

Nuria Serrat i Maném¹ y
 J. A. Martínez-Casasnovas²
¹ Centro Tecnológico Forestal de
 Cataluña, Pujada Seminari s/n,
 25280 - Solsona (Lleida).
 E mail: Nurias@ctfc.udl.es
² Departamento de Medio Ambiente y
 Ciencias del Suelo - Universidad de
 Lleida. Rovira Roure 177 - 21198
 Lleida. E mail: J.Martinez@macs.udl.es

CARTOGRAFÍA DEL RIESGO DE EROSIÓN HÍDRICA EN GRANDES CUENCAS HIDROGRÁFICAS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SIG

RESUMEN

En el presente trabajo se propone un método para la cartografía del riesgo de erosión hídrica a escala de reconocimiento en grandes cuencas hidrográficas. El método se basa en la evaluación cualitativa de los factores de erosión: cubierta vegetal, pendiente, erosividad de las lluvias, litología y densidad de la red de drenaje; información adquirida y/o procesada mediante técnicas de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Este método es útil en áreas en las que se dispone de escasa información territorial y en las que se desea tener una estimación del riesgo de erosión con un bajo coste económico y con una precisión aceptable para una escala de reconocimiento. El método se ha aplicado a la cartografía del riesgo de erosión en la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca), con graves problemas de pérdida de capacidad y deterioro de los desagües de fondo por aterramiento.

La aplicación del método, localiza las áreas con mayor riesgo de producción de sedimentos, poniendo de manifiesto el potencial de las técnicas utilizadas para la obtención de cartografía a bajo coste y para la toma de decisiones en proyectos de conservación de suelos en grandes cuencas hidrográficas.

Palabras clave: Riesgo de erosión hídrica, Cuencas hidrográficas, Teledetección, SIG.

INTRODUCCIÓN

El aterramiento de los embalses por la sedimentación de los materiales erosionados en sus cuencas es un grave problema que disminuye la capacidad de almacenamiento de agua. En España, y según datos de batimetría de 30 embalses, recopilados por ALMOROX y cols. (1994), la disminución de capacidad de almacenamiento media es del 16,8%, oscilando entre 7,3% para embalses de menos de 30 años, 19% para embalses de entre 30 y 50 años y 27% para embalses de más de 50 años.

Esta sedimentación, que es una medida directa de la pérdida de capacidad del embalse, pone también de manifiesto la existencia de procesos de degradación de suelos por erosión hídrica en las cuencas. Desde una perspectiva de conservación de suelos, las batimetrías en los embalses suponen una información útil para conocer la degradación específica de las cuencas, aunque son necesarios otro tipo de estudios para localizar espacialmente la existencia de problemas de erosión y su magnitud, con el fin de poder diseñar y ejecutar planes de conservación a nivel de cuenca.

Una muestra de esta problemática que, como se ha mencionado, no constituye un caso aislado dentro de las más de 1000 grandes presas que constituyen el patrimonio hidráulico español, es el embalse Joaquín Costa (prepirineo de Huesca), más conocido como embalse Barasona (Figura 1). Desde su construcción, en 1932, ha sufrido una importante pérdida de capacidad debido al aterramiento ocasionado por los intensos procesos erosivos que tienen lugar en las cuencas de los ríos Isábena y Ésera. Actualmente, se estima que el embalse ha perdido el 20% de su capacidad inicial (90 Hm³). Esta situación y la del deterioro de los desagües de fondo de la presa obligó a la Confederación Hidrográfica del Ebro a llevar a cabo costosas operaciones de dragado en 1994, y de vaciado y restauración de las compuertas a partir de 1995, para solucionar el déficit de suministro de agua en gran parte del área regable del Canal de Aragón y Cataluña. La re-



Figura 1.- Localización de la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca)

Tabla 1.- Clases de cubierta vegetal establecidas para la clasificación supervisada de los datos de teledetección, grado y clase de protección del suelo a la erosión hídrica

CLASE CUBIERTA VEGETAL (ocupación del suelo)	Grado de protección del suelo	Clase de protección del suelo
Bosque caducifolio	Muy alto	2
Coníferas densas	Muy alto	2
Coníferas claras	Alto	3
Subclase	Moderado	4
Encinar	Moderado	4
Matorral boscoso de transición	Alto	3
Matorral	Moderado	4
Subclase	Bajo	5
Pastizales	Bajo	5
Subclase	Muy bajo	6
Vegetación escasa	Muy bajo	6
Áreas de badlands	Muy bajo	6
Subclase	Bajo	5
Cauce del río	Muy bajo	6
Cultivos de secano	Moderado	4
Cultivos en regadío	Muy alto	2
Zonas agrícolas heterogéneas	Alto	3
Prados y pastos	Muy alto	2
Pastos de alta montaña	Muy alto	2
Afloramientos rocosos montaña	—	1

