlo.

Factor de vegetación (V)

Expresa la influencia de la vegetación en la erosión eólica. Ha sido determinado por varios autores, siempre para zonas agrarias y fuera de nuestro país. Para estudios donde la vegetación es eliminada (por actividades de tipo constructivo, por

CUADRO XII.17.—VALORES DEL INDICE DE EROSIONABILIDAD (I') SEGUN LA TEXTURA DEL SUELO
(SKIDMORE y WOODRUF, 1968)

Fracción de suelo: 0,84 mm. (porcentaje) Unidades-decenas	TONELADAS METRICAS/HECTAREA									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		765,7	617,5	543,4	481,65	444,6	419,5	395,2	370,5	345,6
10	330,96	323,57	316,16	308,75	298,87	288,95	279,11	269,25	261,82	251,94
20	242,06	234,6	227,2	222,3	217,4	212,4	205,0	200,0	195,1	187,7
30	182,7	177,8	175,4	170,4	165,4	160,5	155,6	153,1	148,2	143,3
40	138,3	133,4	128,4	125,9	123,5	188,6	116,0	111,1	106,2	101,3
50	93,8	88,9	81,5	76,6	71,6	66,6	61,7	59,3	56,8	54,3
60	51,8	49,4	46,9	44,5	41,9	39,5	39,5	37,0	34,6	32,1
70	29,6	27,2	24,7	19,8	17,2	14,8	9,8	7,4	7,4	4,9
80	4,9									

Nota: Para un suelo con superficie de coraza, el valor de I' es, aproximadamente, una sexta parte del valor de la tabla.

Factor climático (C')

Expresa la influencia de la velocidad del viento y de la humedad del suelo en la erosión.

Es difícil de calcular; no obstante, en U. S. A. se encuentra tabulado para la mayoría de sus Estados. En nuestro país no parece que exista ninguna tabla hasta el momento y, quizás, los datos americanos pudieran servir a título orientativo.

Una aproximación al tratamiento de este dato puede encontrarse en los estudios de GARCIA SALMERON (1967).

Longitud del terreno (L')

Este factor representa la longitud efectiva del terreno considerado, barrida por el viento domi-

FIGURA XII.9.
(WAY, 1978)

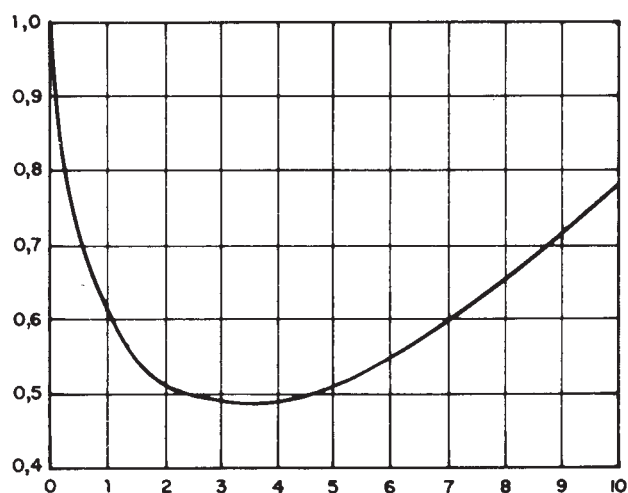
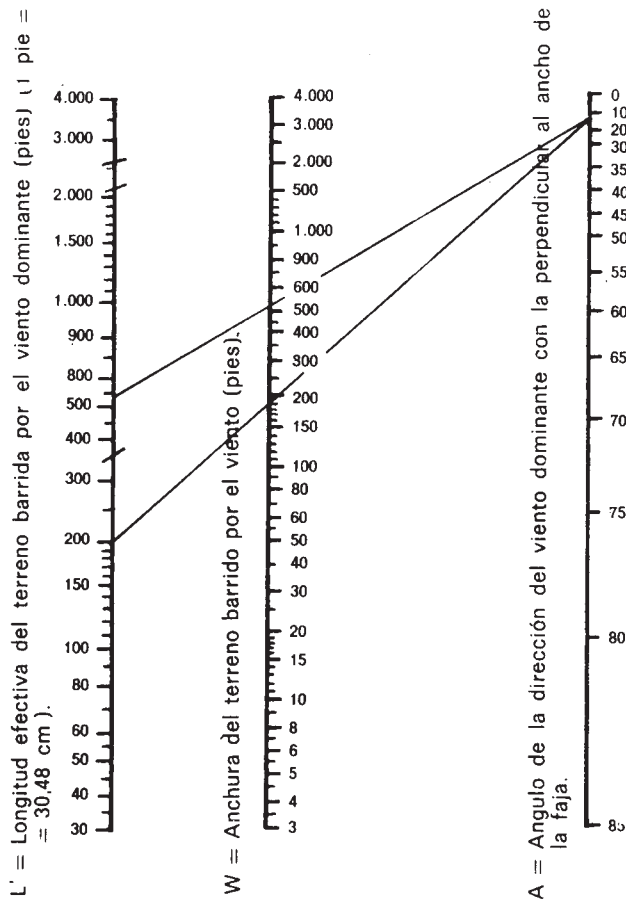


FIGURA XII.10.
(WAY, 1978)

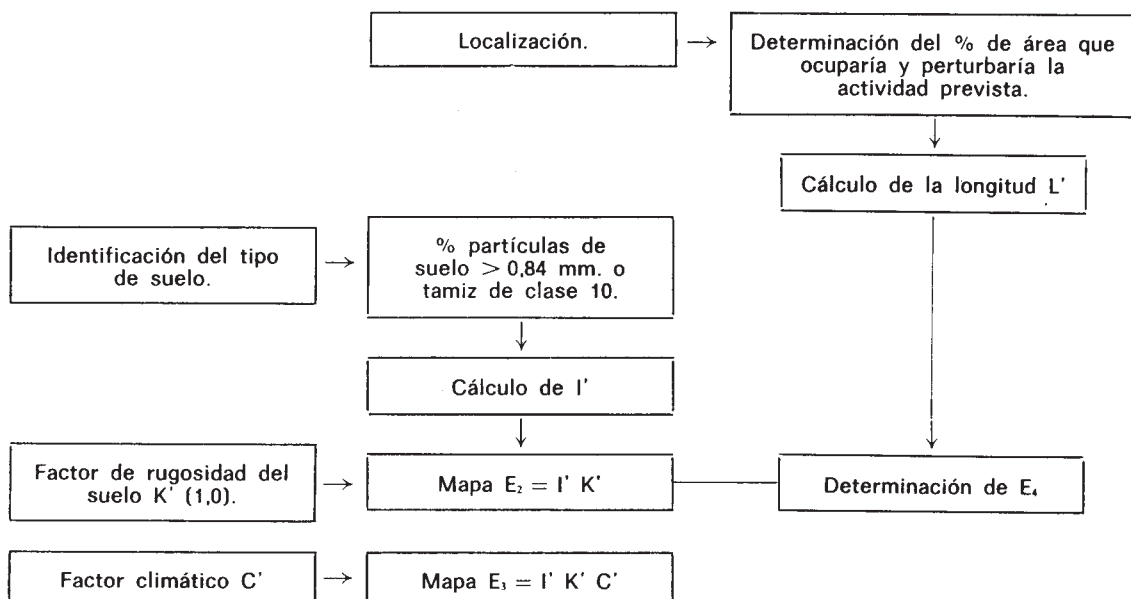


ejemplo), debe tomarse $V=1$.

La expresión de la pérdida de suelo por la erosión eólica aún no ha sido aplicada mediante métodos de programación automáticos. Al igual que la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo para la erosión hídrica, la expresión anterior puede aplicarse parcelando el terreno por medio de una malla cuadrada. Las variaciones inducidas en los factores I' , K' y V por cambios de uso del suelo podrían considerarse en la expresión general, y así, obtener el valor de la pérdida de suelo, por la acción erosiva del viento, que se ha originado en el área de estudio. Codificados y procesados convenientemente los datos para cada parcela cuadrada sería posible obtener una salida gráfica con el territorio debidamente zonificado a niveles de erosionabilidad.

El diagrama de flujos del modelo es el representado en la Figura XII.11.

FIGURA XII.11.



2.6.2. Clasificaciones en zonas homogéneas por su grado actual de erosión

2.6.2.1. La clasificación del Soil Survey Staff, U. S. (1951)

Al igual que con la erosión hídrica, dicho manual recomienda el uso de las clases siguientes (esta vez, cinco) de erosión eólica:

Clase 1 («Fase erosionada por el viento»)

El viento ha removido una porción suficiente del horizonte A del suelo, como para que durante las operaciones de cultivo aflore y se mezcle con el suelo superficial en la capa arable el horizonte B u otros horizontes subyacentes. Sin embargo, son muy raros los casos en que esta condición es uniforme a través de todo un área cartografiable. Usualmente la capa arable está formada, en algunas partes, principalmente por el horizonte A original, mientras que en otras éste ha sido removido. Generalmente ha sido removido entre el 25 y el 75 por 100 del horizonte A original (o del suelo superficial en suelos con horizontes A de poco espesor).

Clase 2 («Fase severamente erosionada por el viento»)

El viento ha removido todo el horizonte A y parte del horizonte B u otro horizonte inferior. La capa arable está formada principalmente por los horizontes subyacentes al horizonte A original (o por capas inferiores a la capa arable en suelos con horizontes A de poco espesor), aunque dentro del área se pueden encontrar algunas manchas en donde ha quedado buena parte del horizonte A original. En el área se pueden encontrar manchas totalmente denudadas por el viento (*blow out*).

Clase 3 («Tierras barridas por el viento») («Blow out land»)

El viento ha removido la mayor parte del perfil del suelo y la tierra se clasifica, entonces, como una clase miscelánea. No es posible usar estas áreas con fines agrícolas sino mediante una recuperación extensiva. Las depresiones totalmente barridas por el viento son numerosas y se profundizan hasta el subsuelo y aun hasta la roca madre. Las áreas que se encuentran entre estas depresiones han sido profundamente cubiertas por material procedente de los «*blow outs*».

Además de las clases anteriores, que se usan para indicar remoción, se usan dos clases más

para definir áreas en las cuales el viento ha depositado cantidades significativas de material:

Clase 1 a («Fase de depósito eólico» —«Over-blown»—)

Depósitos recientes de material transportados por el viento cubren el suelo con capas de un espesor suficiente para alterar sus características significativas hasta 60 cm. Cuando se usa esta clase como una fase, el tipo de suelo toma su designación textural de la nueva capa superficial. Cuando los mantos son de mayor profundidad, usualmente, aunque no siempre, requieren una diferenciación al nivel de series.

Clase 2 a («Fase de montículos eólicos» —«Wind hummocks»—)

Son depósitos recientes de material edáfico dispuestos en forma de montículos o dunas bajas. El relieve en esta clase está menos denudado que en las tierras desnudas. El material del suelo ha sido transportado únicamente en forma local, en contraste con lo que sucede en las clases 1 y 2 de erosión eólica en las cuales una parte considerable del material del suelo ha sido barrida de las áreas cartografiadas.

Tal y como las clases de erosión hídrica, las clases anteriores sirven como guías generales para fases de tipos o series de suelos. Cada una debe ser definida e interpretada de acuerdo con su significación local.

2.6.2.2. Clasificación americana según la intensidad de la erosión eólica

Se utiliza para clasificar los suelos agrícolas. Los efectos se indican por los símbolos O, P, R, S, T y Z para el arrastre del suelo, y F, H, K, L, M y N para los depósitos.

Los grados de arrastre son:

(GARCIA SALMERON, J., 1967)

Clase	% de tierra vegetal arrastrada
O. Erosión no discernible	0 - 25
P. Erosión ligera	
R. Erosión moderada o moderadamente importante	25 - 75
S. Erosión severa	75 - 100
T. Erosión muy severa	Toda la capa vegetal y el 25-75 por 100 del subsuelo.
Z. Erosión extraordinariamente severa	Más del 75 por 100 del subsuelo.

Los grados de sedimentación son:

Clase	Espesor de la acumulación en cm.
F. Acumulación somera	0 - 15
H. Acumulación moderada, uniformemente repartida	15 - 30
K. Acumulación moderada, con distribución desigual	15 - 30
L. Acumulación gruesa	30 - 91
M. Acumulación en duna (pequeña).	91 - 183
N. Acumulación en duna (grande) ...	Más de 183

2.7. INFORMACION BASICA DISPONIBLE

El Ministerio de Agricultura a través del Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza ha editado a nivel de cuenca hidrográfica y a escala 1:400.000 los mapas de Estados Erosivos.

Acompañan al mapa de estados erosivos tres mapas temáticos básicos :

- Mapa clinométrico y del factor topográfico (LS)
- Mapa sinóptico de litofacies. Factor de erosionabilidad (K).
- Mapa de Usos del Suelo. Factor de cultivo (C)

Hasta el momento se dispone de los mapas de estados erosivos correspondientes a las cuencas siguientes :

- Cuenca del Ebro
- Cuenca del Júcar
- Cuenca del Segura
- Cuenca del Sur
- Cuenca del Guadalquivir
- Cuenca del Tajo
- Cuenca del Duero

2.8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE USDA: *HYMO: Problem-oriented computer language for hydrologic modeling* Texas University, Texas, 1973.

AGUILLO, M. et al.: *Guía para la elaboración de estudios del medio físico : Contenido y metodología (2.ª edición)*. MOPU, Madrid, 1984.

ALBADALEJO, ORTIZ y MARTINES-MENA: Evaluation and mapping of erosion risks : an example for SE Spain, 1988. *Soil Technology*, 1, págs. 77-87, 1988.

ANDERSON, Cit. en LÓPEZ CADENAS y BLANCO, 1976.

ARNOLDUS, H.: An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation In: DE BOODT, M. y GABRIELS, D. (eds.). *Assessment of Erosion*. Wiley, págs. 127-133, 1980.

AUERSWALD, K.: Erosion hazard maps for Bavaria In: *Erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, págs. 41-55, 1988.

BERGSMAN, E.: Provisional rain-erosivity map of the Netherlands In: DE BOODT, M. y GABRIELS, D. (Eds.) *Assessment of Erosion*. Wiley, págs. 121-127, 1980.

BICKNELL, B. R. et al. Modeling water quality and the effects of agricultural best management practices in the Iowa river basin, *Water Science Technology*, 17, págs. 1141-1153, 1985.

BOLLINS, A. et al.: Rainerosivity map of Belgium In: DE BOODT, M. y GABRIELS, D. (Eds.) *Assessment of Erosion*. Wiley, págs. 111-121, 1980.

BOUYOUCOS. Cit. en LÓPEZ CADENAS y BLANCO.

BRIGGS, D.J., y FRANCE, J.: Mapping erosion by rainfall for regional environmental planning. *Journal of Environmental Management*, 14(3), págs. 219-228, 1982.

CHISCI, G., y MORGAN, R. P. C.: Modelling soil erosion: why and how In: *Erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, págs. 121-147, 1988.

DAVID, W. P., y BEER, C. E.: Simulation of Soil Erosion Part I. Development of a mathematical erosion model. *Transactions of ASAE*, 18, págs. 126-129, 133, 1975.

DAVID, W. P., y BEER, C. E.: Simulation of Soil Erosion Part II. Streamflow and suspended sediment simulation results. *Transactions of ASAE*, 18, págs. 130-133, 1975.

DEBELLE, G.: Roadside erosion and resource implications in Prince Edward Island. *Geographical Paper núm. 48, Policy Research and Coordination Branch, Department of Energy, Mines and Resources*. Ottawa, 1971.

EVANS, R., et al.: Monitoring soil erosion in England and Wales, in *Erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, págs. 73-93, 1988.

FAO: *Assessing soil degradation*. Soil Bulletin, 34. Roma, 1977.

FAO: *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*, FAO. Roma, 1980.

FOSTER, G. R., et al.: Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units, *Journal of Soil and Water Conservation*, págs. 355-359, 1981.

FOSTER, G. R., et al.: Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. *Transactions of ASAE*, 24, págs. 1253-63, 1981.

FOURNIER, F.: *Climat et erosion* Presses Universitaires de France, París, 1960.

GABRIELS, D., et al.: Provisional rain erosivity maps of some European Community countries. In: *Erosion assessment and modelling*. Commission of the European Communities, págs. 93-119, 1988.

GARCÍA SALMERÓN, J.: *Erosión edáfica*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid, 1967.

- GIORDANO, A.: *The project «Soil erosion risks and important land resources» in the CORINE program*. Comunicación al Seminario CORINE. Madrid 17-18 de noviembre, 1988.
- GONZÁLEZ ALONSO, S., y MARTÍNEZ FALERO, E.: Erosion and physical planning. Mapping of soil losses at regional level. *Proceedings of the third European Colloquium of Quantitative Geography*. Augsburg 13-17 septiembre, 1982, 1986.
- HUDSON: *Conservación del suelo*. Reverté. Barcelona, 1982.
- ICONA: *Paisajes erosivos en el sureste español. Ensayo de metodología para el estudio de su cualificación y cuantificación*. Monografía 26, Mapa, 1982.
- KNISEL, W. G.: CREAMS a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems *USDA Conservation Research Report 26*, 1980.
- KIRKBY, M. J., y MORGAN, R. P. C.: *Soil Erosion* Wiley and Sons. New York, 1980.
- LAL, R.; LAWSON, T. L., y ANASTASE, A. H.: Erosivity of tropical rains In: DE BOODT, M. y GABRIELS, D. (eds.): *Assessment of Erosion*, págs. 143-154, Wiley, 1980.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, et al.: Geometría de cuencas fluviales: Las redes de drenaje del alto guadalentin. ICONA Monografía 50 MAPA, Madrid, 1988.
- LÓPEZ CADENAS, F., y BLANCO, M.: *Hidrología forestal*. E.T.S. de Ingenieros de Montes. Madrid, 1976.
- LÓPEZ UNZU, F.: *Distribución o Integración en el modelado matemático de la hidrología torrencial*. Tesis Doctoral (no publicada), E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, 1989.
- MARTONE. Cit. en LÓPEZ CADENAS y BLANCO, 1976.
- MEYER, L. D., y WICHMEIER, W. H.: Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Transactions of ASAE*, 12, págs. 754-8, 762, 1969.
- MINGUEI, J.: *Investigación de metodologías para la estimación de la erosión en cuencas de pequeña y mediana extensión*. Tesis Doctoral (no publicada), E.T.S. Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid, 1978.
- MINGUEI, J., et al.: *Metodología para la evaluación de la erosión hídrica*. MOPU, Madrid, 1984.
- MITCHELL, J. K., y BUBENZER, G. D.: Estimación de la pérdida de suelo, en: KIRKBY, M. J., y MORGAN, R.P.C. (eds.) *Soil Erosion*. Wiley and Sons. New York, 1980.
- MORGAN, R. P. C.: Soil erosion and conservation in Britain. *Progress in Physical Geography*, 4, págs. 24-47, 1980.
- MORGAN, R. P. C.: *Soil Erosion and Conservation*. Logman, Essex, 1986.
- MORGAN, R. P. C. (ed.): *Soil Erosion and its control*. Van Nostrand. New York, 1986.
- MONTURIOL, F., y col.: *Cartografía edafológica y capacidad de uso de los suelos de la franja costera de la provincia de Santander*. CIDS, Santander, y CISC, Madrid, 1978.
- ONSTAD, C. A., y FOSTER, G. R.: Erosion modelling on a watershed. *Transactions of ASAE*, 18, págs. 288-293, 1975.
- RITCHER, G.: Soil erosion mapping in Germany and Czechoslovakia. En: DE BOODT, M., y GABRIELS, D. (eds.): *Assessment of Erosion*, págs. 29-55, Wiley, 1980.
- ROQUERO, C.: *Posibilidades y necesidades futuras de información sobre el riesgo de erosión en los suelos de la región mediterránea*. Comunicación al seminario CORINE. Madrid 17-18 de noviembre, 1988.
- RUBIO, J. L.: Erosion risk mapping in areas of the Valencia Province (Spain). En: *Erosion assessment and modelling*, págs. 25-41, Commission of the European Communities, 1988.
- SCOGING, H.: The relevance of time and space in modelling potential sheet erosion from semi-arid fields. En: DE BOODT, M., y GABRIELS, D. (eds.): *Assessment of Erosion*, págs. 349-361, Wiley, 1980.
- SKIDMORE, E. J., y WOODRUFF, N. P.: «Wind erosion forces in the United States and their use in predicting soil loss». *Agricultural Handbook*, 346, USDA, Washington, D. C., 1968.
- STEINITZ, C., y SINTON, D.: *Program IMGRID*. Graduate School of Design, Harvard Univ., Cambridge, Mass., 1975.
- STOIRE, E. R.: *Manual de evaluación de suelos*. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México, 1970.
- TAYLOR, J. C.: *An evaluation of the universal soil loss equation for predicting watershed sediment yield*. Master thesis, Iowa State Univ., Ames., 1970.
- U. S. SOIL CONSERVATION SERVICE: *Soil Survey Manual*. USDA Handbook, 18, Washington, 1951.
- U. S. SOIL CONSERVATION SERVICE: Procedure for computing sheet and rill erosion on project areas. *Technical Release*, 51, 1975.
- WAY, D. S.: *Terrain analysis*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Penn., 1973.
- WAY, D. S.: «The soils models. Technical documentation». En: *The Interaction Between Urbanization and Land: Quality and quantity in environmental planning and Design*, Landscape Architecture Research Office Graduate School of Design. Harvard University. Cambridge, Massachusetts, 1978.
- WILLIAMS, A. R., y MORGAN, R. P. C.: Geomorphological mapping applied to soil erosion evaluation. *Journal of Soil Erosion Conservation*, 31, págs. 164-8, 1976.
- WILLIAMS, J. R.: Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*, 11 (5), págs. 965-974, 1975.
- WILLIAMS, J. R., y BERNDT, H. D.: Determining the universal soil loss equations's length-slope factor for watersheds. En: Soil Conservation Society of America *Soil Erosion Prediction and Control*. Iowa. U.S.A., 1976.
- WILLIAMS, J. R., y BERNDT, H. D.: Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Transactions of ASAE*, 20, págs. 1100-1104, 1977.
- WISCHMEIER, W. H., y SMITH, D. D.: Rainfall energy and its relationship to soil erosion *Trans. Am. Geophys. Un.*, 39, págs. 285-291, 1958.
- WISCHMEIER, W. H., y SMITH, D. D.: *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture Washington D. C., 1978.

3. RIESGOS ASOCIADOS A DETERMINADAS LITOLOGIAS

3.1. EXPANSIVIDAD

Una propiedad peculiar de algunos suelos arcillosos, es la de experimentar cambios de volumen

cuando varía su contenido en agua. Esta particularidad está vinculada al desequilibrio eléctrico de los cristales de arcilla, que provoca la entrada de los dipolos en el espacio reticular con el consiguiente aumento de volumen. El calificativo de expansivas, hace referencia a la capacidad de hinchamiento de las mismas, pero también puede tener lugar una disminución del volumen por desecación.

Esta inestabilidad volumétrica genera movimientos diferenciales, con levantamientos y asentos que distorsionan las estructuras que sobre ellos se ubican. Para que esto se produzca, se han de dar alternativas en la humectación que pongan en evidencia esa capacidad.

Los factores detonantes pueden ser, entre otros, una actuación geotécnica o alternativas climáticas estacionales. En el primer caso se producen modificaciones morfológicas, alteración del drenaje natural, perturbación del nivel freático en las proximidades de la actuación, etc. Junto a ello, los efectos propios de la obra, que impide la precipitación directa sobre el suelo y la insolación provocando transferencias laterales de humedad. Fuera del ámbito puramente geotécnico, el riego de jardines, la rotura de cañerías, etc. provocarían la expansión de suelos secos. Por otra parte, la presencia de árboles o calderas de calefacción puede generar bulbos de desecación con asentos sobre suelos húmedos (SALINAS, 1988).

3.1.1. Detección de zonas de riesgo

Las unidades litológicas que presentan riesgo de expansividad, son aquellas que contienen minerales del grupo de las esmectitas, la vermiculita y la halloysita. Su identificación se lleva a cabo en laboratorio, aunque existen indicios que permiten advertir su presencia en el campo (agrietaamiento profuso característico en seco, materiales muy moldeables y adherentes una vez humedecidos, etc (ver AYALA *et al.* 1986).

En cualquier caso, suelen aparecer reflejadas en los trabajos de cartografía de riesgos geológicos y geotécnicos. En España, la mayor probabilidad de suelos expansivos, se da en terrenos neógenos y del Keuper, así como los arcillosos procedentes de la alteración de material volcánico.

3.1.2. Prevención y corrección

Hay distintas maneras de enfrentarse al pro-

blema geotécnico de la expansividad de las arcillas. En primer lugar, existe la posibilidad de evitar el emplazamiento sobre este tipo de litologías de edificaciones, siempre que esto sea posible.

Cuando no sea así, hay varias formas de actuación:

- Sustituir el suelo (sólo realizable puntualmente).
- Estabilizarlo con cal, que actúa como cemento, u otros aditivos químicos.
- Construir barreras para el agua (drenajes superficiales o profundos) para evitar transferencias laterales.
- Tomar medidas constructivas especiales de cimentación, etc.

3.2. RIESGOS ASOCIADOS AL CARST

Globalmente considerado, el medio cárstico constituye un caso peculiar en la problemática de los riesgos geológicos. Entendiendo el carst como un sistema abierto en continua evolución, su arquitectura es consecuencia de la búsqueda de un equilibrio geomecánico, con un motor básicamente hidrogeológico. En él se desarrollan procesos de disolución-precipitación-erosión-sedimentación, gravitatorios, etc. (FABIAN, 1983).

Se pueden clasificar los riesgos ligados al carst en geomecánicos e hidrogeológicos.

3.2.1. Riesgos geomecánicos

Asientos: en lapiaz cubierto por arcillas o limos, como respuesta a la diferente capacidad portante del material cárstico y los sedimentos.

Subsidencia: descensos lentos y paulatinos del suelo. Se dan en los carst cubiertos por una potente capa de sedimentos o bien en los desarrollados sobre litologías margo-yesíferas o salinas, más plásticas.

Hundimientos: movimientos bruscos en la vertical de una porción de terreno, que dan como resultado dolinas por colapso de la cavidad subyacente.

3.2.2. Riesgos hidrogeológicos

Consisten fundamentalmente en la reactivación de valles secos y la inundación de «poljés» (gran-

des áreas deprimidas dentro del macizo) por aguas procedentes del carst al que habitualmente alimentan. Su morfología con fondo plano, favorece estos procesos, dada la incapacidad de los conductos habituales para drenarlas en caso de fuertes lluvias. Ambas zonas son de alto riesgo, dada la intensa colonización que de ellas hace el hombre.

3.2.3. Métodos de predicción, prevención y corrección

Alcanzan únicamente a situarlos en el espacio, y a veces ni esto es posible. La cartografía geomorfológica del carst es el método más inmediato de trabajo (DURAN, 1987). La cartografía de las dolinas existentes permite inferir las condiciones de ocurrencia de los hundimientos (lineaciones estructurales, causas geomorfológicas, litoestratigráficas, etc.). De este modo se pueden determinar las zonas de máximo riesgo de nuevos colapsos.

La exploración espeleológica, el estudio y la cartografía detallada del carst, acotarán aún más la caracterización del macizo.

De particular importancia son las técnicas geofísicas: microgravimetría, sísmica, eléctrica, magnética, radar, etc. De entre éstas, destaca la eficiencia de la microgravimetría, que localiza defectos de masa (huecos) a escasa profundidad.

La hidroquímica puede, en ocasiones, dar la clave de ciertos hundimientos cársticos, sobre todo en formaciones salinas y yesíferas. Un incremento inhabitual de la salinidad del agua surgente (debido a la disolución de algún paquete salífero) irá probablemente seguido de cambios en la morfología subterránea y/o superficial.

Las técnicas estructurales de defensa son escasas y sólo realizables a posteriori. En los casos puntualmente necesarios, tras la detección de cavidades o el hundimiento, pueden realizarse rellenos, puenteados, etc.

4. RIESGOS ASOCIADOS A PROCESOS GRAVITACIONALES

4.1. DEFINICIONES

La estabilidad de un suelo (más propiamente, de los materiales que constituyen o cubren una

pendiente: rocas, suelo, nieve) es una cualidad que expresa su mayor o menor tendencia a permanecer *in situ*. A esta cualidad se suele aludir por su opuesta, la inestabilidad, definida como tendencia al desplazamiento pendiente abajo o como grado de susceptibilidad al movimiento. Cuando la referencia es al movimiento (rotura de una masa de terreno, sometida a esfuerzos superiores a su resistencia al corte), puede considerarse como un proceso: «Un movimiento en masa es un conjunto de procesos por los cuales los materiales terrestres, en ocasiones previamente afectados por procesos de alteración, se mueven por la acción de la gravedad (WAY, 1973).

A diferencia de la erosión, en este proceso no actúa un agente de transporte (agua, hielo, viento); sin embargo, el agua se encuentra íntimamente asociada a él, al ayudar al flujo descendente una vez iniciado el movimiento. Lo mismo se puede decir del hielo y la nieve, ya que incrementan el peso o la masa de los materiales.

La importancia de la estabilidad es grande en los estudios del medio físico: los riesgos de desprendimientos y movimientos en masa imponen fuertes limitaciones al desarrollo de las actividades constructivas y a la asignación de usos al suelo.

4.1.1. Factores que influyen en la inestabilidad

Generalmente se combinan muchos factores para producir este tipo de movimientos, aunque en esencia suelen operar dos fuerzas fundamentales: el esfuerzo cortante que tiende a producir el deslizamiento y la resistencia al corte o cizalladura que se opone a aquél. La estabilidad del suelo depende del equilibrio entre ambas fuerzas. Si predomina aquélla, la pendiente es inestable; si predomina la segunda, la pendiente resulta estable.

El esfuerzo cortante puede aumentar por diversas causas. Una de las más comunes es el aumento del ángulo de pendiente, bien por desmontes artificiales o por agentes naturales. Al aumentar la pendiente, aumenta el esfuerzo cortante, existiendo para cualquier material un nivel máximo de esfuerzo admisible relacionado con cada valor determinado de inclinación del terreno. Esta inclinación crítica se denomina «ángulo de reposo, y es uno de los factores a considerar al

determinar la susceptibilidad al deslizamiento. (Ver Capítulo V. Apartado 5.2.)

Otra causa importante es el aumento de masa o de peso de la superficie del suelo. Este aumento puede ser provocado por una excesiva acumulación de agua o nieve, por la introducción de ciertas estructuras artificiales, etc. En cualquier caso, el aumento de peso provoca un importante aumento del esfuerzo cortante que puede romper el equilibrio y dar lugar a movimientos del terreno.

Asimismo, la alternancia de estratos de distintos materiales, sobre todo si son paralelos a la línea de pendiente, produce un aumento en el riesgo de movimientos. La distinta textura y permeabilidad facilita el desplazamiento de un estrato sobre otro.

Por otro lado, la resistencia al corte puede disminuir por la existencia de fallas y grietas, la alteración del suelo, las acciones sobre la vegetación, etc.

A continuación se indican las causas y condiciones que pueden inducir movimientos en masa, según distintos autores:

4.1.1.1. *Causas inmediatas de movimientos de masa (SHENG, 1966)*

- Concentración de aguas de lluvia.
- Esgurrimientos.
- Descalces o desmontes por las corrientes de agua.
- Excavaciones artificiales (canteras, carreteras . . .) .
- Cultivos en pendiente.
- Proceso «geológico».
- Combinaciones de las causas anteriores.

4.1.1.2. *Condiciones que inducen susceptibilidad al movimiento en masa (WAY, 1973)*

- Suelos arcillosos, cohesivos y saturados de agua.
- Suelos sueltos con estructura particular y baja resistencia al corte o cizalladura.

- Rocas sedimentarias alternadas con estratos paralelos a la pendiente de las laderas.
- Rocas metamórficas de estructura muy esquistosa y con planos de exfoliación paralelos a la pendiente de las laderas.
- Rocas ígneas o metamórficas muy alteradas o descompuestas.
- Existencia de fallas o fracturas paralelas o interceptando las pendientes.
- Materiales intercalados o alternantes de diferente resistencia o permeabilidad.
- Existencia de fuerte escorrentía a lo largo de las laderas.
- Suelos de coluvión.
- Existencia de alternancias rápidas en el nivel de las capas freáticas.

4.1.1.3. *Factores que determinan el grado de estabilidad de los suelos (DUNNE y LEOPOLD, 1978)*

Factores que controlan las fuerzas que impulsan al deslizamiento o desprendimiento pendiente abajo:

- Grado de pendiente.
- Acentuación de la pendiente por inclinaciones tectónicas.
- Socavación o desmonte de la pendiente por procesos geomórficos o por actividades humanas.
- Aparición o colocación de cargas en la parte superior de las laderas.
- «Stress» a corto plazo generado por terremotos.

Factores que controlan la resistencia al corte o cizalladura de los materiales que forman la ladera:

- Naturaleza de los materiales geológicos: tipo de roca, estructura de la roca (zonas de unión o juntas, fallas, ángulo de buzamiento), naturaleza de los productos de alteración de la roca.
- Cambios de la presión del agua en los poros del material de la ladera, debidos a:

- Fluctuaciones del agua de lluvia o del agua del deshielo.
- Drenaje y escorrentía del agua de las tormentas.
- Sumersión.
- Fluctuación del nivel de agua en los embalses.
- Filtraciones del agua de canales, cultivos de regadío, fosas sépticas, alcantarillados y conducciones de agua.
- Concentración de corrientes de agua subterránea en estructuras geológicas, tales como fallas o juntas, o debido a la secuencia estratigráfica de materiales geológicos de distinta permeabilidad.
- Vibraciones debidas a movimientos sísmicos, que pueden reducir la resistencia a la cortadura de materiales debidamente cementados (arena o limos, por ejemplo).
- Efectos debidos a las raíces de los árboles, que pueden incrementar la cohesión de los suelos; esta cohesión se pierde cuando las raíces mueren o se pudren (talas, fuegos...).

4.1.1.4. Factores que contribuyen a aumentar el esfuerzo cortante o a disminuir la resistencia al corte (MARSH, 1978)

Factores que contribuyen a un esfuerzo cortante elevado:

- Remoción del soporte, lateral o subyacente.
- Desmontes por la acción de ríos o corrientes.
- Acciones humanas (movimientos de tierras, excavaciones, minas, etc.).
- Alteración de estratos débiles en el pie de las pendientes.
- Remoción de materiales granulares por erosión, etc.
- Aumento de las cargas en la pendiente:
 - Por agentes naturales (paso de nieve, hielo, agua de lluvias, derrubios de roca . . .).
 - Por acciones humanas (construcción de taludes, edificaciones, escombros).
- Movimientos sísmicos y vibraciones:
 - Terremotos.
 - Tráfico pesado, actividad minera...

- Inclinación o declive naturales a nivel regional.

Factores que contribuyen a una resistencia al corte *baja*.

- Estado inicial de los materiales:
 - Composición. Materiales intrínsecamente débiles, tales como arcillas no consolidadas.
 - Textura. Suelos sueltos con estructura granular inestable y bajo rozamiento entre partículas.
 - Estructura interna con fallas, planos de exfoliación, etc.
- Suelos movidos artificialmente, tales como terraplenes y desmontes.
- Alteración del suelo y del lecho rocoso como resultado de su aprovechamiento para materiales constructivos.
- Alteración del suelo y del lecho rocoso como resultado de la pérdida de materiales cementantes.

Factor	Efecto
Helada	Cambios de volumen en el regolito; el efecto es máximo en suelos de textura fina (limos y arcilla) en zonas frías.
Humectación y desecación alternadas	Cambios de volumen causados por la alternancia de humectación y desecación, fundamentalmente en suelos arcillosos.
Alternancia de calentamiento y enfriamiento	Expansión y retracción que pueden producir movimientos pendiente abajo.
Efectos del desarrollo o decadencia de la vegetación	Las raíces de la vegetación al introducirse en el suelo pueden ayudar al movimiento de materiales; los vacíos dejados por el pudrimiento de las raíces se colmatan inmediatamente por partículas que caen de arriba de la pendiente.
Actividad de los animales.	La construcción de madrigueras y la compactación de la superficie facilitan el movimiento de las partículas, pendiente abajo.
Disoluciones procedentes de la meteorización	Los materiales disueltos en suelos y rocas por los procesos de alteración dejan cavidades, que se colmatan por partículas de suelos que caen de las partes altas.
Nieve	La acumulación de nieve incrementa la masa y el contenido de agua de la superficie, facilitando la reptación y, en general, el movimiento, pendiente abajo, de las partículas del suelo.

- Cambios de la presión entre las partículas del suelo, debido a incrementos del contenido en agua:
 - Flotación de las partículas en suelos saturados de agua.
 - Pérdida de la tensión capilar en suelos sobresaturados de agua.
 - Acción de la presión de escurrimiento del agua gravitacional al percolar.
- Acciones sobre la vegetación natural:
 - Talas de arbolado, desbroces y aclareos.
- Movimientos sísmicos:
 - Terremotos.

4.2. TIPOS DE MOVIMIENTOS

En estos procesos, los diferentes tipos de riesgos son identificables con cada uno de los movimientos.