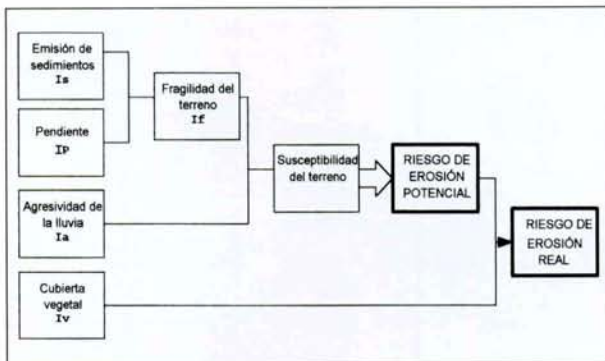
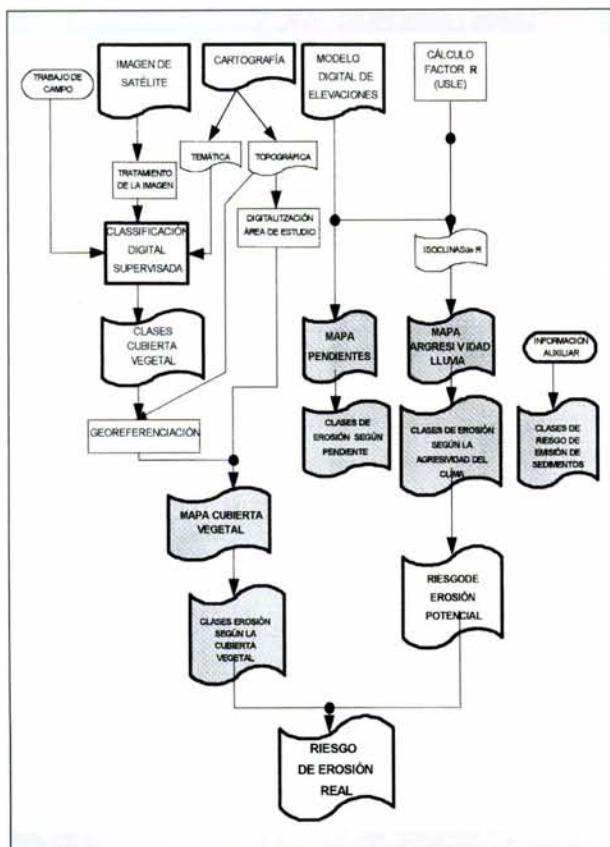


Figura 3.- Modelo cartográfico para la obtención de los mapas de riesgo de erosión potencial y real

Figura 2.- Metodología general seguida para la elaboración de la cartografía del riesgo potencial de erosión real en la cuenca del embalse Joaquín Costa (SERRAT, 1997)

ducción de la capacidad de almacenamiento del embalse Joaquín Costa, ha conducido en 1997, y tras largos años de espera, a la aprobación de la construcción de un nuevo embalse en Santa Liestra, a pocos Kilómetros aguas arriba del primero.

Ante esta problemática, y dentro de un convenio entre el Centro de Estudios y Experimentos de Obras Públicas y la Universidad de Lleida para la «Realización de estudios de vegetación limnológicos y del estado de conservación de suelos, relacionados con el proyecto de vaciado del embalse de Joaquín Costa», se promovió el estudio del estado de conservación de la cuenca (de unos 1500 km²) con la finalidad de localizar y evaluar las áreas críticas de producción de sedimentos.

Dentro del estudio del estado de conservación se consideró esencial realizar la cartografía de riesgo de erosión a escala de reconocimiento (1:100.000), como herramienta básica para la planificación a nivel de la cuenca hidrográfica. La falta de información territorial básica sobre los factores principales de

riesgo (litología, climatología, y cubierta vegetal/ usos del territorio) al nivel de detalle requerido, llevó a desarrollar una metodología, que se basa en el uso de imágenes de satélite y en la modelización mediante Sistemas de Información Geográfica.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló en tres fases diferenciadas, cuyo proceso se recoge esquemáticamente en la Figura 2.

Fase 1: Caracterización y cartografía temática de factores de erosión: Los factores de erosión considerados fueron:

- **Riesgo de emisión de sedimentos**: Se utilizó un mapa elaborado a partir del análisis de la litología y la densidad de la red de drenaje en la cuenca del embalse Joaquín Costa (Fargas, 1995; Fargas y cols., 1996).