La variedad en cuanto a las características y parámetros a tener en cuenta, hace difícil establecer una clasificación global de estos procesos. Por tanto, existe un gran número de ellas según diversos criterios. Se describen a continuación los principales tipos de movimientos en masa y sus características más importantes, basándonos en la clasificación de SKINNER Y PORTER (1987), con algunas modificaciones.

4.2.1. Caída

Es un proceso muy rápido, incluso instantáneo, de caída libre de material individualizado, favorecido por fracturas o diaclasas y planos de estratificación, así como por la pérdida de base por zapamiento. Está asociado, generalmente, a zonas muy escarpadas. El material de derrubio es acumulado al pie del talud.

Es frecuente en cantiles fluviales o acantilados marinos por pérdida de sustentación en la base, en paredes periglaciares, aristas, crestas, etc.

En algunos casos, por la velocidad del proceso y el contacto con el sustrato, ciertas modalidades de caída adquieren las características de un deslizamiento. Este es el caso de los desplomes. Para diferenciar ambos movimientos se utilizan criterios morfológicos y estructurales. Un tipo especial de desplome es el «vuelco», en el que el paquete desliza basculando hacia abajo por la pendiente.

4.2.2. Avalancha

Movimientos muy rápidos, de una masa de roca o derrubios acompañada de grandes cantidades de nieve o hielo, a favor de pendientes muy fuertes, cuando se ha acumulado una excesiva cantidad de materiales. El movimiento se acelera por la inclusión de aire y agua que disminuyen los rozamientos internos entre las partículas de la masa.

Las avalanchas de roca son frecuentes en zonas en que rocas sedimentarias intercaladas o rocas de estructura hojaldrosa presentan sus estratos paralelos a la pendiente de la ladera en las que la erosión ha movido los soportes laterales de los materiales inclinados. Son depósitos con una distribución caótica de bloques.

4.2.3. Deslizamiento

Movimiento rápido de una gran masa de tierra y roca individualizada que se desplaza por la pendiente resbalando sobre la superficie soporte manteniendo sus constantes geométricas.

Cuando los materiales puestos en movimiento no son individualizados y no conservan sus constantes geométricas, se trata de un movimiento en masa. Es difícil su diferenciación del flujo. Algunos autores, por ello, distinguen entre flujo seco y flujo mojado (VARNES 1958); otros dan importancia al contenido en humedad (CARSON Y KIRBY 1972).

Un tipo particular de deslizamiento es el rotacional, simple o múltiple, al que corrientemente se denomina SLUMP.

4.2.4. Flujo

Movimientos más o menos rápidos de masa rocosa no consolidada de granulometría fina. La saturación en agua puede provocar que se comporte como un fluido de alta viscosidad, haciéndose más espeso generalmente al final de su recorrido.

Es complicado establecer una única superficie soporte o base de deslizamiento: el movimiento se realiza a favor de múltiples planos internos, con deformación del material, dando lugar a pliegues, estrías, etc.

Suele estar asociado a violentas tormentas, fusión de hielos, ascensos del nivel freático, etc, que aportan más agua de la que puede ser absorbida.

Los movimientos tipo flujo suelen afectar a materiales con granulometría muy fina, con abundante presencia de minerales de arcilla, derrubios o fragmentos de roca. Este último caso se diferencia de un deslizamiento o una avalancha por el contenido en agua (VARNES 1958).

Un tipo especial de flujo es la solifluxión, movimiento de baja velocidad de material no continuo con gran deformación, asociado a los procesos de hielo-deshielo.

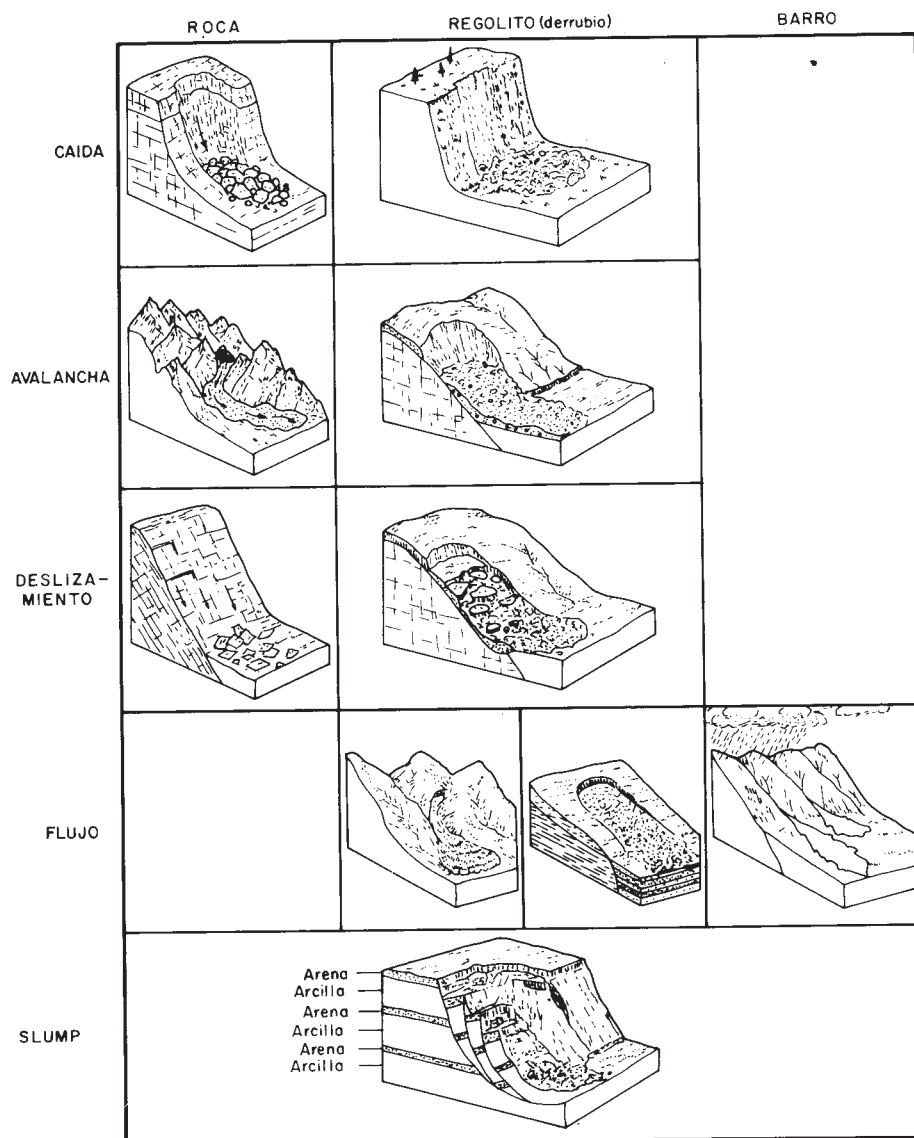
El término creep hace mención a un movimiento muy lento producido por hielo-deshielo (creep estacional), por gravedad (creep continuo) o por fenómenos biológicos (creep fortuito).

4.2.5. Movimientos complejos

Muy a menudo los distintos tipos de movimientos gravitacionales tienen lugar asociados. Una asociación característica es la que se produce entre deslizamientos y flujos: por lo general, el movimiento se inicia en cabecera con un deslizamiento rotacional; sin embargo, en la zona inferior el material adquiere un movimiento de tipo flujo. Tal es el caso del producido en Olivares (Granada) (DURAN, en IGME 1986).

Existen otros tipos de movimiento complejo, como los denominados creep con deslizamiento y creep con flujo, de características intermedias aunque siempre tratándose de procesos de baja velocidad.

FIGURA XII.12.—TIPOS DE PROCESOS GRAVITACIONALES
(Según B. J. SKINNER Y S. C. PORTER, 1987)



ANGULOS DE REPOSO, EN GRADOS, DE VARIOS TIPOS DE MATERIALES EN PENDIENTE
(Modificado de MARSH, 1991)

Arena bien drenada, sin cubierta vegetal	33°
Tierra franca bien drenada, sin cubierta vegetal	35°-45°
Arena o tierra franca, con cubierta forestal	35°-50°
Arcilla compactada bien drenada	45°-65°
Arcilla suelta saturada	15°-25°
Pedraplenes (Cantos, guijarros, gleras)	35°-45°
Loess, bien drenados	50°-90°
Roca consolidada	65°-90°

4.3. RECONOCIMIENTO DE LA SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS EN MASA

El reconocimiento de las zonas potencialmente inestables es tarea fundamental que debe incluirse en las primeras fases de la planificación de usos del suelo.

Las técnicas para evaluar la inestabilidad del terreno incluyen, al menos, una de las siguientes (MARSH, 1978):

- Estudio histórico y localización de pasados movimientos en masa en la ladera.
- Reconocimiento y estudio de las condiciones que motivan tales movimientos en masa en cada lugar determinado.
- Reconocimiento y estudio del efecto destabilizador que determinados desarrollos previstos pueden tener.

En lo que se refiere a los antecedentes históricos, pueden ser detectados a base de trabajo de campo y, sobre todo, en función de la fotografía aérea. En zonas áridas su localización es más sencilla, mientras que en zonas con vegetación puede ser necesario determinar discontinuidades en la cubierta vegetal, bosquetes de árboles jóvenes, etc.

Otras guías para el reconocimiento de antiguos movimientos son la presencia de depósitos ondulados o arriñonados, taludes y conos de derrumbios, etc.

La comparación con las formaciones geológicas adyacentes puede indicar un posible movi-

miento o deformación de los materiales originales. Asimismo conviene revisar las inclinaciones de postes telefónicos o eléctricos, alineación de vallas, etc.

En definitiva, habrá que considerar tres factores:

- Condiciones geológicas.
- Pendiente.
- Actuaciones humanas.

Al reconocer las condiciones que motivan los movimientos en masa, quizás el factor más importante sea la topografía, incluyendo grado de pendiente (dejando claro que por sí sólo no es un criterio suficiente), existencia de valles encajonados y cañones, comparación con estudios de erosionabilidad, etc.

Asimismo son importantes el tipo y la estructura de las rocas, ya que indican la mayor o menor estabilidad, el grado de cementación, la fuerza de cohesión, la estratificación...

Otros factores geológicos como vulcanismo y sismicidad también deben tenerse en cuenta, al igual que ciertas condiciones hidrológicas como escurrimientos internos, presencia de zonas húmedas, escorrentías superficiales y forma de la red de drenaje.

De cara a la información necesaria para el estudio de la susceptibilidad a los movimientos en masa conviene recopilar la siguiente cartografía:

- Fotografías aéreas.
- Mapas topográficos.
- Mapas geológicos.
- Mapas litológicos.
- Mapas de sismicidad.
- Mapas de hidrología superficial y subterránea.
- Mapas de vegetación.
- Mapas geotécnicos.

En general, puede decirse que, de cara a la interpretación con fotografía aérea, las características más destacadas que pueden indicar inestabilidad son:

- Líneas aristadas, escarpes en la superficie del suelo.
- Taludes o conos al pie de afloramientos rocosos escarpados.
- Depresiones pobremente drenadas al pie de laderas o crestas.
- Aparición de tonos claros, indicativos de fisuras y escarpes en las coronaciones de laderas o afloramientos rocosos.
- Acumulación de derrubios en valles y cuencas de drenaje.
- Cambios de tono en las zonas superiores de afloramientos rocosos escarpados o terraplenes, que pueden reflejar diferentes contenidos en la humedad del subsuelo.

La última etapa es la evolución del impacto que ciertas actuaciones producen sobre las condiciones de inestabilidad del territorio. Para ello habría que considerar los dos puntos anteriores y llegar a una interpretación cualitativa o cuantitativa de la información obtenida, que se considerará con mayor detalle en apartados posteriores del presente trabajo.

4.4. CARTOGRAFIA

La cartografía de la susceptibilidad a los movimientos en masa debe realizarse, en general, en asociación con factores tales como estratigrafía, grado de pendiente, socavaciones y desmontes por cursos fluviales, etc.

Los mapas finales pueden codificarse a partir de esquemas de clasificación, como, por ejemplo, el siguiente de TUBBS (1975):

- Clase 4: Zonas con estratos de arena sobre arcillas.
- Clase 3: Zonas con pendiente mayor del 15 por 100, con capas subyacentes de arcillas o limos.
- Clase 2: Zonas con pendiente mayor del 15 por 100, con capas subyacentes de arenas o gravas.
- Clase 1: Zonas con pendiente menor del 15 por 100, excepto las de contacto de arenas sobre arcillas.

(El límite del 15 por 100 se eligió, en este caso,

en base a la consideración de la resistencia al corte y los mecanismos de fractura de los suelos limosos y arcillosos).

4.4.1. Factores a considerar

Los factores a considerar a la hora de analizar la susceptibilidad de un terreno a la inestabilidad son muy variados. En MARSH (1978) se encuentra una relación muy completa (ver Cuadro XII.18).

4.4.2. Metodologías

Las posibilidades de utilización de varios o todos los factores citados son muy variadas y dependen, en cada caso, de la información disponible y de las características de la zona a estudiar. Se mencionan a continuación distintas metodologías de cartografía y se describen las dos que presentan mayores posibilidades, así como la desarrollada en España por el I.T.G.E.

- Una primera posibilidad consiste en la superposición de un mapa de clases de pendiente sobre otro geológico, o sobre cualquier otro que tenga relación con la estabilidad de los materiales constituyentes de las laderas.

Los mapas resultantes de esta superposición pueden clasificarse en función de tipos similares a los definidos por TUBBS (1975), o siguiendo cualquier clasificación que describa las características de cada grupo.

- Otro tipo de cartografía, más ambiciosa, muestra siete clases de susceptibilidad a partir de combinaciones de pendiente y tipo de roca (BRABB y cols., 1972)
- Los mapas obtenidos mediante tratamiento de datos son una aproximación estadística. En este tipo de cartografía, la influencia de cada factor en la inestabilidad actual o potencial, se ha calculado utilizando una función bivariante (JONES 1961), o análisis discriminante y de regresión multivariante (CARRARA 1983).

El resultado de la aplicación de estas metodologías son «mapas de susceptibilidad», que nos aportan información acerca de la extensión que puede alcanzar el fenómeno.

CUADRO XII.18.—FACTORES A CONSIDERAR EN LA SUSCEPTIBILIDAD DE UN TERRENO A LA INESTABILIDAD

Susceptibilidad a la inestabilidad		Baja		Alta	
Relieve	Encajonamiento del valle. Tipo de pendiente. Afloramientos rocosos. Diferencia entre la altitud máxima y mínima de la ladera. Forma de la ladera.	Pequeño. Suave. Ausentes.	Moderado. Moderada. —	Grande. Abrupta. —	Muy grande. Muy abrupta. Presentes.
		Pequeña. En estribo o contrafuerte.	Moderada. Recta o simple.	Grande. Suavemente convexa o abovedada.	Muy grande. Muy grande. fuertemente convexa o abovedada.
Drenaje	Densidad de drenaje. Gradiente altitudinal del río. Socavación o desmonte de la ladera. Estancamiento de agua.	Baja. Débil. Nula. Ausente.	Moderada. Moderado. Moderada. Nivel básico normal en la zona.	Alta. Fuerte. Severa. Severa. Drenaje lento.	Muy alta. Muy fuerte. Muy severa. Muy severa. Drenaje rápido.
	Cortaduras o desmontes recientes.	Ausentes.	Pequeños.	Moderados.	Grandes.
Suelos	Forma. Angulo de reposo del material. Profundidad.	Fondo del valle. Bajo. Pequeña.	Pendientes suaves. Moderado. Moderado.	Pendientes moderadas. Fuerte. Grande.	Pendientes fuertes. Muy fuerte. Muy grande.
Terremotos	Temblores apreciados.	Nunca.	Rara vez.	Algunos.	Muchos.
Historia de las pendientes . .	Deslizamientos previos. Depósitos residuales.	Ausentes. Ausentes.	Raros. Raros.	Algunos. Algunos.	Muchos. Muchos.
Aspectos artificiales	Excavaciones (profundidad). Excavaciones (posición). Embalses. Desviación del drenaje en la ladera. Variaciones del nivel de agua en los embalses. Carga en la parte alta de la ladera.	Nula. Fondo del valle. Ausentes. Ausente. Nulas. Nula.	Pequeña. Ladera baja. Pequeños. Pequeñas. Escasa.	Moderada. Ladera alta. Moderadamente profundos. Moderadas. Moderada.	Grande. Cresta o cumbre. Muy profundos. Presente. Grandes. Fuerte.
Drenaje	Presión del agua en los poros.	Baja.	Moderada.	Alta.	Muy alta.
Lecho rocoso	Afloramientos rocosos. Densidad de zonas de unión en la roca (junturas). Dirección de las zonas de unión en la roca respecto a la ladera. Grado de buzamiento o inclinación. Alternancia de rocas duras sobre rocas blandas. Grado de alteración. Esfuerzo de compresión. Coherencia del sustrato inferior.	Ausentes. Baja. Desviada. Horizontal. Ausente. Nulo. Muy bajo. Muy baja.	Parciales. Moderada. — Pequeño. — Pequeño. Bajo. Baja.	— Alta. Normal. Moderado. — Moderado. Moderado. Moderada.	Totales. Muy alta. Paralela. Fuerte. Presente. Fuerte. Alto. Alta.
Suelo	Esfuerzo cortante Índice de liquidez (ver Cap. VI Suelos)	Muy bajo. Bajo.	Bajo. Moderado.	Moderado. Alto.	Alto. Muy alto.
Efectos de la evolución del lugar	Profundidad de la alteración.	Nula.	Débil.	Moderada.	Elevada.

— Otra posibilidad es la localización e interpretación de los movimientos en masa de años anteriores, reconocidos a través de fotografía aérea (BRABB Y PAMPEJAN 1972), llamados «mapas de vulnerabilidad».

Asimismo, sobre estos mapas de localización de anteriores movimientos, pueden reflejarse isopletras de densidad de los mismos que expresan, en cierta manera, el peligro de que se produzcan

nuevos movimientos en masa a partir de la distribución de las frecuencias de ocurrencia (CAMPBELL 1973). Estos mapas son los denominados «de peligrosidad».

4.4.2.1. *Modelo cartográfico del U. S. Geological Survey (BRABB y col., 1972)*

El primero de los modelos que se describen con más detalle es el estudio del U. S. Geological

Survey sobre las zonas de inestabilidad del área de la bahía de San Francisco.

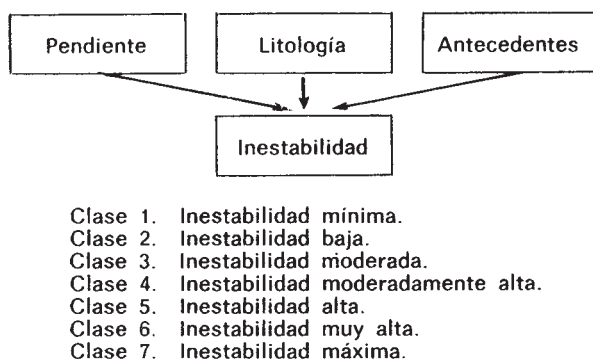
El análisis se basa inicialmente en el conocimiento de la topografía del terreno, incluyendo la red de drenaje y las principales zonas de vegetación. De este primer inventario se determinan los grados de pendiente y los tipos de suelo.

Si la estabilidad de un terreno es controlada principalmente por su inclinación, se puede obtener una indicación preliminar de la susceptibilidad al movimiento a partir de los perfiles del terreno. Sin embargo, cuando intervienen otros factores, especialmente litología y características del lecho rocoso, habrá que tener en cuenta las inclinaciones de los estratos, fallas, etc.

A partir de la pendiente y el material constituyente puede realizarse una cartografía aproximada de las áreas susceptibles a movimientos en masa; sin embargo, para realzar la información obtenida se aconseja la consideración de los antecedentes históricos, tanto cualitativos como cuantitativos.

El análisis puede completarse con datos adicionales sobre factores tales como la proximidad a zonas sísmicas, cubierta vegetal, grietas y excavaciones y, en general, cualquiera de los factores considerados en el Cuadro XII.18.

El método a emplear para sintetizar todos estos factores está abierto a la investigación: en el caso de la bahía de San Francisco, se realizó una superposición de los mapas de pendiente, litología y antecedentes históricos, deduciéndose distintas combinaciones de susceptibilidad o clases de inestabilidad.



A modo de ejemplo se presenta un trayecto A - A' de un mapa topográfico y todo el proceso a seguir en el método (Figura XII.13).

Como puede observarse, las zonas de mayor pendiente no tienen por qué ser las más susceptibles *per se*, ya que éstas necesitan además la coincidencia de factores litológicos y de anteriores movimientos.

A partir de los mapas de litología y pendiente y de los antecedentes históricos, se determina la cartografía de inestabilidad.

4.4.2.2. Clasificación de formas elementales (BELCHER y col., 1975)

Estos autores elaboraron una clave en la que la susceptibilidad a los movimientos en masa de formas elementales se divide en tres clases:

- a) Terreno *susceptible* a los movimientos en masa.
- b) Terreno susceptible bajo ciertas modificaciones.
- c) Terreno no susceptible a los movimientos en masa, excepto en condiciones extremas.

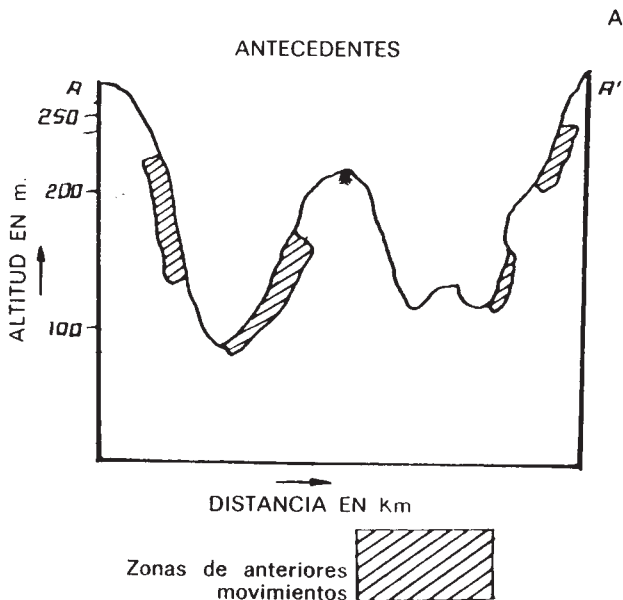
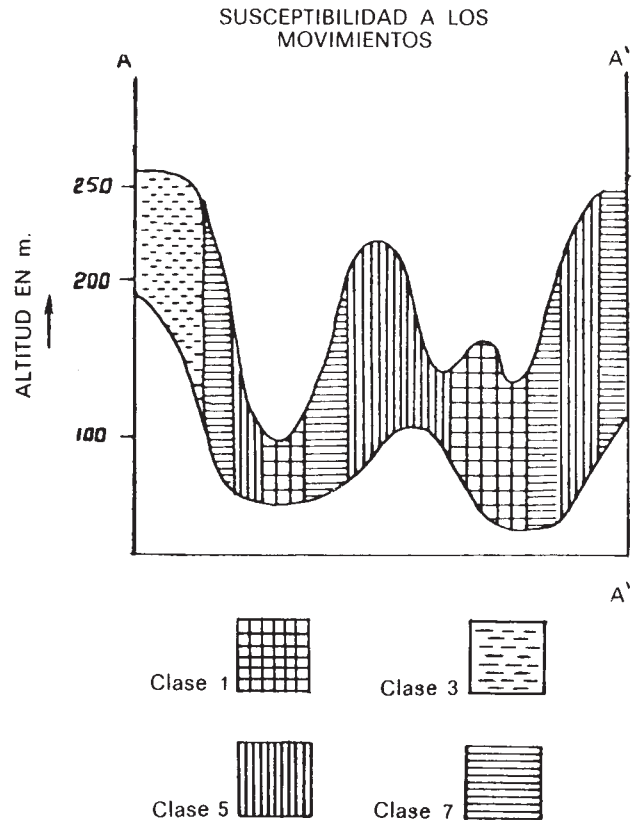
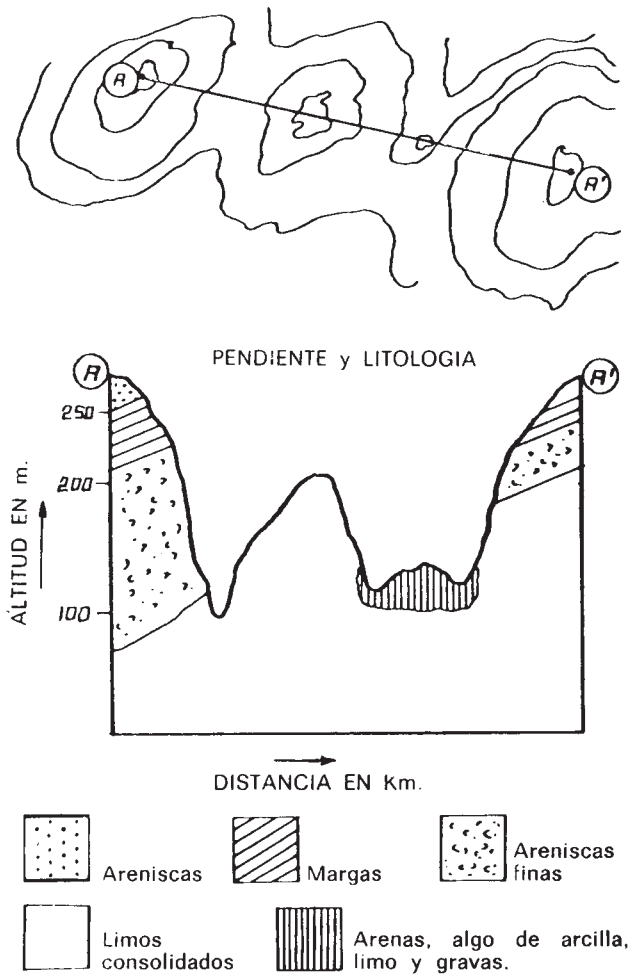
4.4.2.3. Mapa de riesgos ligados a movimientos del terreno

Los factores considerados en la elaboración de esta cartografía (Mapa de Riesgos Naturales E.1:25.000, hojas correspondientes a las zonas de Jaca y Granada, ITGE 1980), han sido elegidos por su incidencia en las modificaciones de las formas superficiales de la tierra. Se han valorado especialmente aquellos procesos que tienen lugar con carácter más o menos rápido y son, por tanto, capaces de producir daños materiales o personales.

Los factores tenidos en consideración son: litología, tectónica, morfología, hidrología superficial, climatología, vulcanología, sismología, vegetación, erosión, comportamiento mecánico de los materiales y actividad humana.

Su estudio y cartografía lleva a dividir el territorio en cuatro zonas a las que se les asigna un factor de riesgo diferente, representadas con distintos colores:

FIGURA XII.13.



Estas zonas, a su vez, son divididas en subzonas teniendo en cuenta variaciones en la litología.

4.4.3. Comentarios

A pesar del interés de la cartografía de inestabilidad potencial, existen limitaciones en su utilización. La primera viene impuesta por la escala del mapa. En este aspecto, es muy importante la correcta delineación de los límites entre clases. Cuanto menor sea la escala, el problema se acrecienta: una desviación de 1 mm en el mapa puede traducirse en centenares de metros en la realidad, con problemas muy distintos entre los puntos respectivos.

Lo normal son mapas de escala 1: 20.000 a 1: 25.000; como mucho puede pensarse en escala 1: 50.000, aunque lo recomendable, al igual que al tratar de erosionabilidad e inundabilidad, son grandes escalas: 1: 5.000 ó 1: 10.000.

- Amarillo (E). Zona Estable.
- Verde (IP). Zona de Inestabilidad Potencial.
- Azul (I). Zona Inestable.
- Rosa (AI). Zona Altamente Inestable.

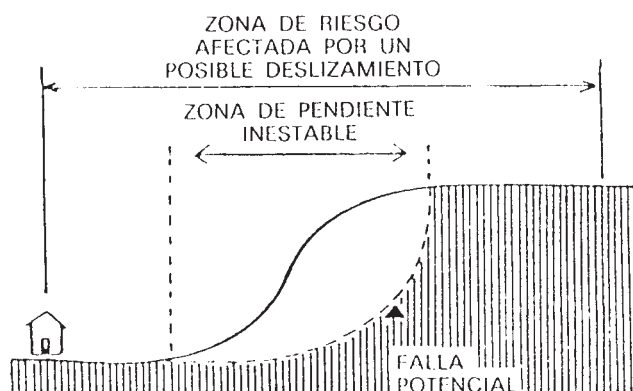
Tipo de terreno	Morfología o material originario	Susceptibilidad al deslizamiento
I. Terreno llano:		
A. No elevado.	Llanuras de inundación, etc.	c
B. Elevado. Tonos uniformes en la fotografía aérea. Irregularidades superficiales, escarpes.	Terrazas, lechos de lagos. Mesetas basálticas.	b a
II. Terreno montañoso:		
A. Drenaje superficial poco definido.	Calizas, etc.	c
B. Drenaje superficial bien definido.		
B1. Cadenas montañosas paralelas.		
B11. Drenaje paralelo, tonos oscuros en la fotografía aérea.	Colinas basálticas.	a
B12. Drenaje en forma de mallas, topografía de valles y cordilleras.	Sedimentos inclinados.	a
B13. Drenaje en forma de pluma, cárcavas de paredes verticales.	Loess.	b
B2. Cadenas montañosas ramificadas.		
B21. Drenaje pinnado, cárcavas de paredes verticales.	Loess.	b
B22. Drenaje dendrítico.		
B221. Pendiente escalonada.	Sedimentos horizontales.	b
B222. Pendiente no escalonada.		
B2221. Cadenas montañosas moderada o fuertemente disectadas. Pendiente uniforme.	Pizarras arcillosas.	a
B2222. Colinas suaves asociadas a rasgos costeros.	Llanuras costeras disectadas.	a
B2223. Cadenas tortuosas con colinas cónicas, vegetación escasa.	Serpentina.	a
B3. Cadenas montañosas sin los caracteres anteriores, es decir, con una distribución irregular o bien colinas.		
B31. Drenaje dendrítico.		
B311. Colinas redondeadas, suaves, meandros.	Pizarras arcillosas.	a
B312. Topografía abombada (áreas glaciares).	Morrenas.	b
B32. Drenaje irregular.		
B321. Colinas irregularmente repartidas, apoyadas las unas a las otras, asociadas a lagos y zonas húmedas.	Morrenas.	b

Otra limitación es que estos mapas muestran más la estabilidad de las pendientes que el riesgo derivado de movimientos en masa y, por tanto, las zonas afectadas por éstos. Una posibilidad para la extrapolación de un mapa de zonas expuestas al riesgo a partir de un mapa de ines-

tabilidad sería el estudio del tipo de terreno y distancia a que afectan fenómenos de este tipo ocurridos en años anteriores, bien a partir de fotografías aéreas o bien de inventarios de campo.

Esta información se aplicará sobre los mapas de inestabilidad de pendientes, en la forma de las Figuras XII.14 y XII.15 (DUNNE y LEOPOLD, 1978).

FIGURA XII.14.

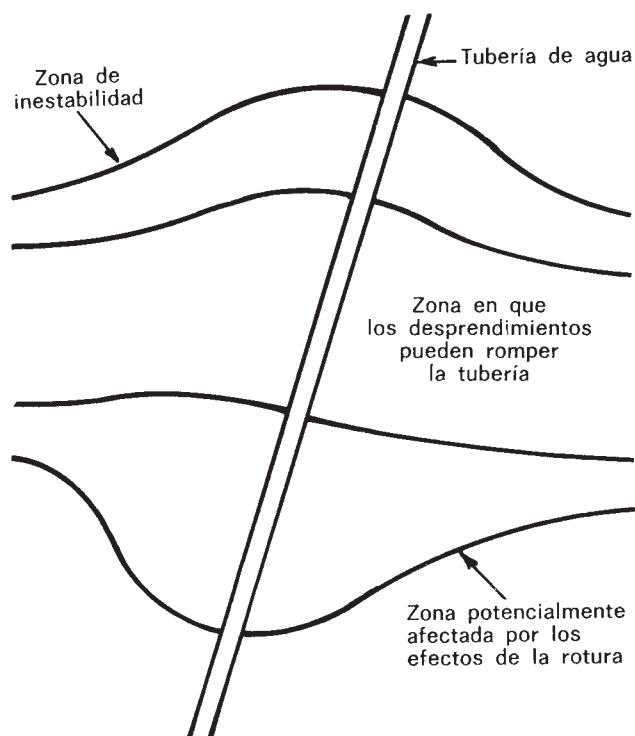


5. RIESGOS DERIVADOS DE LOS PROCESOS FLUVIALES

En los procesos fluviales el riesgo más notorio deriva de los cambios de caudal y, como consecuencia, de la extensión de las tierras de las riberas ocupadas por el agua.

Crecidas y estiajes son fenómenos normales

FIGURA XII.15.—LOCALIZACION PROBABLE DEL LIMITE DE LA ZONA DE INESTABILIDAD EN UN HORIZONTE DE 100 AÑOS



en cualquier río. Dependiendo de su régimen de alimentación, éstas serán diarias, estacionales, anuales, de otra periodicidad o excepcionales.

Precipitaciones copiosas, fusiones rápidas de nieve, o ambos factores conjuntados, son las causas naturales más frecuentes de las avenidas. De este modo, interesa conocer el funcionamiento de la cuenca vertiente, básicamente su régimen de alimentación, para así poder determinar las posibles causas de las avenidas.

Conocidas esas causas y teniendo en cuenta las características de la cuenca vertiente, es posible determinar los caudales esperados según el tipo de borrasca. La transformación de estos caudales en altura de agua sobre los cauces, y de esta en superficie potencialmente inundada, es un problema sencillo partiendo de la cartografía de los canales y el valle.

Allí donde la morfología del terreno es consecuencia del modelado fluvial (grandes valles o sistemas de aterrazamiento en artesas amplias, marismas, tablas, deltas, conos aluviales, etc.), no es difícil determinar o prever cuáles serán las zonas inundadas en función de la magnitud de la avenida. Los casos más generales definen un le-

cho menor (de estiaje estacional), un lecho mayor (de crecida estacional) y una llanura de inundación, ya sea ésta periódica o excepcional.

En los casos en que las formas del terreno tienen un origen debido a otros procesos que los fluviales, y estos no hacen sino retocar el paisaje (arroyos sobre fondos estructurales, zonas cársticas, torrentes, etc.), la determinación de la zona inundable es más difícil, ya que pueden generarse incluso nuevos cauces a partir de la avenida.

Todos estos parámetros, se establecen teniendo en cuenta una serie de previsiones, para las cuales son necesarios los datos referentes a los períodos de recurrencia de cada uno de los caudales estimados.

Conocidas las causas (a), los caudales esperados (b), la morfología (c) y los períodos de recurrencia (d), puede llegarse a establecer un análisis de riesgos según los usos del suelo impuestos sobre la zona.

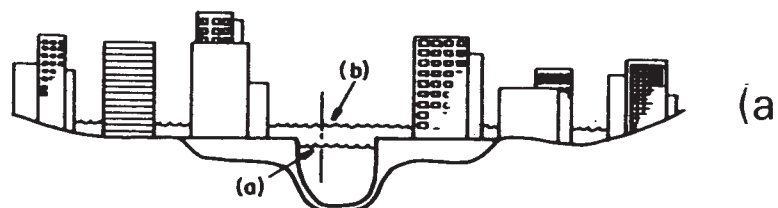
En suma: causas, caudales, frecuencia, morfología del valle y usos del suelo, son los datos básicos para la realización de los análisis de riesgo de inundación.

En general, una inundación se produce cuando el curso del río recibe una cantidad tal de agua, que supera su capacidad de almacenamiento; desborda entonces su cauce y se extiende por el valle, en mayor o menor medida, en función de la descarga de agua.

Para predecir el riesgo de ocurrencia de una inundación y el daño que se puede producir, se deben estudiar, según DUNNE y LEOPOLD (1978) uno o varios de los siguientes factores.

- Volumen de escorrentía superficial; necesario para proyectar obras de embalses para control de inundaciones, abastecimiento de agua y sistemas de riego.
- Descargas máximas: necesarias para el diseño de puentes, aliviaderos de presas y otros servicios de embalses.
- Altura de la inundación; dato fundamental para conocer las dimensiones de las obras y las posibilidades de supervivencia de las cosechas.