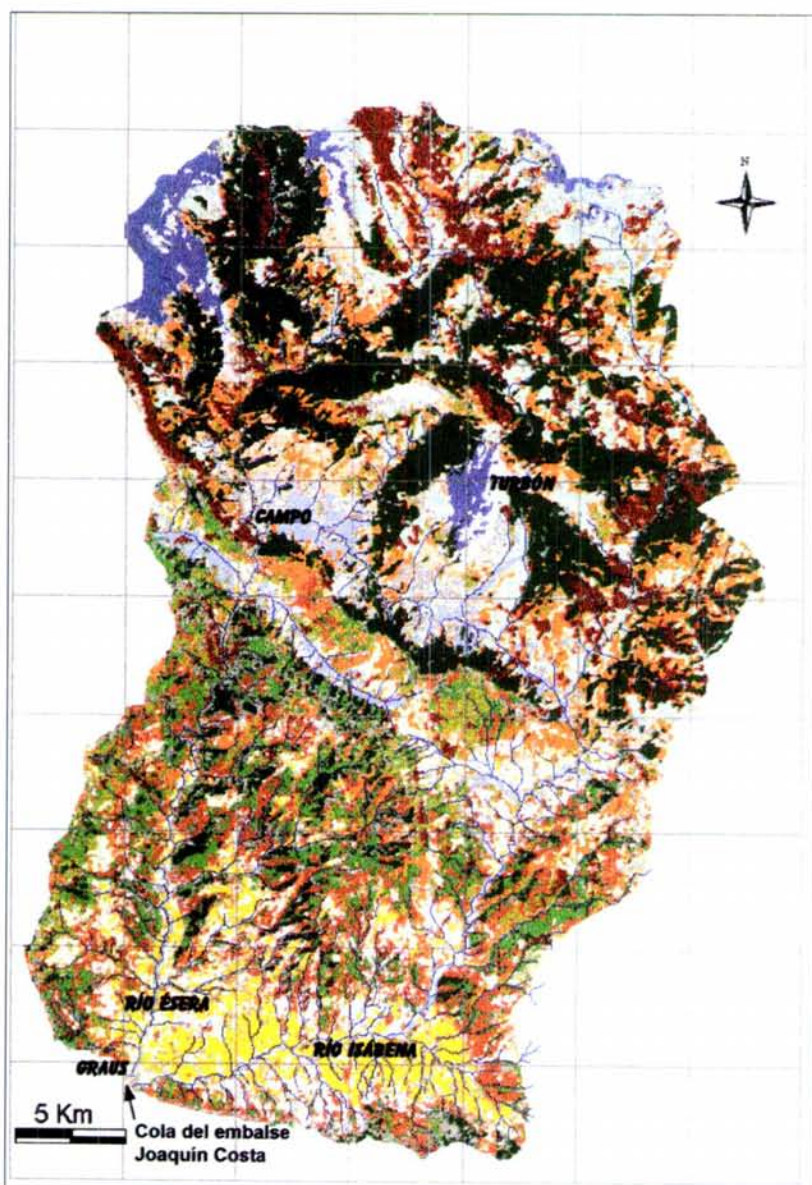
- **Cubierta vegetal**: Se realizó un mapa de cubierta vegetal por clasificación supervisada de una escena del sensor Landsat 5 TM (Thematic Mapper), del mes de julio de 1993. Para ello se utili-

zó el programa de tratamiento de imágenes Idrisi for Windows 2.0.

El procedimiento de interpretación de la imagen del satélite para la obtención de un mapa de cubierta vegetal y uso del territorio, exigía la realización de una serie de operaciones digitales: corrección atmosférica, corrección geométrica y clasificación supervisada (CHUVIECO, 1996).

La **corrección atmosférica** de la imagen se realizó según los métodos de regresión y del histograma mínimo (CHAVEZ, 1988). El primero se aplicó a las bandas que estaban correlacionadas con la banda TM7 (con efecto atmosférico inapreciable), en el caso de que el término independiente de la regresión establecida fuese superior al número digital mínimo de la banda, y en caso contrario, es decir cuando no existía correlación o bien el término independiente superaba al ND mínimo, se aplicó el segundo método.

La **corrección geométrica** de la imagen se hizo a partir de 29 puntos de control identificados sobre los mapas topográficos u ortofotomapas 1:50000. Se empleó una función de transformación cuadrática, consiguiendo un error aceptable (RMS < 29 m), rechazando la transformación lineal debido al fuerte contraste altimétrico de la



	Cauce de ríos (suelo desnudo)
	Bosque frondosas
	Bosque coníferas denso
	Bosque coníferas claro
	Encinar
	Matorral boscoso de transición
	Matorrales
	Pastizales
	Vegetación escasa
	Badlands
	Cultivos secano
	Cultivos regadío
	Áreas agrícolas heterogéneas
	Prados y pastos
	Pastos alta montaña
	Afloramientos rocosos
	No clasificado (8,5%)

Figura 4.- Mapa de cubierta vegetal (ocupación del suelo), de la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca), obtenido por clasificación supervisada de una imagen Landsat TM correspondiente al mes de julio de 1993

de clasificación, para evitar una mayor acumulación de errores.

La **clasificación digital supervisada** se realizó usando bandas originales y transformadas, para atenuar el efecto del relieve (sombras), facilitando además la discriminación entre suelo y vegetación. Las bandas utilizadas fueron las siguientes:

- TM4 banda original corregida para el efecto atmosférico.
- TM5 banda original.

TM7 banda original.

PC1: Primer componente del análisis de componentes principales de las 6 bandas del visible e infrarrojo reflejado.

NDVI (Diferencia Normalizada del Índice de Vegetación).

Ratio TM4/TM3.

Componente brillo de la transformación HSI sobre RGB543.

Las bandas TM7, TM5 y NDVI fueron seleccionadas, entre otros motivos, por ser bandas que muestran una gran eficacia para la discriminación de badlands (CERVERA, 1995; MARTÍNEZ-CASASNOVAS y CERVERA, 1996).

Durante el trabajo de la clasificación supervisada se comprobó la necesidad de dividir la imagen en dos y realizar una clasificación por estratos (mitad norte y mitad sur), con el fin de reducir la heterogeneidad producida por el cambio latitudinal de la vegetación, y asegurar una mejora en la clasificación automática.

Previamente al proceso de clasificación automática, se hizo un **análisis visual** de la composición en color RGB543, con el fin de establecer las clases informacionales y seleccionar las áreas de entrenamiento, que se comprobaron sobre el terreno (áreas de verdad-terreno). Tras un proceso iterativo se definieron 16 clases de cubierta vegetal (Tabla 1).