FIGURA XII.16
(COATES, 1981)

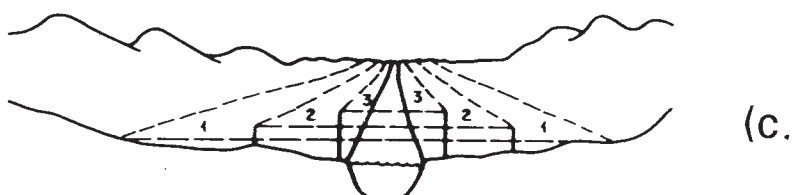


Altura alcanzada por las aguas para un caudal Q antes (a) y después (b) de urbanizar



Relación entre períodos de recurrencia y extensión de terreno ocupado por las aguas

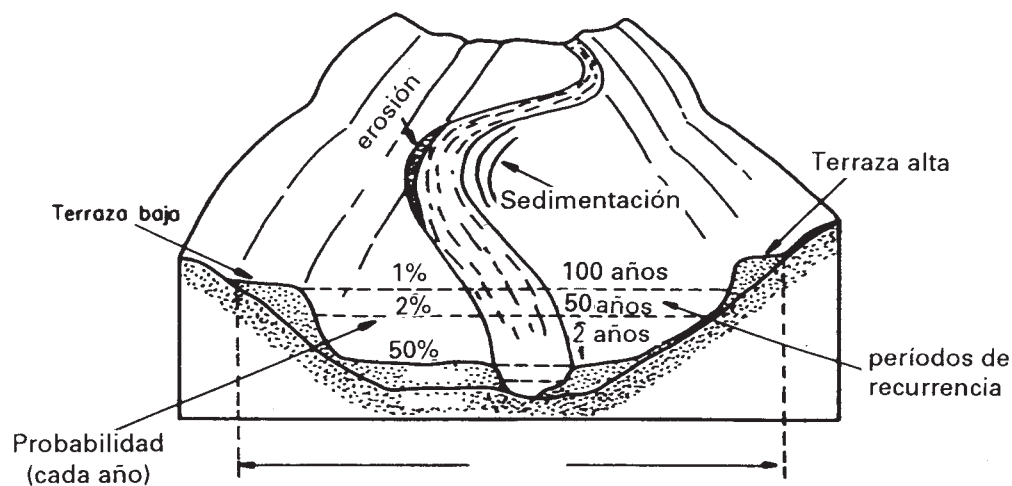
- (a)-(a) Cada 25 años
- (b)-(b) Cada 50 años
- (c)-(c) Cada 100 años
- (d)-(d) Cada 500 años



Relación altura-período de recurrencia en los diferentes dominios de la ribera

- (1)-(1) Ocupación cada 100 años
- (2)-(2) y (3)-(3) Alturas de aguas equivalentes para esta misma avenida de 1 y 2 m p. ejemplo

FIGURA XII.17.—CONSIDERACIONES BASICAS EN LA ORDENACION DE UNA LLANURA ALUVIAL
(COATES, 1981)

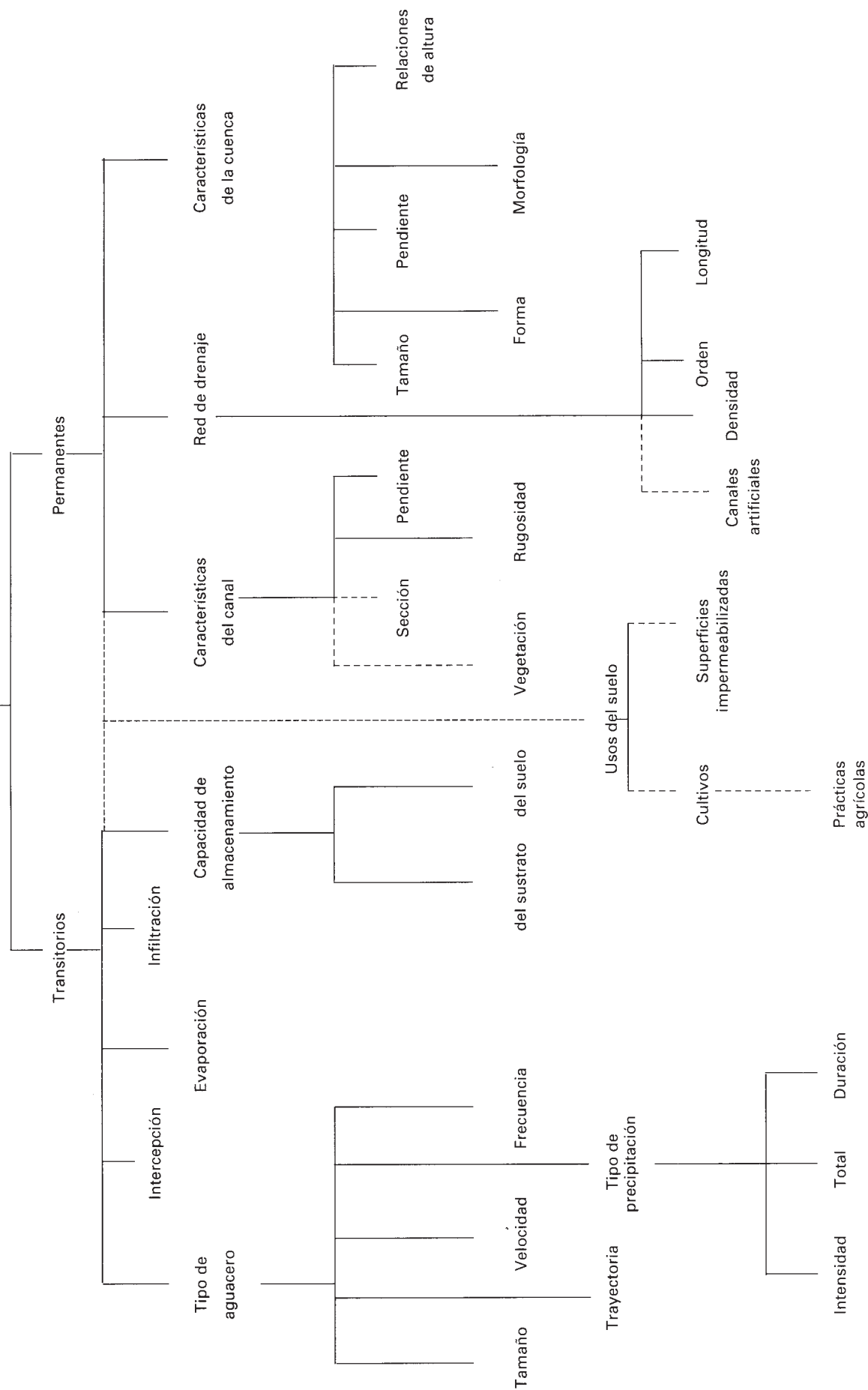


Recurrencia y ocurrencia para la ocupación por el agua en una llanura fluvial.

FIGURA XII.18.

(Según RODA, en COSTA y BAKER, 1981)

FACTORES QUE CONTROLAN EL FLUJO HIDROLOGICO



- Distribución en el tiempo del hidrograma total de la crecida, para así determinar la duración de la inundación.
- Area inundada.
- Velocidad del agua, que afecta al daño ocasionable tanto a las estructuras de control como al suelo.

5.1. ESCORRENTIA SUPERFICIAL

En lo que se refiere al primer punto, los cálculos se realizan basándose en su correlación con la precipitación. En esta idea, el U.S. Soil Conservation Service, ha desarrollado un método para predecir la escorrentía superficial, en función de la clasificación cualitativa siguiente:

A. Escaso potencial de escorrentía superficial	Suelos con alta capacidad de infiltración, incluso con fuerte humedad. Fundamentalmente, arenas y gravas; profundas y bien drenadas.
B.	Suelos con grado de infiltración moderados cuando existe humedad. Valores medios de profundidad, drenaje y textura.
C.	Suelos con grados de infiltración bajos cuando existe humedad. Suele existir una capa impermeable que impide el drenaje vertical o la textura es fina.
D. Elevado potencial de escorrentía superficial . .	Suelos con capacidad de infiltración muy baja. Fundamentalmente, arcillas. Son suelos con nivel freático elevado y una capa impermeable de arcilla cerca de la superficie, o bien suelos delgados cerca de materiales permeables.

Junto con ésta, se han elaborado unos gráficos que determinan cuantitativamente la escorrentía superficial en función de la precipitación y que pueden utilizarse según la cubierta vegetal y las características del suelo.

5.2. DESCARGA MAXIMA ANUAL Y AREAS INUNDADAS

El volumen máximo anual y su distribución en frecuencias, es otro factor importante a conside-

rar en la determinación de zonas inundables. Si el intervalo de recurrencia de una determinada descarga es de 50, no quiere decir que la inundación se producirá una vez cada cincuenta años, sino que existe un 2 por 100 de probabilidad de que la descarga se produzca en cualquier año.

$$p = \frac{1}{t_r} = \frac{1}{50} = 0,02$$

Para el cálculo del intervalo de recurrencia de una inundación y, por tanto, de una determinada descarga, basta representar el gráfico de descargas máximas anuales y observar en cuántos años la descarga supera un determinado valor crítico de inundación; el valor t_r será:

$$t_r = \frac{n + 1}{m}$$

n = Número de años muestreados.

m = Número de años en que se iguala o supera la descarga crítica.

Conociendo los datos históricos de las zonas inundadas, con las descargas críticas y las probabilidades de inundación, se pueden cartografiar, en cada caso, las superficies potencialmente inundables con un nivel de probabilidad p correspondiente al intervalo de recurrencia t_r .

Una vez definidas las zonas inundables con determinados niveles de probabilidad, sobre ellas se determinan, con base en datos obtenidos de anteriores inundaciones, las alturas máximas y medias, la distribución en el tiempo y la velocidad, para así cuantificar las superficies potenciales de inundación previamente calculadas.

5.3. DETERMINACION DE ZONAS INUNDABLES CUANDO NO EXISTEN DATOS CUANTITATIVOS

En caso de no existir datos cuantitativos, la identificación de las zonas inundables tendría que realizarse en función de determinadas características físicas.

Todas las zonas potencialmente inundables han sido formadas por procesos similares y, por tanto, poseen características que pueden servir para definirlos:

CUADRO XII.19.—COEFICIENTES DE ESCORRENTIA EN AREAS RURALES
(MARSH, 1991)

Topografía y vegetación	Suelos francoarenosos	Suelos francolimosos y francoarcillosos	Suelos arcillosos impermeables
ARENAS BOSCOSAS			
Llanas (0-5% de pendiente)	0,10	0,30	0,40
Onduladas (5-10%)	0,25	0,35	0,50
Quebradas (10-30 %)	0,30	0,50	0,60
ARENAS DE PASTOS			
Llanas	0,10	0,30	0,40
Onduladas	0,16	0,36	0,55
Quebradas	0,22	0,42	0,60
ARENAS CULTIVADAS			
Llanas	0,30	0,50	0,60
Onduladas	0,40	0,60	0,70
Quebradas	0,52	0,72	0,82

Nota: El coeficiente de escorrentía, que varía entre 0 y 1, expresa la proporción del agua caída que escurre por la superficie. Su complemento a 1 representa la infiltración. Por ejemplo, un coeficiente de 0,6 significa que el 40 % de la precipitación se infiltra en el terreno.

CUADRO XII.20.—COEFICIENTES DE ESCORRENTIA EN AREAS URBANAS
(MARSH, 1991)

Areas comerciales	0,70-0,95
AREAS RESIDENCIALES	
Viviendas unifamiliares (5-7 casas/acre)	0,35-0,50
Zonas densas, multifamiliares	0,60-0,75
Zonas suburbanas poco densas	0,20-0,40
AREAS INDUSTRIALES	
Ligeras	0,50-0,80
Pesadas	0,60-0,90
Parque ferroviario	0,20-0,80
PARQUES, CEMENTERIOS	0,10-0,25
AREAS DEPORTIVAS, CAMPOS DE JUEGO	0,20-0,40

- Morfología suave, normalmente limitadas por laderas de valles o terrazas.
- Nivel freático relativamente elevado y, en consecuencia, drenaje interno deficiente.
- Vegetación con especies adaptadas a condiciones húmedas o encharcadas de suelo.
- Inundaciones ocasionales por el agua de los cursos fluviales.

Para su determinación existen distintos métodos, citados por WOLMAN (1971) y basados en:

- Fisiografía: Identificación y cartografía de

zonas llanas y bajas situadas alrededor de los cursos de agua.

- Suelos: Identificación de materiales depositados por transporte en cursos de agua o por avenidas.
- Vegetación: Localización de grupos de plantas asociadas con altos niveles de humedad y con condiciones de anegación.
- Datos históricos de avenidas o inundaciones: Determinando la extensión de las zonas inundadas, bien por medio de datos cuantitativos o, en su defecto, mediante expertos de la zona.

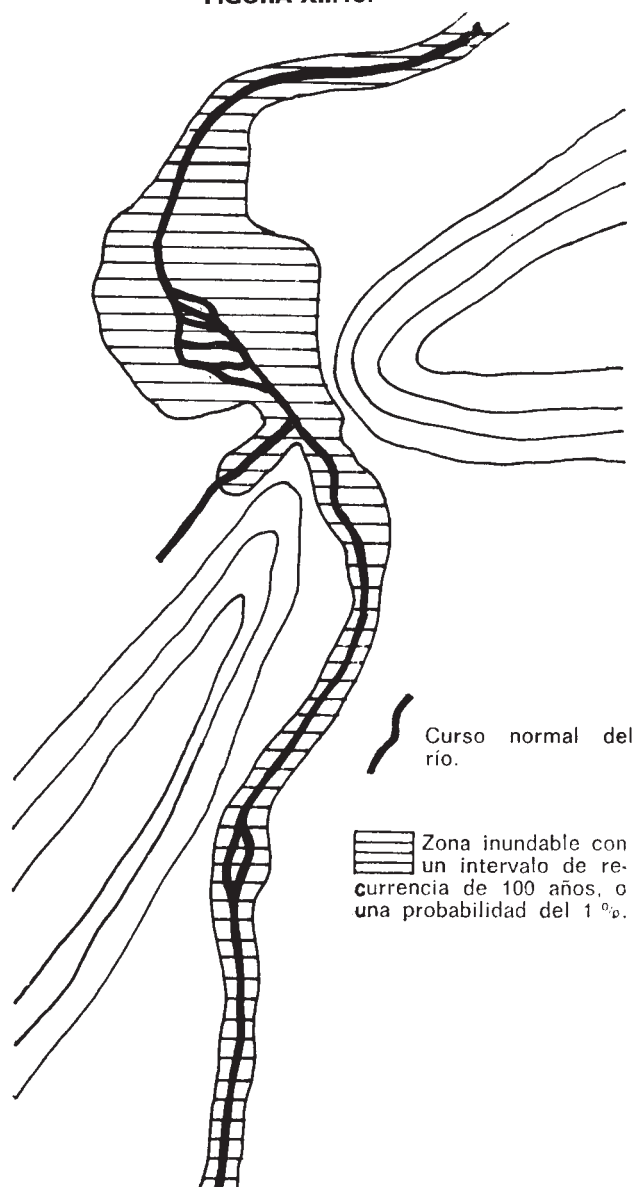
5.3.1. Fisiografía

La zona más baja de un valle es la llamada llanura de inundación. Esta primera zona se inunda, como media en multitud de estudios, una vez cada uno o dos años.

Su identificación se realiza a través de mapas topográficos, de acuerdo con varias características específicas:

- Sus límites exteriores suelen marcarse por unas pendientes relativamente fuertes en las laderas del valle.
- Suelen encontrarse trazas de la antigua posición del río en forma de meandros cerrados, pequeños lagos, etc.
- Existencia de terrazas.

FIGURA XII.19.



Una vez que la llanura de inundación ha sido identificada, se puede dar una indicación cualitativa de la inundabilidad potencial, asignando a la zona más baja una «mayor susceptibilidad» y a la más elevada, la menor susceptibilidad, tomando las terrazas un valor intermedio.

El problema de esta clasificación es la falta de datos cuantitativos que determinen la probabilidad de inundación y los volúmenes y alturas de avenida.

5.3.2. Suelos

La cartografía de zonas inundables deducidas del estudio del suelo, es aún más complicada ya que suele necesitar correlaciones que son difíciles de determinar. Por este motivo, solamente se

utilizan de cara a reforzar las estimaciones basadas en factores topográficos.

En general, un suelo aluvial indica que en un pasado más o menos lejano se han producido avenidas. Esta información, superpuesta a otra, puede ayudar a la clasificación, pero por sí sola prácticamente no resulta utilizable.

5.3.3. Vegetación

La comunidad vegetal de una zona inundable tiene unas características específicas que pueden ayudar a su localización. Por ejemplo, son plantas capaces de resistir la erosión y el depósito en la zona radical, así como los suelos saturados. Deben ser flexibles para aguantar el desarraigo ocasionado por las avenidas, o bien capaces de seguir viviendo tras ser arrancadas, a base de emitir raíces adventicias. Las especies vegetales que viven bajo estas condiciones son, por tanto, un fuerte indicador de las zonas inundables. De la misma forma, los daños producidos a la vegetación pueden servir para definir la extensión de las inundaciones y obtener datos, en cierto modo, cuantitativos.

5.3.4. Datos históricos

El conocimiento de anteriores inundaciones es una información, si no fundamental, sí muy importante a la hora de determinar valores cuantitativos en zonas potencialmente inundables.

La altura de la avenida, extensión, velocidad de la corriente, etc., de una inundación reciente, puede calcularse por sensores remotos, fotografía aérea, interpolación de estaciones de medida, etc. Estos datos, superpuestos a los anteriores, dan clasificaciones bastante adecuadas para la localización de zonas de inundabilidad potencial.

5.3.5. Zonas de recogida de agua

Al igual que existen zonas donde la inundación se produce por la salida del agua de los cursos, también puede ocasionarse por una excesiva recogida de agua de las laderas y pequeños arroyos.

Este tipo de inundación suele ocurrir en terrenos llanos con poca capacidad de infiltración o en

CUADRO XII.21.—ELEMENTOS MAS COMUNES A CONSIDERAR EN UN ANALISIS INTERDISCIPLINAR DE UNA ZONA POTENCIALMENTE AFECTADA POR INUNDACION
(Según Costas y Baker, 1981)

Disciplina	Datos cartografiables
Geología	— Foto aérea, mapas de la llanura de inundación, incluyendo los datos siguientes: 1) Canales activos y barras. 2) Barras semilunares de meandros (point bars). 4) Zonas pantanosas de meandros abandonados (oxbows y lakes oxbows). 5) Fangales. 6) Diques naturales (levees). 8) Arenas de desbordamiento (splays). 10) Canales abandonados. 11) Vados y barras asociadas. 12) Terrazas. — Datos de campo sobre avenidas recientes: 1) Formas relictas de avenidas recientes. 2) Aguas retenidas. 3) Marcas de los niveles alcanzados por el agua.
Suelos	— Mapas de detalle de los suelos.
Botánica y Ecología	— Fotointerpretación de estratos arbóreos y arbustivos, crecimiento, densidad, etc. — Estudios de campo sobre daños en la vegetación.
Ingeniería: datos históricos de avenidas	— Fotografías de avenidas previas. — Niveles de aguas altas reconocidos mediante signos diversos (vegetación, suelos, contracciones, diques, etc.).
Hidrología	— Estudios de riesgos de desbordamiento. — Estudios de hidrología regional.

terrenos accidentados con la red de drenaje muy cerrada. Los datos hidrográficos, como zonas pantanosas, cursos de agua, etc., juntamente con la fotografía aérea, dan una información adecuada para su cartografía, caracterizada por la presencia, en épocas húmedas, de zonas pantanosas, corrientes intermitentes, tributarios de primer orden, mientras que todas estas formas de agua desaparecen en épocas secas. De la fotografía aérea se obtiene esta doble información que permite comparar y localizar las zonas inundables.

- Pueden esperarse inundaciones durante ciertos meses del año, o en cualquier período de condiciones meteorológicas poco usuales, las cuales son suficientes para destruir los cultivos o impedir el uso del suelo en un determinado porcentaje de años.
- Las crecidas son raras, pero probables durante un porcentaje muy pequeño de años.

5.3.6. **Clasificación cualitativa de zonas inundables** (U. S. Geological Survey)

El Soil Survey Manual del U. S. G. S. (Soil Survey Staff, 1951) da una clasificación que describe, de forma cualitativa, las zonas inundables, localizadas sin datos cuantitativos, en función de la frecuencia y la regularidad de las inundaciones.

- Inundaciones frecuentes e irregulares que hacen incierto el uso del suelo para el cultivo agrícola.
- Inundaciones frecuentes que ocurren en forma regular durante ciertos meses del año, de modo que el suelo puede utilizarse para cultivos en el tiempo restante.

6. **RIESGOS DERIVADOS DE LOS PROCESOS GLACIARES, NIVALES Y PERIGLACIARES**

Este tipo de procesos quedan restringidos, en nuestro entorno, a ciertas zonas de alta montaña y montaña media en períodos normales y a algunas llanuras de la Meseta en inviernos fríos o muy fríos, en lo que se refiere a los procesos nivales y periglaciares (los glaciares apenas si aparecen).

En general se trata de fenómenos controlados por la presencia de agua en su fase sólida, ya sea de forma permanente, ya temporal, es decir cambiando de fase sólido-líquido o viceversa.

6.1 PROCESOS GLACIARES

En el caso de procesos glaciares (agua en fase sólida permanente) las características geofísicas y geomorfológicas de estos agentes determinan en buena medida los resultados y los riesgos. Según se trate de glaciares fríos, templados, o intermedios, y polares, subpolares o de montaña, aparecen diferentes rasgos morfológicos y sedimentológicos, distintos comportamientos del hielo, más o menos aguas de fusión dentro y en el frente del glaciar, etc. Ello, aparte de los paisajes generados, condiciona la presencia de masas de hielo más estables o inestables, más o menos aguas internas, formando glaciocarst, y mayor o menor cantidad de aguas externas aptas para su posible uso.

Avalanchas de bloques de hielo y de mantos de nieve más o menos recientes e inestables, inundaciones por fusión rápida, rotura de represas naturales o fenómenos catastróficos unidos a otros procesos (avalanchas sobre embalses artificiales, fenómenos volcánicos que generan fusiones rápidas, tectónicos, etc.) y avance de los glaciares sobre zonas de uso humano, son los riesgos más notables asociados a estos procesos.

6.2 PROCESOS PERIGLACIARES Y NIVALES

En los procesos periglaciares y nivales, más frecuentes en nuestro entorno, se producen fenómenos de cambio de fase del agua. Ello condiciona frecuentes cambios en el volumen y el grado de humectación del suelo y la roca que provocan hinchamientos, roturas, deslizamientos, descamaciones, desagregación en granos o bloques, etc.

Avalanchas de nieve, roca o suelo, deslizamiento y caída de materiales, modificaciones en el volumen, porosidad, densidad, coherencia, etc, de los materiales son los riesgos asociados a estos procesos. Muchos de estos casos tienen especial incidencia en agronomía, arquitectura y obras públicas, debido al comportamiento diferencial de los suelos y a las consecuencias ambientales que conlleva una helada o una serie de ciclos hielo-deshielo.

En España las avalanchas son un fenómeno aún mal conocido (ver LOPEZ, 1987), pues su estudio se ha iniciado recientemente, quizás debido a la cada vez mayor afluencia de personas a la montaña durante el período invernal. En la actualidad se tienen en cuenta diferentes factores para su clasificación y la elaboración de mapas de riesgos.

FIGURA XII.20.—TRES TIPOS DE RIESGO GLACIAR: (A) AVANCE CON EXPANSION HACIA ZONAS ANTROPIZADAS; (B) AVANCE CON OPTURACION DE UN VALLE; (C) DESPRENDIMIENTO DE BLOQUES
(TUFNELL, 1984)

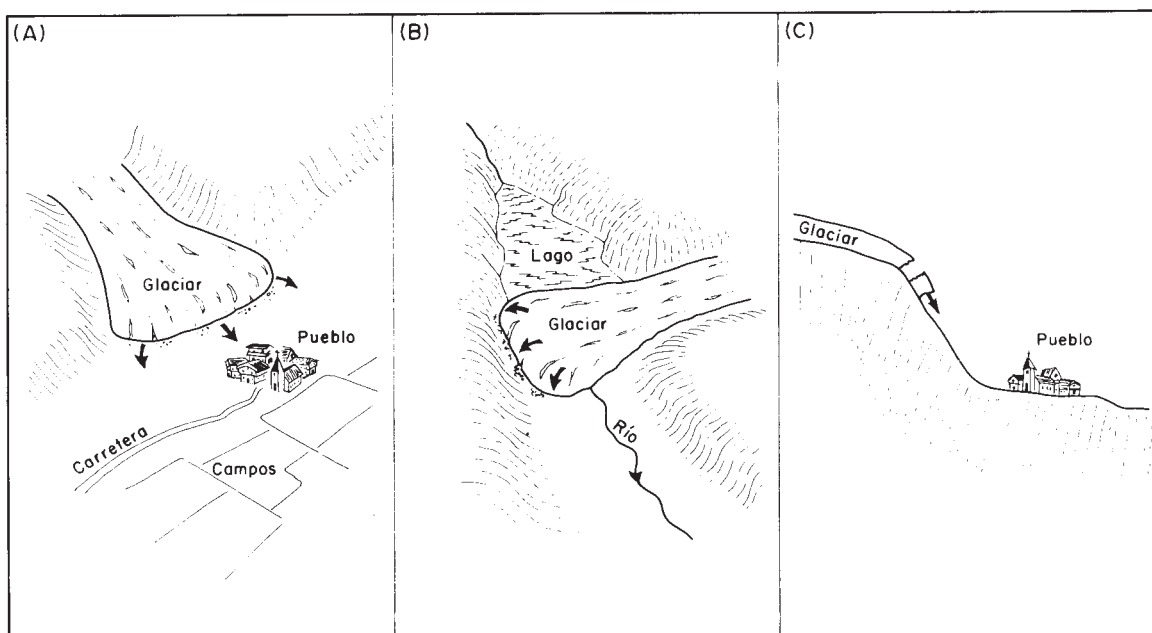
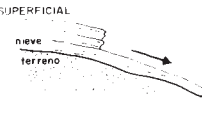
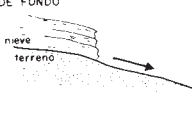
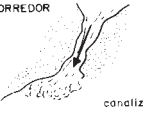


FIGURA XII.21.—CLASIFICACION DE LAS AVALANCHAS
(en LOPEZ, 1987)

CRITERIO	TIPO DE AVALANCHA		
FORMA DE LA ROTURA	DE PLACA  rotura longitudinal	COLADA  rotura puntual	
POSICION DE LA SUPERFICIE DE DESLIZAMIENTO	SUPERFICIAL  nieve terreno	DE FONDO  nieve terreno	
TRAZADO DE LA AVALANCHA	DE LADERA  no confinada	DE CORREDOR  canalizada	
TIPO DE MOVIMIENTO	DE POLVO  en el aire	DENSA  sobre el terreno	PULVURULENTO-DENSA  mixto
TIPO DE NIEVE	DE NIEVE SECA (POLVO) s/n. agua libre		DE NIEVE HUMEDA con agua libre

6.3. HELADAS

De mayor incidencia en nuestras latitudes, son los riesgos para la agricultura y obras públicas asociados a las heladas. Tampoco aquí se dispone de una metodología de análisis preventiva, al menos no más allá de lo que aportan los datos meteorológicos mensuales e incluso semanales, cuando no diarios.

A nivel internacional, hay algunos intentos de sistematizar la prevención de estos riesgos, mediante los cálculos de «susceptibilidades de helada». Se trata de establecer mapas de riesgo de helada, mediante la relación estadística del número de días (promedio), que se calcula la temperatura va a ser inferior a los 0°C en una región y asociarlo a un coeficiente de humedad (también promedio en la misma región). De esta forma se han realizado en algunos lugares mapas de susceptibilidad o riesgo de helada, elaborados por zonas y meses o días según los casos (VISHER, 1945).

CUADRO XII.22. —DATOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE UN MANTO NIVAL
(GRAY, *et al.*, 1981)

Factor	Condiciones críticas generales
Terreno en la zona de inicio	Pendiente de 25° ó mayores, abrupto, ruptura de pendiente y zona venteada
Profundidad del manto nival	Mayor de 30 cm en terreno liso o de 60 cm en terreno rugoso.
Estratificación de la nieve	Capas poco compactadas.
Temperatura de la nieve	0 °C
Potencia de la nevada	30 cm ó mayor
Precipitación	20 mm ó mayor
Velocidad de precipitación	2 mm/h ó mayor
Asentamiento del manto de nieve	Menor del 15 % día
Velocidad del viento	Superior a 4 m/s
Dirección del viento	Sobre la pendiente de sotavento
Temperatura del aire	> 0°C ó < -10°C
Radiación solar	Pendientes expuestas al sol
Ocurrencia de avalanchas	Ausencia de avalanchas en las últimas nevadas; deslizamientos nivales en el momento.
Test	Deslizamiento de nieve por rotura con un esquí; fácilmente inestable por rotura con una pala
Pronóstico meteorológico	Predicción de nevadas, vientos o altas temperaturas

7. RIESGO SISMICO

7.1. INTRODUCCION

El movimiento sísmico del suelo se debe al paso a su través de ondas elásticas producidas al liberarse bruscamente la energía acumulada en un punto o foco.

Las causas de estos movimientos pueden ser muy variadas:

- * Explosiones.
- * Deslizamientos.
- * Actividad volcánica.
- * Inyección o extracción de fluidos del terreno.
- * Llenado de embalses.
- * Actividades mineras.
- * Actividad tectónica.
- * etc.

En general las zonas con mayor actividad sísmica son también las de mayor actividad tectónica actual o subactual.

Si se representan en un mapa de escala global los epicentros de un determinado período de tiempo, se puede comprobar que la mayor parte de ellos se localizan en una serie de cinturones estrechos, que corresponden al sistema de fosa arco-isla circumpacífico, el cinturón Alpino-Himalayo y las crestas de las dorsales centro-oceánicas. Fuera de estos cinturones, la sismicidad es dispersa en espacio y tiempo, y de carácter superficial.

La posibilidad de generación de terremotos asociados a fallas dependerá de:

- * Mecanismos deformativos que operan en la falla, que puede tener dos modalidades:
 - Creep asísmico: La deformación asociada es de tipo dúctil (régimen cuasi-plástico). Mecanismo de tipo intercristalino, llegándose a procesos de difusión de masas.
 - Sísmico intermitente: Mecanismos de tipo friccional (régimen elástico-friccional). Entre el 1 y 10 % de la energía se libera en ondas sísmicas.

* Velocidad del desplazamiento:

- Creep asísmico: Velocidades de desplazamiento pequeñas (0,1 a 10 cm. año⁻¹).
- Sísmico intermitente: Velocidad de desplazamiento rápida, alcanzándose los 10-100 cm. s⁻¹.

La profundidad del foco sísmico influye en gran medida en el radio de percepción de los terremotos. Los terremotos superficiales son los más catastróficos, debido a que la parte superior de la corteza actúa de forma frágil en su rotura.

El movimiento a lo largo de las fallas sismogénicas es una consecuencia de la aplicación de esfuerzos tectónicos a lo largo de la litosfera. El más importante de los mecanismos de generación de esfuerzos es el movimiento de las placas litosféricas. Esto es favorecido por la rigidez de la litosfera que permite, tras la generación de esfuerzos tectónicos en los bordes entre placas, que dichos esfuerzos se trasladen al interior de éstas.

También se generan esfuerzos tectónicos como consecuencia de la existencia de inhomogeneidades en la distribución de densidades y espesores de la corteza terrestre, erosión o sedimentación, glaciaciones y deglaciaciones, etc.

7.2. ESTABLECIMIENTO DEL RIESGO SISMICO

Antes de comenzar con este punto debemos definir algunos conceptos básicos, así:

- * Sismicidad: la frecuencia de sismos por unidad de área en una región determinada.
- * Capacidad de daño: efecto que sobre las construcciones humanas producen los movimientos del suelo originados por el terremoto, que en cada punto dependerá tanto del movimiento como de la respuesta de las construcciones. La distribución de la capacidad de daño en el espacio y en el tiempo sería el riesgo sísmico.

Una de las medidas prioritarias en el establecimiento del riesgo sísmico es la localización y medida de la actividad, así como la recurrencia de la misma, en fallas activas.

7.3. PLAN DE PRIORIDADES PARA LA ORDENACION TERRITORIAL DE LA ESPAÑA PENINSULAR EN FUNCION DE SU RIESGO SISMOTECTONICO

7.3.1. Severidad geológica (SG)

Es el grado de severidad del riesgo sismotectónico, se cuantifica con un valor comprendido entre 0 y 3 o atribuyéndole valores probabilísticos. En su estimación hay que tener en cuenta (ver GONZALEZ DE VALLEJO *et al.*, 1981):

- * Sismicidad histórica: (SH) delimitación de las zonas donde se han producido los terremotos más fuertes catalogados hasta el presente (intensidad $\geq$ VIII)
- * Riesgo sísmico: (RS) se establecen distintos niveles de probabilidad de ocurrencia de terremotos capaces de causar daños (intensidad $\geq$ VII) para un período de recurrencia de 50 años.

- * Actividad neotectónica: (AN) se considera como aquella actividad producida en estructuras geológicas después del período Mioceno (7 m.a.). En los estudios interesa lo más reciente (último m.a.). Se establecen zonas según el conocimiento de la región:

- a) Regiones con actividad neotectónica importante y bien documentadas para el cuaternario.
- b) Regiones con actividad neotectónica moderada.
- c) Regiones con actividad neotectónica baja.

Se estima mediante la asignación de coeficientes a cada uno de los parámetros anteriores y la aplicación de la expresión:

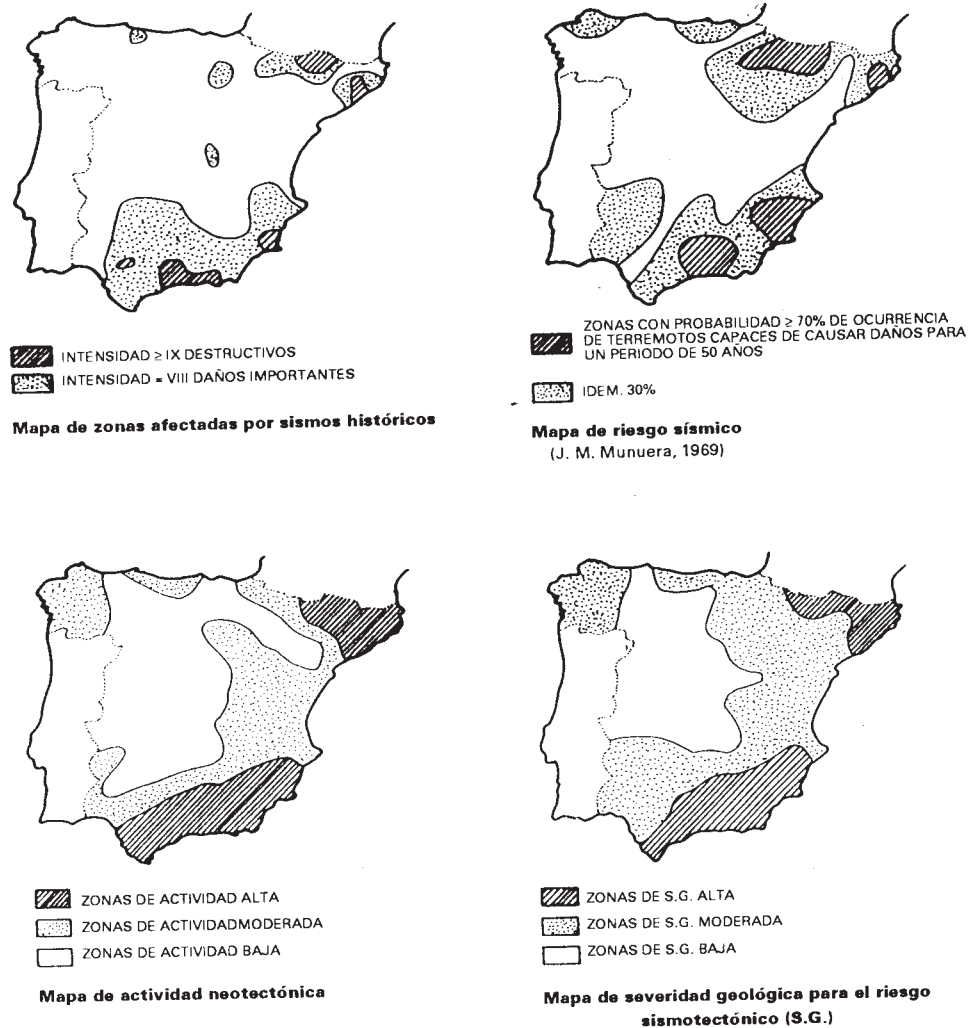
$$SG = \sum SH + \sum RS + \sum AN$$

CUADRO XII.23.—COEFICIENTES ASIGNADOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL GRADO DE SEVERIDAD GEOLOGICA

(Según GONZALEZ DE VALLEJO, *et al.*, 1981)

Factores	Parámetro	Coeficiente	Observaciones
Sismicidad histórica (SH)	Intensidad IMM $\geq$ IX IMM = VIII IMM $\leq$ VII	3 2 1	Destructivos Daños importantes Daños menores
Riesgo sísmico (RS)	Probabilidad (porcentaje) P $\geq$ 70 P $\geq$ 30 P < 30	3 2 1	Probabilidad de ocurrencia de sismos IMM $\geq$ VII para un período de cincuenta años.
	Edad geológica — Movimientos posmiocenos generalizados con evidencias cuaternarias. — Movimientos posmiocenos localizados con indicios de afectar algunas veces al cuaternario. — Movimientos posmiocenos escasos.	3 2 1	

FIGURA XII.22
(GONZALEZ DE VALLEJO, *et al.*, 1981)



Se establecen tres zonas según los valores:

- * Zonas con SG alto ($SG \geq 7$ de coeficiente 3)
- * Zonas con SG moderado ($7 < SG \leq 4$ o de coeficiente 2).
- * Zonas con SG bajo ($SG < 4$ o de coeficiente 1).