El resultado de la clasificación presenta una exactitud de las áreas de entrenamiento superior al 90% y una exactitud sobre el terreno de 63,4%. La confusión es mayor en las clases de matorrales y mínima en zonas agrícolas.

Agresividad de la lluvia:

Se obtuvo a partir del cálculo del factor R de la USLE (erosividad de las lluvias) en estaciones meteorológicas representativas. Para el cálculo de R se hizo uso de la ecuación propuesta por ICONA (1988) y se emplearon los datos de 9 estaciones pluviométricas. El resultado se presenta en la Tabla 2. Para su interpolación al resto del área de estudio se calculó una regresión del valor de R en función de la altitud. La ecuación de regresión se aplicó a un modelo digital de elevación.

zona. Los valores digitales iniciales se transfirieron a la posición corregida según el método del vecino mas próximo. Esta corrección tuvo lugar de forma posterior al proceso

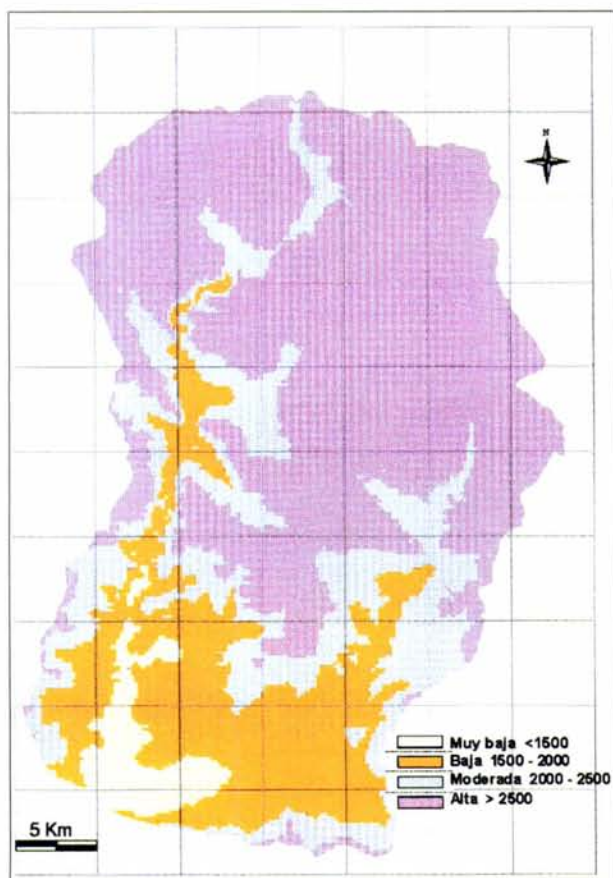


Figura 5.- Mapa de agresividad de la lluvia (erosividad de la lluvia), de la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca). Valores de R en $Mj\ ha^{-1}\ mm\ h^{-1}\ año^{-1}$.

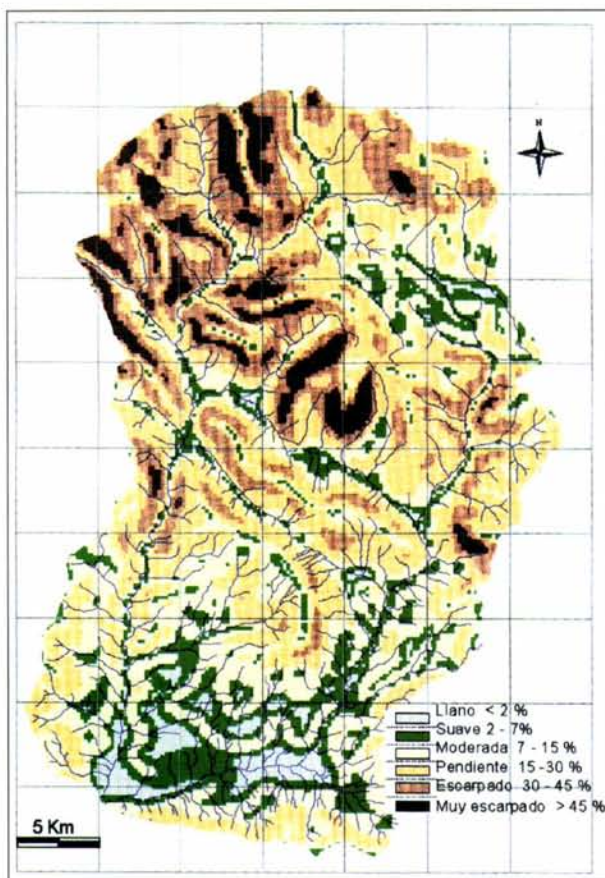


Figura 6.- Mapa de pendientes, de la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca), obtenido a partir del Model Digital de Elevaciones (200x200 m del IGN)

nes del área de estudio (malla 200x200 m del Instituto Geográfico Nacional).

La función de ajuste entre **R** i la altitud (**H**) obtenida es la siguiente: $R = 2.412 H + 106.74$ ($R^2 = 0.63$; **H** en metros y **R** en $Mj\ ha^{-1}\ mm\ h^{-1}\ año^{-1}$).

A partir del valor corregido del factor de erosividad R, se establecieron cuatro clases de agresividad de la lluvia.

Pendientes: El mapa de pendientes se obtuvo directamente a partir del modelo digital de elevaciones mencionado, mediante la función Surface-Slope del Software Idrisi.

Fase 2: Evaluación cualitativa del riesgo de erosión: Para el establecimiento de clases de riesgo para cada factor se empleó un sistema cualitativo. Los criterios se basaron valores aplicados en otras áreas de estudio y en el conocimiento adqui-

rido durante el trabajo de campo.

Para las variables continuas en el espacio (pendiente y agresividad de la lluvia) se establecieron rangos de variabilidad. Para las unidades de cubierta vegetal se asignó un índice cualitativo según el grado estimado de protección del suelo (Tabla 1). En algunas clases, consideradas poco homogéneas respecto su función de protección del suelo se estableció una subclase a partir del valor del NDVI.

Fase 3: Modelización cartográfica mediante SIG: Esta fase consistió en la elaboración de mapas de riesgo potencial de erosión y de riesgo de erosión real, se usaron técnicas de modelización cartográfica, como la superposición y la reclasificación de los mapas de clases de riesgo para cada uno de los factores de erosión considerados.

La modelización cartográfica permite establecer una correlación es-

pacial entre variables para la posterior identificación de unidades homogéneas respecto la incidencia de estas sobre un fenómeno.

Por superposición de las coberturas de los factores de erosión se obtuvieron los mapas de riesgo potencial de erosión y de riesgo de erosión real. (Figura 3).

a) Riesgo potencial de erosión.

La erosión de un terreno es una consecuencia de la acción de la lluvia sobre el suelo y su importancia depende tanto de la energía cinética de la primera como de la capacidad del propio suelo para resistirla. Para integrar ambas características y evaluar el riesgo de erosión potencial se integraron los mapas temáticos con la intención de obtener: i) una cartografía indicativa de la fragilidad del terreno a la erosión, considerando el riesgo de emisión de

Tabla 2.- Erosividad de la lluvia. Factor R (USLE) calculado en estaciones meteorológicas representativas de la Cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca). (Serrat, 1997).

ESTACIÓN	ALTITUD m	COORDENADAS UTM (huso 31)		PERIÓDO	Nº Años	R Mj ha ⁻¹ mm h ⁻¹ año ⁻¹
Argoné	720	284623	4700771	1960/70	11	1968.07
Embalse mediano	504	269433	4688966	196061-1964/66 1968/69-1971 1974/93	28	1765.68
Presa Vilanova	928	292190	4712892	1960/83	23	2468.70
Pont de Montanyana	528	309953	4669074	1961/80	20	1087.81
Seira Central	816	289265	4706002	1960/93	34	2462.16
Pantano Escalles	717	314244	4688005	1964 -1967/72 1974/93	27	1427.01
Pont de Suert	845	313782	4697309	1960/91	32	1663.56
Vilaller	960	311659	4703416	1960/65-1967/91	31	2550.88
Graus	498	281949	4678746	1960/89	30	1285.9

Tabla 3.- Clases de fragilidad del terreno a la erosión según la pendiente y la clase de riesgo de emisión de sedimentos de Fargas (1995). Fragilidad baja $I_{sI_p} \leq 6$, moderada I_{sI_p} de 7 a 12; alta I_{sI_p} de 13 a 18 y muy alta $I_{sI_p} > 19$

PENDIENTE (I_p)		CLASES DE RIESGO DE EMISIÓN DE SEDIMENTOS (I_s)				
		Bajo 1	Moderado 2	Alto 3	Severo 4	Muy severo 5
Llana (<2%)	1	Baja	Baja	Baja	—	—
Suave (2-7 %)	2	Baja	Baja	Baja	Moderada	Moderada
Moderada (7-15 %)	3	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Alta
Fuerte (15-30%)	4	Baja	Moderada	Moderada	Alta	Muy alta
Escarpada (30-45%)	5	Baja	Moderada	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy escarpada (>45 %)	6	Baja	Moderada	Alta	Muy alta	Extrema

Tabla 4.- Clases de Susceptibilidad del terreno a la erosión. Susceptibilidad baja $I_{\alpha I_a} < 5$, moderada $I_{\alpha I_a}$ de 5 a 10 ; alta $I_{\alpha I_a}$ de 10 a 15 y muy alta $I_{\alpha I_a} \geq 15$

FRAGILIDAD DEL TERRENO (I_f)		CLASES DE AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA (I_a) Valor de R en Mj ha ⁻¹ mm h ⁻¹ año ⁻¹			
		Muy baja (< 1500) 1	Baja (1500-2000) 2	Moderada (2000-2500) 3	Alta (>2500) 4
Baja	1	Baja	Baja	Baja	Baja
Moderada	2	Baja	Baja	Moderada	Moderada
Alta	3	Baja	Moderada	Moderada	Alta
Muy alta	4	Baja	Moderada	Alta	Muy alta
Extrema	5	Moderada	Alta	Muy alta	Muy alta

sedimentos y la pendiente, y ii) la susceptibilidad de este terreno según la agresividad de la lluvia en la zona (Figura 3).