7.3.2. Densidad de población

Al ser el riesgo geológico una función dependiente de la densidad de población, se definió un factor llamado de población anual (PA) que representa el número medio de habitantes por año y unidad de superficie. Para estimar el PA se usa el censo de población.

7.3.3. Factor de beneficio inmediato

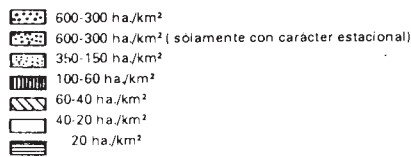
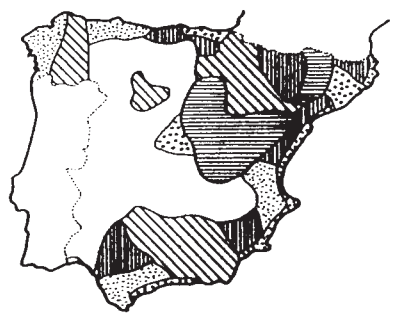
En las ciudades en pleno desarrollo, para las que no es posible modificar emplazamientos, ni actuar con normativas antisísmicas sobre todos los edificios, el beneficio inmediato es muy bajo y el valor del índice (BI) es 1, dado que pueden ir transformándose edificios antiguos.

En áreas que se están planificando y construyendo actualmente el beneficio sería mayor.

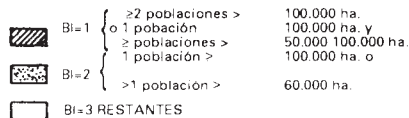
7.3.4. Riesgo de catástrofe

El riesgo de catástrofe (RC) se estima a partir del mapa de sismicidad histórica y el de zonas sísmicas generalizadas, estableciéndose tres zonas según intervalos de isosistas del mapa de zonas sísmicas.

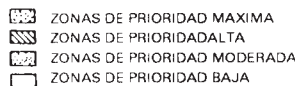
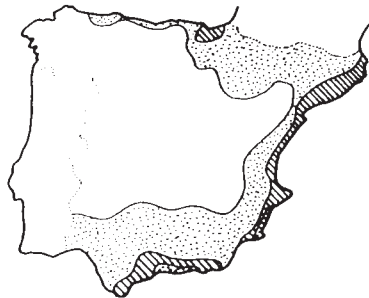
FIGURA XII.23
(GONZALEZ DE VALLEJO, *et al.*, 1981)



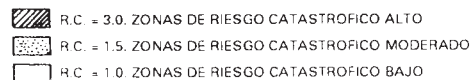
Mapa de densidades de población (P.A.)



Mapa de índices de beneficio inmediato (BI)



Mapa de prioridades de riesgo sismotectónico (PR) para la ordenación territorial



Mapa de índices de riesgo de catástrofe

7.3.5. Grado de prioridad del riesgo sismotectónico

Se ha definido como:

$$PR = SG \times PA \times BI \times RC$$

representa la importancia y necesidad de que se elaboren planos y medidas encaminadas al control y mitigación del riesgo sismotectónico.

8. RIESGO VOLCANICO

8.1. INTRODUCCION

El volcanismo constituye una de las más impresionantes manifestaciones de la energía inter-

na de la Tierra, liberando en el proceso eruptivo entre 10^{22} a 10^{25} ergios, valores que equivalen a un terremoto de magnitud 6 a 8,5. Esta liberación de energía no es instantánea como en el caso de los terremotos, sino paulatina.

Uno de los ejemplos más espectaculares de los que se tiene noticia es la erupción del Krakatoa en 1881, para la que se ha calculado una energía liberada de $8,36 \cdot 10^{24}$ ergios, equivalente a 200 megatones.

Aunque el Krakatoa es uno de los ejemplos históricos más violentos de erupción volcánica, existen otros que sin ser tan espectaculares mantienen una actividad más duradera, como es el caso de los volcanes de las islas Hawaii. Esto es debi-

do a una serie de factores que analizaremos someramente a continuación.

El tipo de materiales emitidos por un volcán y el riesgo que estos generan para las poblaciones cercanas depende fundamentalmente del grado de explosividad, el cual está relacionado con el contenido de volátiles del magma y la viscosidad de éste. Teniendo en cuenta estos dos factores, contenido en volátiles y viscosidad, podemos diferenciar dos casos extremos:

1.º) En el que los volátiles se liberan fácilmente, lo que nos indica un magma poco viscoso y por tanto el grado de explosividad es bajo; el resultado son coladas de lavas fluidas que llegan a recorrer grandes distancias.

2.º) Aquel en el que los volátiles son difíciles de liberar, hecho que nos indica que el magma es altamente viscoso. La acumulación de los volátiles en el interior del magma da lugar a una alta energía, que se libera de forma explosiva y la lava sale al exterior de forma fragmentada.

En estos dos casos, hemos considerado que el sistema volcánico es cerrado, es decir, los únicos elementos que intervienen en el proceso eruptivo son los que proceden del magma original, con mayor o menor grado de evolución. Sin embargo, en los sistemas abiertos se incorporan fracciones importantes de otros elementos, con aportes altos de energía que llevan consigo erupciones más espectaculares y peligrosas que las producidas en sistemas cerrados; un ejemplo de este tipo de sistemas es la interacción del agua con el magma en los procesos freatomagmáticos.

8.2. CLASIFICACION DE LOS VOLCANES SEGUN SU GRADO DE EXPLOSIVIDAD

Atendiendo a la explosividad de los volcanes estos se pueden clasificar según el modo más conocido:

- Peleanos.
- Vulcanianos.
- Estrombolianos.
- Hawayanos.

El índice de explosividad está dado por :

$$E = \frac{\text{Material Piroclástico (\%)}}{\text{Total de material emitido}}$$

Erupción explosiva
Erupción mixta
Erupción efusiva

En general, la actividad explosiva se concentra en los arcos-isla y bordes de placa destructivos. Los bordes de placa constructivos son esencialmente efusivos y los volcanes intraplaca suelen ser intermedios.

Los factores que condicionan la viscosidad, que interviene en gran medida en la explosividad de un volcán, son:

- Composición del magma.
- Temperatura.

Así, cuanto mayor es el contenido en sílice y aluminio de un magma, mayor es su viscosidad; estos magmas ácidos se dan por lo general a bajas temperaturas. Los magmas básicos tienen menor contenido en aluminio y sílice, hacen erupciones a alta temperatura y su viscosidad es unas mil veces menor que la de los ácidos.

Por lo tanto, de forma general diremos que el volcanismo ácido presenta erupciones más violentas que el básico.

8.3. POSIBLES DAÑOS SEGUN TIPO DE AGENTE

Según sea el agente generador en la erupción y el tipo de ésta (efusiva, explosiva o mixta) tendremos el siguiente cuadro de daños (humanos y/o materiales) directos o indirectos.

Las erupciones de tipo efusivo tienen un radio de acción pequeño, mientras que las explosivas pueden afectar a áreas próximas y de distancia media.

A continuación se describen sucintamente los daños posibles y los mecanismos que los producen.

8.3.1. Coladas de Lava

- * En función de sus características, condicionadas por viscosidad, composición y temperatura de efusión, pueden distinguirse:

- Pahoehoe: son fluidas, cubiertas de una película de lava solidificada muy fina que va retorciéndose al avanzar la colada (formas cordadas, en tripa, etc.).
- AA: más viscosas, superficie muy rugosa y granulada.
- Coladas de bloques: representan el máximo de viscosidad. Bloques de lava solidificada son arrastrados en la superficie de la colada.
- * Las más fluidas corresponden a las composiciones básicas.
- * La viscosidad aumenta en la colada cuando ésta va enfriándose, con lo que disminuye la velocidad y con ella su peligrosidad.
- * Su área de influencia suele ser inferior a los 30 km, aunque hay citas de coladas no históricas de 330 km.
- * Uno de los factores que controla la marcha de la colada es la topografía.
- * Las coladas generan grandes daños materiales allí por donde pasan.

8.3.2. Piroclastos

- * Distribución más extensa que las coladas, afectando a zonas muy alejadas llegando a los 1000 km.
- * Daños de naturaleza diversa dependiendo de:
 - Distancia al lugar de emisión.
 - Volumen de materiales expulsados.
 - Condiciones climatológicas.
 - Inclinação del conducto de salida.
 - Presión de salida.
 - etc.
- * El volumen del depósito y el tamaño de los piroclastos disminuye según nos alejamos del centro de emisión.
- * La lluvia de piroclastos es acompañada de gases nocivos.
- * Las condiciones de supervivencia en casos de emisión de piroclastos van en aumento hacia zonas lejanas del foco emisor, así tendremos:

- Zonas cercanas: posible caída de grandes piroclastos, caída de fragmentos con altas temperaturas, gran volumen de materiales que puede llegar a superar edificios y producir derrumbes. Por lo general van acompañados de emisiones de gases.
- Zonas más alejadas: únicamente llegan lapilli y cenizas, los daños son menores, pero su acumulación puede dar lugar al colapso de tejados, bloqueo de puertas y ventanas, taponado de alcantarillado, etc. Puede darse la muerte de animales por la ingestión de plantas cargadas de piroclastos. Los daños a la agricultura dependerán del volumen de piroclastos, tipo de vegetación y época del año.

8.3.3. Gases

- * Constituyen la mayor parte de las sustancias que emite un volcán, están constituidos principalmente por agua y en menor proporción CO_2 , CO , SO_2 , SO_3 , SH_2 , N_2 , ClH , FH .
- * Las emanaciones pueden tener diferente naturaleza y perduran bastante tiempo después de la finalización de la erupción.
- * La llegada de coladas al mar o lagos, trae consigo la formación de grandes columnas de vapor que llevan asociado el peligro de la lluvia, sobre todo si va acompañada de elementos tóxicos.
- * La distribución de los gases dependerá de la climatología del lugar.

8.3.4. Nubes ardientes.

- * Son avalanchas incandescentes, formadas por una gran cantidad de fragmentos de magma aún líquido, inmersos en una fase gaseosa.
- * Viajan a gran velocidad.
- * Existe cierto control topográfico (valles).
- * Según el mecanismo de emisión se diferencian varios tipos.
- * Ocasionan la destrucción total del territorio por el que pasan.

8.3.5. **Igmimbritas**

- * Son parecidas a las nubes ardientes en cuanto al mecanismo de emisión, aunque el volumen emitido es mucho mayor.
- * Velocidades aproximadas de 100 km/h.
- * No se tiene referencia histórica salvo un caso, pero son altamente peligrosas.
- * Pueden alcanzar grandes extensiones.

8.3.6. **Lahares**

- * Son coladas de barro formadas por materiales volcánicos, agua y todo aquello que arrastren a su paso. El agua es el producto, en general, de la fusión de nieve o hielo acumulada en el cráter volcánico y sus alrededores.
- * La masa de material con el agua viaja a gran velocidad, favorecido en gran medida por el fuerte desnivel que suele existir entre la cima del edificio volcánico y la base de éste. Alcanzan distancias variables entre unos pocos kilómetros y 100 kilómetros como casos excepcionales.
- * Presentan un control topográfico y morfológico importante.
- * Destrucción total del territorio afectado.

8.3.7. **Terremotos asociados a la actividad volcánica**

- * Son terremotos ligados a procesos magmáticos, tales como inyección de magma o la expansión de gas.
- * La velocidad de propagación la podemos considerar como instantánea, ya que es una liberación de energía muy rápida.
- * Por su pequeña magnitud suelen afectar sólo a las zonas más cercanas a los centros de emisión, alcanzando en torno a estos últimos unos cuantos kilómetros.
- * La destrucción producida por los estos movimientos del terreno es variable, dependiendo fundamentalmente de la proximidad del foco sísmico y la calidad de las edificaciones.

8.3.8. **Tsunamis**

- * Son maremotos debidos a la actividad volcánica y sísmica. Las causas de un maremoto debido a la actividad volcánica hay que buscarlas en unos pocos procesos capaces de aportar la energía suficiente. Estos son, principalmente, las erupciones en zonas submarinas someras, donde la interacción agua-magma alcanza el máximo de explosividad, y los colapsos de columnas piroclásticas con formación de una caldera.
- * Las velocidades de propagación de las grandes olas son altas, llegando a alcanzar cientos de km/h. Asimismo, las distancias que recorren las ondas de propagación son enormes, como las cantidades de agua que se traslada cuando se produce la rotura de la ola. El recorrido de estas masas depende fundamentalmente de la distancia a la que se encuentran las zonas afectadas del foco y la altura alcanzada por la masa de agua sobre el nivel del mar.
- * La destrucción de las zonas afectadas es total.

8.4. **ANALISIS DEL RIESGO VOLCANICO Y SISTEMAS DE PREVENCION**

Los métodos de predicción de erupciones volcánicas no se encuentran en la actualidad lo suficientemente avanzados como para anunciar con tiempo suficiente la entrada en erupción de un volcán. Sin embargo, sí se dispone de medios para determinar el alcance y daños posibles derivados de uno de estos fenómenos.

Los sistemas de vigilancia más utilizados actualmente sirven para aportar datos sobre los períodos pre-eruptivos y las fases de crisis; de este modo, se pueden elaborar planes para afrontar el desarrollo de estas etapas de la erupción volcánica. El sistema de vigilancia, control y predicción se puede dividir en tres apartados:

8.4.1. **Aparatos y equipos**

El primer inconveniente, y el más importante, que presenta este apartado es el alto coste del instrumental técnico para una red completa de vigilancia, por lo que sólo los países ricos pueden permitirse mantener de forma permanente, y

sólo en aquellas zonas volcánicas muy activas, redes de vigilancia completas.

Los aparatos que suelen ser utilizados son:

- Sismógrafos: miden la intensidad de los terremotos ligados a la actividad volcánica.
- Microbarógrafo: proporciona de forma constante la variación de la presión atmosférica.
- Magnetómetros: miden la variación de la intensidad del campo magnético terrestre.
- Geodímetro: permite medidas simultáneas de gran precisión de ángulos y distancias.
- Clinómetro: proporciona medidas de la deformación angular.
- Aparatos de fotografía y fotogrametría: registran los cambios topográficos.
- Mareógrafo: aporta datos sobre la variación del nivel del mar.
- Gravímetros: miden la variación del valor de la gravedad terrestre.
- Espectrómetros y espectrofotómetros: permiten el análisis de los tipos de gases emitidos en la erupción volcánica.

8.4.2. Métodos de medida

La organización del instrumental técnico se establece para que permanezca un equipo mínimo de forma permanente, pero con suficiente capacidad para dar la alarma inicial. Este equipo suele estar constituido por una red sísmica y una red clinométrica, además de cualquier otro tipo de aparatos de observaciones de los cambios físicos en los alrededores del volcán.

En caso de producirse la erupción volcánica o durante los periodos de inactividad y con propósitos de investigación puntual, se establece una red de apoyo. Esta queda constituida según las necesidades y el objetivo del análisis y/o estudio.

8.4.3. Proceso de datos

El proceso de datos debe concluir en una serie de actuaciones y planes de vigilancia y defensa

en caso de la erupción volcánica, además del conocimiento puramente científico de los procesos volcánicos y el interior de la tierra.

8.4.4. Objetivos prioritarios

Los objetivos prioritarios de los análisis de riesgo volcánico pueden agruparse en tres apartados:

1.º) Localización de volcanes activos o posiblemente activos. Los estudios sobre centros eruptivos han permitido calcular que la vida de un volcán de tipo toleítico es de unos 200.000 años y la de uno calcoalcalino de 60.000 años.

En cuanto a los alcalinos, su vida es más corta, aunque algunos estratovolcanes pueden prolongar su actividad durante centenares de miles de años. De lo expuesto anteriormente se deduce que la inactividad de un volcán no implica que se encuentre «totalmente apagado», y por tanto tendremos que analizar el registro geológico para estimar su posible vuelta a la actividad.

2.º) Determinación para cada volcán del registro histórico. Dentro de este apartado debemos hacer dos subgrupos, uno en función del *registro geológico* y por otro lado del *registro histórico humano*.

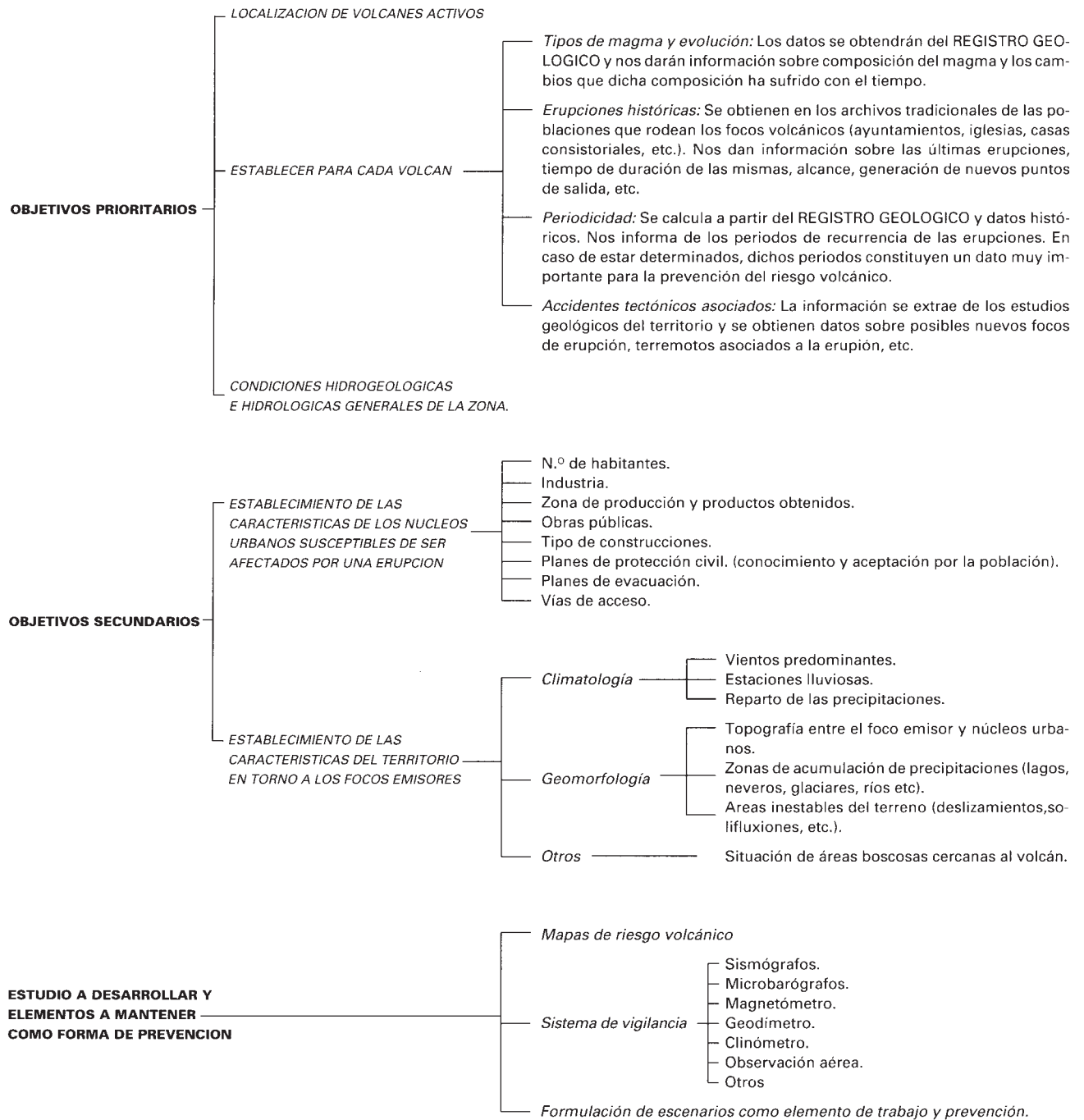
- El *registro geológico* nos aporta datos sobre el tipo de magma emitido y la evolución que éste a sufrido con el tiempo. El estudio de esta historia debe alcanzar los 30.000 años en el caso de que existan en el registro y de manera primordial los últimos 5.000 años.