i) El grado de **fragilidad del terreno** expresa la incidencia de la morfología del terreno sobre la producción de sedimentos establecida a partir de la densidad de drenaje y la litología (FARGAS, 1995; FARGAS y cols., 1996), de manera que ésta se traduce en un mayor riesgo de erosión en áreas de vertiente por efecto de la pendiente. La fragilidad, por lo tanto, define las áreas más o menos según la fragilidad intrínseca del sustrato (litología), según la facilidad con que la escorrentía superficial moviliza las partículas del suelo (mayor, contra más pendiente) y según la facilidad con que estas partículas son puestas en circulación y transportadas

Tabla 5.- Clases de riesgo de erosión real

Riesgo nulo	Rocas y otras áreas sin suelo
Riesgo bajo	Terrenos con susceptibilidad baja a alta, proteg. por la vegetación
Riesgo moderado	Terrenos susceptibles a la erosión con buena cobertura y terrenos menos protegidos no muy susceptibles
Riesgo alto	Áreas desprovistas de vegetación en terrenos poco susceptibles
Riesgo severo	Áreas desprovistas de vegetación en terrenos susceptibles
Riesgo muy severo	Áreas desprovistas de vegetación en terrenos muy susceptibles

Tabla 6.- Matriz bidimensional para la evaluación del riesgo de erosión real, según el riesgo potencial de y las clases de protección del suelo por la cubierta vegetal

RIESGO DE EROSIÓN POTENCIAL	CLASE DE PROTECCIÓN DEL SUELO					
	1	2	3	4	5	6
Bajo	Nulo	Bajo	Bajo	Moderado	Alto	Alto
Alto	Nulo	Bajo	Bajo	Moderado	Severo	Severo
Severo	Nulo	Bajo	Moderado	Alto	Severo	Muy severo
Muy severo	Nulo	Moderado	Moderado	Severo	Muy severo	Muy severo

por la red de drenaje (densidad de drenaje alta o baja).

La fragilidad del terreno se determina según como se expresa en la Tabla 3. La delimitación de clases se realizó por intervalos regulares, considerando lineal la incidencia en la erosión entre clases de cada factor.

ii) La susceptibilidad del terreno a la erosión expresa la diferente incidencia del efecto de las lluvias de acuerdo con la situación geográfica. Clasifica el territorio de forma que las áreas donde se consideró que se dan lluvias erosivas de forma frecuente (de intensidad superior a los 30 mm h⁻¹) el riesgo de erosión se incrementa. Por el contrario, el riesgo potencial de erosión disminuye en terrenos que son frágiles pero donde el efecto de la lluvia es menor.

Esta susceptibilidad a la erosión se define por integración de las clases de agresividad de la lluvia sobre la fragilidad del terreno expuesta en el apartado anterior (Tabla 4). La delimitación de intervalos se realizó por clases regulares, al igual que en el caso anterior.

El **riesgo potencial de erosión** se definió directamente según esta susceptibilidad a la erosión como: Susceptibilidad baja, Riesgo bajo; Susceptibilidad moderada, Riesgo alto; Susceptibilidad alta, Riesgo severo; Susceptibilidad muy alta, Riesgo muy severo.

b) Riesgo de erosión real

El riesgo real de erosión hídrica de la Cuenca del embalse Joaquín Costa, se obtuvo por modelización cartográfica, incorporando el factor cubierta vegetal al mapa de riesgo potencial de erosión, es decir, se condicionó el grado de protección

Tabla 7.- Superficie y porcentaje de ocupación de las clases de cubierta vegetal, pendiente y agresividad de la lluvia, en la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca)

CLASES DE CUBIERTA VEGETAL		SUPERFICIE (km ²)	% de superficie	
Bosques	Caducifolios	76.94	7.58	
	Coníferas denso	184.53	18.18	
	Coníferas claro	69.71	6.83	
	Encinar	67.65	6.66	
Matorrales	Matorral boscoso de transición	77.69	7.65	
	Matorrales	99.88	9.84	
	Pastizales	33.51	3.30	
Vegetación escasa		62.14	6.12	
Badlands		28.24	2.78	
Cauce de ríos		6.14	0.60	
Áreas agrícolas	Cultivos en secano	35.09	3.45	
	Cultivos en regadío	2.69	0.27	
	Áreas agrícolas heterogéneas	61.57	6.06	
Prados y pastos		86.10	8.95	
Pastos de alta montaña		6.43	0.63	
Afloramientos rocosos (excluidos badlands)		26.09	2.57	
No clasificado		—	8.48	
CLASES DE PENDIENTE		km ²	% de superficie	
Llana		<2%	37.08	3.65
Suave		2 - 7%	138.37	13.63
Moderada		7 - 15%	286.21	28.19
Pendiente		15 - 30%	338.99	33.39
Escarpado		30 - 45%	156.71	15.45
Muy escarpado		>45%	57.90	5.70
CLASES DE AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA		R (Mj mm h ⁻¹ año ⁻¹)	km ²	% de superficie
Muy baja		<1500	40.39	3.98
Baja		1500-2000	190.66	18.78
Moderada		2000-2500	217.99	21.47
Alta		>2500	566.22	55.77

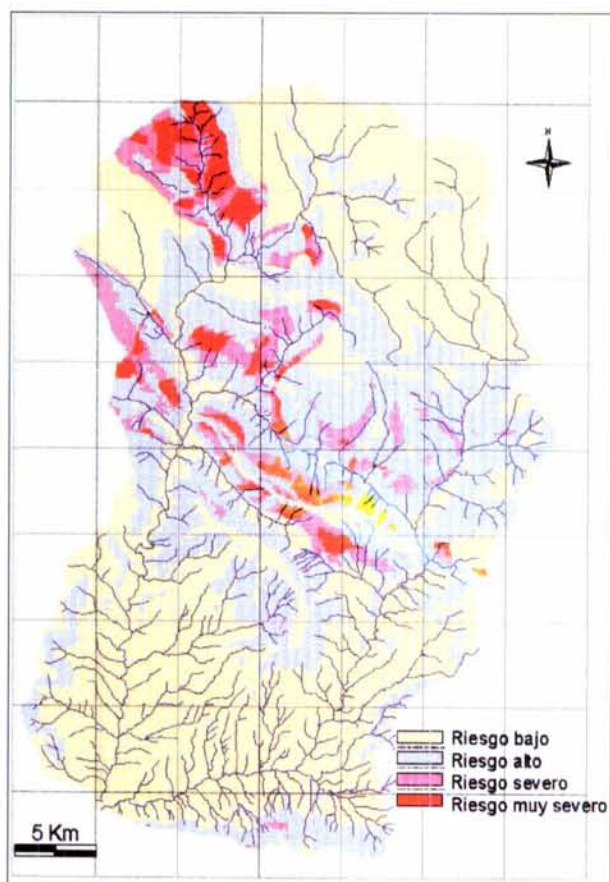


Figura 7.- Mapa de riesgo potencial de erosión, de la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca), obtenido por superposición cartográfica de los factores: pendiente, erosividad de la lluvia y clases de riesgo de emisión de sedimentos

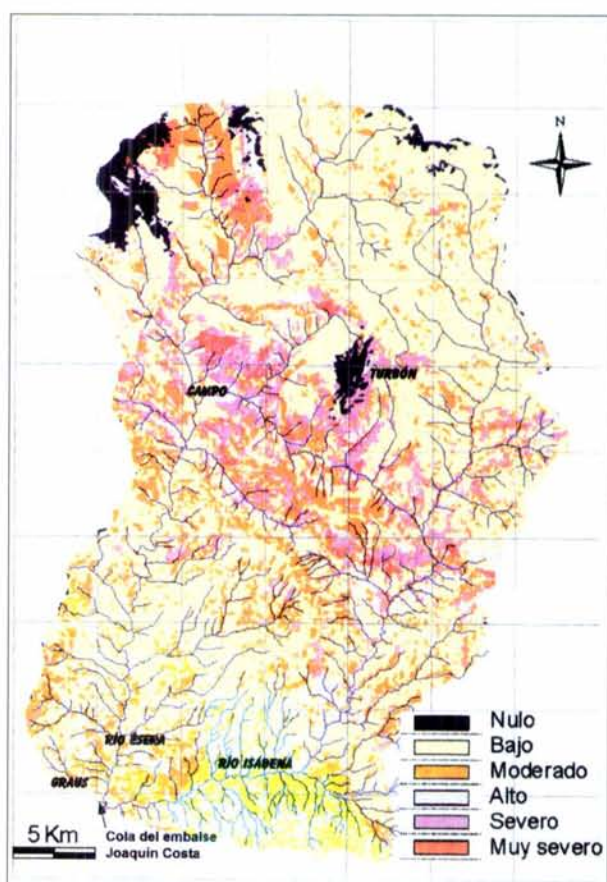


Figura 8.- Mapa de riesgo de erosión real en la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca), obtenido por clasificación por superposición de mapa de riesgo potencial de erosión y el mapa de cubierta vegetal (clases de protección del suelo)

del suelo de las diferentes clases de cubierta cartografiadas a la vulnerabilidad intrínseca del terreno que las sostiene, representada por el riesgo de erosión potencial. Se consideraron seis clases de riesgo (Tabla 5).

En la Tabla 6 se presenta la matriz bidimensional utilizada para la evaluación, donde se confrontan las clases de protección del suelo (Tabla 1) con las clases de riesgo potencial.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización de los principales factores de riesgo se presentan en la Figura 4 (cubierta vegetal y usos del suelo), Figura 5 (agresividad de la lluvia), y Figura 6 (pendiente). De estos resultados, cabe destacar los altos valores de pendiente que se dan en la cuen-

ca (mayoritariamente entre 7-30%), el alto porcentaje de superficie con valores altos del índice de agresividad de la lluvia, pero a su vez el óptimo grado de protección del suelo por parte de la vegetación, particularmente en la zona norte.

Los mapas de riesgo potencial de erosión y riesgo de erosión real se muestran en las Figuras 7 y 8 respectivamente. Las Tablas 7 y 8 incluyen la superficie que cada clase representa en los mapas finales.

Según estos resultados, el 46,5% del área estudiada (471 km² de 1014 km²) tiene un riesgo de erosión potencial calificado como alto o más. Las áreas de mayor riesgo se localizan en la mitad norte: cabecera de los barrancos de Comallitera, Barbaruense, Gabás, Bacamorta, La Espluga, Llierp, Villacarlí y Viu. Estas áreas se caracterizan por una elevada pendiente y materiales litológicos muy susceptibles de ser

erosionados (margas). En estas zonas la existencia de vegetación se considera crítica de cara a la protección del suelo.