Junto con el estudio de los materiales emitidos por el volcán, deben analizarse también la posible periodicidad del proceso volcánico y los accidentes tectónicos asociados, que nos aportarán posibles nuevos focos de erupción, así como elementos a considerar en el plan de vigilancia.

- El *registro histórico humano* nos da información sobre las últimas erupciones, tiempo de duración de las mismas, alcance, generación de nuevos puntos de salida, fenómenos previos a la erupción y tiempo de ésta.

La obtención de estos datos se realiza en los archivos tradicionales de las poblaciones cercanas a los puntos de emisión, como son ayuntamientos, iglesias, casas consistoriales, etc.

FIGURA XII.24.—ANÁLISIS DE RIESGO VOLCANICO



3.º) En último lugar se analizan las condiciones hidrogeológicas e hidrológicas generales de la zona volcánica, lo que nos permite establecer las posibles conexiones de las aguas con los materiales magmáticos, y prever la posible generación de procesos freatomagmáticos.

Como se puede ver, este primer análisis busca las características puramente geológicas, y obtiene

datos del proceso volcánico. Los objetivos secundarios analizan las condiciones del entorno que favorecen o perjudican el avance y peligrosidad de la erupción en relación a la localización de las poblaciones situadas en torno a los focos emisores. Los objetivos secundarios se dividen en dos apartados:

1.º) Establecimiento de las características del territorio en torno a los focos emisores. Dentro de

este Apartado hay que diferenciar los siguientes puntos:

- Climatología: se busca dentro de este subapartado cómo las condiciones generales de la zona van a influir en el desarrollo de la erupción, analizando los vientos predominantes, las estaciones lluviosas y el reparto y tipo de las precipitaciones.
- Geomorfología: deben considerarse las características topográficas para buscar los posibles recorridos del material expulsado por el volcán; las zonas de acumulación de precipitaciones y su conexión con las zonas por donde es posible la fluencia de material volcánico; y, por último, las zonas inestables en que se pueden producir deslizamientos, solifluxiones, etc.
A estos puntos hay que añadirles el análisis de las longitudes recorridas por el material.
- Vegetación: localizar las áreas boscosas cercanas a los centros de emisión y que pueden dar origen a incendios.

2.º) El establecimiento de las características de los núcleos urbanos susceptibles de ser afectados por la erupción. En este apartado se estimará el número de habitantes, la industria, zonas de producción y productos obtenidos, obras públicas, vías de comunicación, tipo de construcciones, planes de protección civil que deben ser conocidos y aceptados por la población y los planes de evacuación.

Una vez recogidos todos estos datos es momento de preparar los mapas de riesgo volcánico para cada centro de emisión, así como el sistema de vigilancia y la formulación de escenarios como elemento de trabajo para la prevención.

9. DOCUMENTACION

La información sobre Riesgos Naturales es escasa y sobre todo dispersa y discontinua: Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.), Instituto Tecnológico GeoMinero (I.T.G.E.) e Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA), son los organismos que con mayor frecuencia han elaborado información sobre sismicidad, inundaciones, deslizamientos y erosión.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C.), departamentos universitarios y, recientemente, algunos Gobiernos de Comunidades Autónomas, también disponen de información en este campo. Destacan aquí el Servei Geològic de la Generalitat de Catalunya y las Diputaciones Forales de Navarra y el País Vasco.

10. CARTOGRAFIA

La gran mayoría de los mapas sobre riesgos han sido elaborados por el I.T.G.E.; únicamente en temas de erosión ha sido el ICONA el encargado de publicar la cartografía.

En la cartografía del I.T.G.E., sumamente variada, no hay ninguna serie que cubra toda España, si exceptuamos el Mapa Geotécnico, ya sea el general o el de Ordenación del Territorio. Esta serie, aun cuando no es una cartografía de riesgos, sí contiene datos al respecto.

Mapas específicos de riesgos, editados por el I.T.G.E., son: el Atlas Geocientífico (publicados los de Almería, La Coruña, Alicante, Madrid y Burgos); el de Riesgos Ligados al Movimiento de Terrenos (publicados Jaca y Granada); Sismotectónico (zona de Granada); Previsor de Riesgos por Inundación en los núcleos urbanos (publicados los de Andalucía, Extremadura, Murcia, Comunidad Valenciana, Güímar y Playas de las Américas); Atlas de Riesgos Naturales de Castilla y León; Atlas de Riesgos Naturales de Alcoy; Estabilidad de Laderas y Taludes en el Valle del Guadalquivir; Geotécnico y de Peligrosidad Geológica en ciudades (publicados varios: Alcoy, Almería, Cádiz, Gijón, Granada, Huelva, Palma de Mallorca, Pamplona, Sagunto, Sevilla, Zaragoza, Murcia, Vigo, Valladolid).

En la cartografía de ICONA están los mapas de estados erosivos por cuencas hidrográficas.

11. CATALOGOS Y SIMILARES

- Catálogo Nacional de Riesgos Geológicos. I.T.G.E. Madrid. 1988.
- UNESCO. «Avalanche Atlas». Courvoisier S.A. París 1981.

- SERVEI GEOLOGIC DE CATALUNYA. « informe G.T.-30/87. Generalitat de Catalunya. Dep. de Política Territorial i Obres Públiques. Barcelona 1987.
- SERVEI GEOLOGIC DE CATALUNYA. «Estudi del risc d'allaus». Proyecto iniciado en 1986-87, en el Pirineo Catalan. Generalitat de Catalunya. Dep. de Política Territorial i Obres Públiques. Barcelona.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALLEN, J. R. L. *Physical processes of sedimentation*. Earth Science Series, num. 1, Ed. Allen y Umvin, 1970.
- ANDERSON cit. en LÓPEZ CADENAS Y BLANCO, 1976.
- AYALA, F. J.; DURAN, J. J. y PEINADO, T. (edit.): *Riesgos geológicos*. I.T.G.E. Madrid, 1987.
- AYALA, F. J. y ANDREU, J. (edit.): *Manual de taludes*. I.T.G.E. Madrid, 1987.
- AYALA, F. J. (edit.): *Geología y prevención de daños por inundaciones*. I.T.G.E. Madrid, 1985.
- AYALA, F. J. et al.: *Mapa predictor de riesgos por expansividad de arcillas en España a escala 1:1.000.000*. Serie Geología Ambiental. I.G.M.E. y C.E.D.E.X., 64 pp. y 1 mapa. Madrid, 1986.
- AYALA, F. J. et al.: *Mapa nacional del carst a escala 1:1.000.000*. I.G.M.E. Madrid, 1986.
- BELCHER, D. J. y col.: *Land Form Reports*. U.S. Naval Photographic Interpretation Center, Office of Naval Research, Washington, 1975.
- BEVEN, K. y CARLING, P.: *Floods*. Wiley. N. York, 1989.
- BOLT, B. A.; HORN, W. L.; MACDONALD, J. A. y SCOTT, R. F.: *Geological Hazards*. Spriger Verlag. Berlín, 1975.
- BOUYOUCOS. Cit. en LOPEZ CADENAS y BLANCO.
- BRABB, E. E. y col.: *Landslide susceptibility in San Mateo County, California*. U.S. Geological Survey. Miscellaneous Field Studies Map MF-360, Washington, 1972.
- BRABB, E. E. y PAMPEJAN, E. H.: *Preliminary Geologic Map of San Mateo County, California*. U.S. Geological Survey. Miscellaneous Field Studies Map MF-328, Washington, 1972.
- CAMPBELL, R. S.: *Isopleth map of landslide deposits. Pint Dune Quadrangle, Los Angeles Country, California; an experiment in generalizing and quantifying aerial distribution of landslides*. U.S. Geological Survey. Miscellaneous Field Studies Map MF-535, Washington, 1973.
- CARRARA, A.: «Geomathematical assessment of regional landslide hazard». IV Int. Conf. Appl. Statistics and Prob. in Soil Struct. Eng. Florence 3-27, 1983.
- CARSON, M. A. y KIRBY, M.J.: *Hillslope, form and process*. Cambridge. Univers. Press. 1972.
- COATES. *Environmental Geology*. Wiley, N. York. 1982
- COSTAS, J. y BAKER, V.: *Surficial Geology*. Wiley, N. York 1981.
- DEBELLE, G.: «Roadside erosion and resource implications in Price Edward Island». Geographical Paper num. 48. Policy Research and Coordination Branch, Department of Energy, Mines and Resources. Ottawa, 1971.
- DUNNE, T. y LEOPOLD, L.: *Water in Environmental Planing*. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1978.
- EAGLESON, P. S.: *Dynamic Hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1970.
- FABIAN, C.: «The Karst phenomena study from the theory of systems point of view». In: *Theoretical and Applied Karstology*, vol. 1, núms. 29-34, Bucarest, 1983.
- F.A.O.: *Conservación de suelos*. F.A.O., Roma, 1961.
- FISHER, W. L. y col.: *Environmental Geologic Atlas of the Texas Coastal Zone. Beaumont Port Arthur Area*. Univ. of Texas at Austin, Bureau Econ. Geol., Austin, 1972.
- FOLK, R.L.: «Longitudinal dunes of the northwestern edges of the Simpson desert, Northern Territory, Australia. 1. Geomorphology and grain size relationships». *Sedimentology*, 16, 5-54, 1971.
- FOURNIER, F.: *Climat et Erosion*. Ed. Presses Universitaires de France, 1960.
- GARCIA SALMERON, J.: *Erosión eólica*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Madrid, 1967.
- GLEUNIE, K. W.: «Desert sedimentary environments». *Dev. in Sedimentology*, 14, 1970
- GOMEZ OREA, D.: «El plan especial de protección del medio físico». En RAMOS, A. y WEDDLE, A. E.: *Primer Curso de Planificación integrada del paisaje forestal*. Monografía 7, ICONA, Madrid, 1975.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L.; CAPOTE, R. y CARBO, A.: *Riesgo sismo-tectónico*. En Pedraza 1981.
- GRAY, D. M. y MALE, D. M. (Edit.): *Handbook of Snow*. Pergamon Press, 1981.
- HARLAND y col.: «The definition and identification of tills and tillitas». *Earth Science Review*, 2, págs. 225-56, 1966.
- HOLMES, A.: *Geología Física*. Omega, Barcelona, 1952.
- HOLMES, A.: *Principles of Physical Geology*. Nelson, London, 1965.
- HOOKE, R. Le B.: «Processes on arid region alluvial fans». *J. Geol.*, 75, págs. 438-60, 1967.
- I.G.M.E: *Informe preliminar sobre el deslizamiento de Olivares*. Inedito, 1986.
- JONES, F. O.; EMBODY, D. R. y PETERSON, W. C.: *Landslides along the Columbia river valley, Northeastern Washington*. U.S.G.S. Prof. Paper 367, 1961.
- KELLER, G.: «Beihaug zur Frage Oser und Kames». *Eiszeitlites Gegenwart*, 2, 127-132, 1962.
- KUKAL, Z.: *Geology of recent sediments*. Academic Press, London, 1971.
- LOPEZ, J.: «El riesgo debido a los aludes». En Ayala et al. 1987, cap. III, págs. 215-225.
- LÓPEZ CADENAS, F. y BLANCO, M.: *Hidrología forestal*. E.T.S. de Ingenieros de Montes, Madrid, 1976.
- LOPEZ VERGARA, M.L.: *Manual de fotogeología*. Serv. Publi. CIE-MAT, Madrid, 1988.

- MARSH, W. M.: *Environmental analysis for land use and site planning*. McGraw-Hill, New York, 1978.
- McKEE, E. D.: «Structures of dunes at White Sands National Monuments, New Mexico and a comparison with structures of dunes from other selected areas». *Sedimentology*, 7, págs. 1-69, 1966.
- McKENZIE, F. T.: «Bermuda pleistocene eolianites and paleo-winds». *Sedimentology*, 3, págs. 52-64, 1964.
- MONTURIOL, F. y col.: *Cartografía edafológica y capacidad de uso de los suelos de la franja costera de la provincia de Santander*. CIDS, Santander, y CISC, Madrid, 1978.
- NACIONAL COOPERATIVE SOIL SURVEY. Cit. en TILMANN y MOKMA, 1976.
- OOMKES, E.: «Environmental significance of sand dykes». *Sedimentology*, 7, págs. 145-146, 1965.
- PEDRAZA, J. de (edit.): *Geología y Medio Ambiente*. Monografía del C.E.O.T.M.A. n. 11, Madrid, 1981.
- REINEK, H. E.: «Tidal flats». En RIGBY, J.D. y HAMBLING, W.K.: *Recognition of ancient sedimentary environments*. SEPM Spec. Publ., 16, 146-159, 1972.
- REINEK, H. E. y SINGH, I. B.: *Depositional sedimentary environments*. Springer Verlag, Berlin, 1973.
- SALINAS, J. L.: *Riesgos ligados a las arcillas expansivas*. En Ayala, F.J. et al.: *Riesgos Geológicos*, 1987.
- SHARP, C. F.: *Landslides and related phenomena*. Columbia Univ. Press, New York, 1938.
- SHARP, C. F.: *Landslides and related phenomena*. Pageant, Patterson, N. J., 1960.
- SHEETS, D. D. y GRAYSON, O. K. (edit.): *Volcanic activity and human ecology*. Academic Press, 1979.
- SHENG, T.C.: *Landslide classification and studies in Taiwan*. Chinese and American joint Commission of rural reconstruction, Forestry Series. Washington, 1966.
- SKIDMORE, E. J. y WOODRUFF, N. P.: «Wind erosion forces in the United States and their use in predicting soil loss». *Agricultural Handbook*, 346, USDA, Washington, D.C., 1968.
- SKINNER, B. I. y PORTER, S. C.: *Physical Geology*. Wiley, N. York, 1987.
- SOIL SURVEY STAFF: *Soil Survey Manual*. USDA Handbook, 18, Washington, D.C., 1951.
- SOYER y col.: *Manuel de photo-interprétation*. Ed. Techniques, Paris, 1970.
- STEINITZ, C. y SINTON, D.: *Program. IMGRID*. Graduate School of Design, Harvard Univ. Cambridge, Mass., 1975.
- STOIRE, E. R.: *Manual de evaluación de suelos*. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, México, 1970.
- TAYLOR, J. C.: *An evaluation of the universal soil loss equation for predicting watershed sediment field*. Master thesis, Iowa State Univ., Ames., 1970.
- TILMANN, E. y MOKMA, D. L.: «Soil management groups and soil erosion control». *Farm. Science*, 310, Michigan State Univ., págs. 12-13, 1976.
- TUBBS, D. W.: *Causes, mechanisms and prediction of landsliding in Seattle*. Ph. Thesis, Univ. of Washington, Seattle, 1975.
- TUFNELL, L.: *Glacial Hazards*. Longman 1984.
- U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE: *Soil Survey Manual*. USDA Handbook, 18, Washington, 1951.
- U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE: «*Procedure for computing sheet and rill erosion on project areas*». Technical Release, 51, 1975.
- VARNES, D. J.: «Landslide types and processes». *Highway Research Board Special Report*, 29, 20-47, Washington, D.C., 1958.
- VARIOS: *Establecimiento de criterios geológicos para la prevención de daños por avenidas, aplicación a las inundaciones del valle del Nervión (País Vasco) en Agosto de 1983*. I.T.G.E., Madrid, 1984.
- VARIOS: *Impacto económico y social de los riegos geológicos en España*. I.T.G.E., Madrid, 1987.
- VISHER, S.S.: «Climatic maps of geologic interest». *Bull. Geol. Soc. Am.* 56, págs. 713-76, 1945.
- WAY, D.S.: *Terrain analysis*. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Penn., 1973.
- WAY, D.S.: «*The soils models. Technical documentation*». En «*The Interaction Between Urbanization and Land: Quality and quantity in environmental planning and Design*». Landscape Architecture Research Office Graduate School of Design. Harvard University. Cambridge, Massachusetts, 1978.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D. D.: «Rainfall energy and its relation to soil loss». *Trans. Amer. Geophysical Union*, 39, págs. 285-291, 1958.
- WISCHMEIER, W. H. y SMITH, D.D.: «*Predicting rainfall-erosion losses from cropland, east of the Rocky Mountains*». Agriculture Handbook, 282, USDA, Washington, 1965.
- WISCHMEIER, W. H. y col.: «A soil erodibility monograph for farmland and construction sites». *J. of Soil and Water Conservation*, 26, págs. 189-192, 1971.
- WISCHMEIER, W. H.: «*Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas*». Proc. 1972 Sediment Prediction Workshop, Oxford, Miss., 1974.
- WOLF, K. H.: «Conceptual models». *Sediment, Geol.* 9, págs. 153-193, 1973.
- WOLMAN, M. G.: «Evaluating alternative techniques of flood plain mapping». *Water. Res.* 7, págs. 1383-1392, 1971.
- YOUNKIN, L. M.: «Effects of highway construction on sediments loads in streams». *Highway Research Board*, SR. 135, págs. 82-93, 1973.