La incorporación de la información sobre la cubierta vegetal al proceso de evaluación del riesgo de erosión modifica substancialmente estos resultados. El riesgo, según la vegetación actual, disminuye de manera generalizada en todo el área y, particularmente, en las áreas forestales. Esto indica que cualquier acción sobre la vegetación en la cuenca del embalse tendrá una repercusión importante en la tasa de erosión y por tanto en la colmatación del vaso por sedimentos. Esta repercusión será especialmente grave en las áreas con margas, donde la acción de los procesos erosivos derivará en la formación de badlands (con altas tasas de producción de sedimentos).

Tabla 8.- Superficie y porcentaje de ocupación de las clases del riesgo potencial de erosión y riesgo de erosión real, en la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca)

CLASES DE RIESGO POTENCIAL DE EROSIÓN	km ²	% de superficie
Bajo	542.17	53.49
Alto	357.49	35.27
Severo	75.34	7.43
Muy severo	38.7	3.81
CLASES DE RIESGO REAL DE EROSIÓN	km ²	% de superficie
Nula	27.40	2.70
Baja	602.75	59.37
Moderada	167.49	16.50
Alta	108.16	10.65
Severa	95.97	9.45
Muy severa	13.55	1.33

Actualmente, las áreas con mayor riesgo de erosión se localizan en las zonas de badlands. Estas zonas, aunque suponen aproximadamente un 3% de la superficie total estudiada, están directamente conectadas a los cauces principales de la red de drenaje, los ríos Ésera e Isábena, lo que asegura un rápido transporte de los sedimentos generados al embalse. Además, estas áreas se localizan aguas arriba del proyectado embalse de Santa Liestra, lo que invita al diseño y construcción de medidas de conservación para evitar, por lo menos a medio plazo, los problemas de colmatación que sufre el embalse Joaquín Costa.

CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología para la cartografía del riesgo de erosión hídrica en grandes cuencas hidrográficas. Esta metodología hace uso de técnicas de la información (teledetección y Sistemas de Información Geográfica), para la adquisición de información del territorio y su análisis.

La aplicación de esta metodología al análisis de la cuenca del embalse Joaquín Costa (Huesca), ha servido para localizar las áreas de mayor riesgo de erosión hídrica. También, se ha puesto de manifiesto el papel fundamental de la cubierta vegetal en la reducción del riesgo potencial de erosión que presenta la cuenca.

La litología de los materiales, junto con la pendiente, son los factores intrínsecos del terreno que más contribuyen en el área a un alto riesgo potencial de erosión.

Otro de los hechos puestos de manifiesto es la localización de las áreas con mayor riesgo de erosión potencial y real respecto al proyectado embalse de Santa Liestra. Esto debería inducir a las autoridades hidráulicas a estudiar y aplicar medidas de conservación, especialmente en las zonas de badlands, para evitar que se repita a medio plazo la colmatación ocurrida en el embalse Joaquín Costa.

Como limitación del estudio, cabe destacar que los resultados obtenidos son fruto de una necesaria simplificación de las variables que intervienen en los procesos de erosión hídrica, especialmente tratándose de una escala de reconocimiento. También, el hecho de que el modelo se base en conocimiento experto de los procesos erosivos y factores determinantes de la erosión hace que los resultados no estén exentos de subjetividad. ■

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del Laboratorio de SIG y Teledetección del Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lleida, donde se han llevado a cabo los trabajos de gabinete del presente estudio. A la Dra. Rosa

M. Poch, profesora de Hidrología y Conservación de Suelos del citado Departamento, por sus consejos durante la realización del estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMOROX, J.; R.A. GARCÍA; A. SAA; M.C. DÍAZ y J.M. GASCÓ, 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid.

CERVERA, T., 1995. *Cartografia d'erosió per escorrancs i barrancs en una àrea a l'Alt Penedès-Anoia mitjançant tècniques de teledetecció*. Proyecto Final de Carrera. ETSEA-Universitat de Lleida, Lleida.

CHAVEZ, P.S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 24, pp. 459-479.

CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de teledetección espacial. 3ª Edición revisada*. Ediciones Rialp, S.A., Madrid.

FARGAS D., 1995. *Identificació de les àrees crítiques d'emissió de sediments a la conca de l'embassament Joaquín Costa (Barasona, Osca)*. Projecte Final de Carrera, ETSEA-Universitat de Lleida.

FARGAS, D.; J.A. MARTÍNEZ-CASASNOVAS; R. POCH, 1997. Identification of critical sediment source areas at regional level. XXI General Assambly of the European Geophysical Society, The Hague, 6-10 Mayo 1996. *Journal of Physics & Chemistry of the Earth*, 22 (3-4): 355-359.

ICONA, 1988. *Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo*. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. y T. CERVERA, 1996. Gully erosion mapping by remote sensing techniques. A case study in the Anoia-Penedès region (NE Spain). *Proceedings del Primer Congreso Europeo sobre le Control de la Erosión*. Sitges, Barcelona. (En prensa).

SERRAT N., 1997. *Cartografia del risc d'erosió hídrica a la Conca de l'Embassament 'Joaquín Costa' (Osca), mitjançant tècniques de teledetecció i SIG*. Proyecto Final de Carrera, ETSEA-Universitat de Lleida.