

EROSIÓN POR CÁRCAVAS Y BARRANCOS EN EL ÁREA DE VIÑA DEL ALT PENEDEÈS-ANOIA (NE ESPAÑA)

J. A. MARTÍNEZ-CASASNOVAS y M. CONCEPCIÓN RAMOS

Universidad de Lleida, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo
Av. Rovira Roure 191, 25198 Lleida (España)

correo electrónico de contacto: j.martinez@maes.udl.es

RESUMEN. *La presente investigación analiza los procesos de erosión por cárcavas y barrancos en un área de las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia (Barcelona) a escalas semidetallada y detallada, desarrollando y aplicando metodologías basadas en el uso de tecnologías de la información geográfica (Sistemas de Información Geográfica y Teledetección). El área se localiza en la Depresión del Vallès-Penedès, donde afloran sedimentos continentales y marinos Miocenos poco consolidados, sobre los que se ha desarrollado una densa y profunda red de drenaje. Los métodos desarrollados han permitido la localización de la ocurrencia de estos procesos erosivos a escala regional y la determinación de las tasas de erosión en barrancos en un área modelo. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos, habitualmente menos estudiados que otros procesos erosivos. Así, el 15,2% de esta región ha sido afectada por la erosión por los barrancos, existiendo unidades de paisaje donde la disección alcanza el 31,9% de la superficie. Los barrancos son actualmente activos, habiéndose medido tasas medias anuales de erosión $576 \pm 58 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo cual indica la importancia de los procesos de erosión por barrancos en la generación de sedimentos en el área de estudio.*

ABSTRACT. *The present research analyzes gully erosion processes in an area of the Alt Penedès and Anoia regions (Barcelona) at semi-detailed and detailed scales. For that, information technology methods (Geographic Information Systems and Remote Sensing) are developed and applied. The study area is located in the Vallès-Penedès Depression, where unconsolidated continental and marine Miocene deposits outcrop with a dense and deep gully network. The methods have allowed the location of gully erosion at regional scale and the determination of gully erosion rates in a sample area. The results reveal the importance of gully erosion, usually less studied than other erosion processes. The 15.2% of the region has been affected by gullies, with landscape units where the dissection reaches 31.9%. Gullies are active at present, with annual average rates of $576 \pm 58 \text{ Mg}$*

ha⁻¹ year⁻¹, which indicates the importance of gully erosion processes in the production of sediments in the study area.

Palabras clave: Erosión por barrancos, viña, SIG

Key words: Gully erosion, vineyards, GIS

Enviado el 15 de septiembre de 2008

Aceptado el 12 de noviembre de 2008

1. Introducción

Dentro del área mediterránea del NE de España, una de las zonas de mayor tradición en el cultivo de la viña es la constituida por las comarcas de l'Alt Penedès y l'Anoia (Barcelona) (Figura 1). El cultivo de la viña tiene una tradición muy antigua en el Penedès. Desde el siglo XVI se tiene constancia de contratos de naturaleza temporal para el cultivo de la viña (*Rabassa Morta*), que tenían por objeto la cesión de una tierra a un agricultor para que *la desbrozase y la plantase de viña, cultivándola según el uso y la buena costumbre* hasta el final de la vida productiva de la viña (Balcells, 1980). El aumento de la presión demográfica y de la exportación de vinos a Europa y América durante el siglo XVIII hizo aumentar de forma considerable la superficie dedicada a la viña, al amparo de estos contratos. Así, la superficie de la viña en Cataluña alcanzó su máxima extensión a finales del siglo XIX, con 385.000 ha, con un aumento de 100.000 ha entre 1873 y 1888 por la destrucción de viñas en Francia por la filoxera, que más tarde afectaría a la vid en Cataluña (Balcells, 1980). Desde entonces, la superficie de viña en Cataluña ha ido disminuyendo. Entre los años 1970 y 2003, con 118.379 ha y 66.703 ha respectivamente, la superficie disminuyó en un 43,6%. Esta reducción, no obstante, ha venido acompañada de una mayor tecnificación del cultivo y cualificación de la producción. En concreto, en la Denominación de Origen Penedès, la superficie de viña acogida aumentó un 56% entre 1970 y 1994, siendo en la actualidad (campaña 2005/06) de 25.512 ha.

La mayor tecnificación de la producción vitícola, llevada a cabo a partir de las décadas de 1960 y 1970, no ha conllevado sin embargo una preocupación por la conservación del recurso suelo, consecuente con una sostenibilidad de los usos actuales. La tecnificación ha supuesto en la práctica el rediseño de la mayoría de las plantaciones de viña y la desaparición de muchas de las medidas tradicionales de conservación de suelos. Esto ha reactivado los diferentes tipos de procesos erosivos, incrementándose las pérdidas de suelos.

A escala de parcela, los procesos de erosión más comunes en esta área de estudio son la erosión por salpicadura, la erosión laminar difusa y la erosión por escorrentía superficial concentrada. En diversos trabajos previos realizados en esta zona se han estimado pérdidas de suelo debidas a procesos de erosión laminar y por arroyaderos superiores a 12 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (López, 1994). Porta y Ramos (1995) calcularon pérdidas medias en plantaciones tradicionales de viña de 11 Mg ha⁻¹ año⁻¹, y pérdidas de hasta

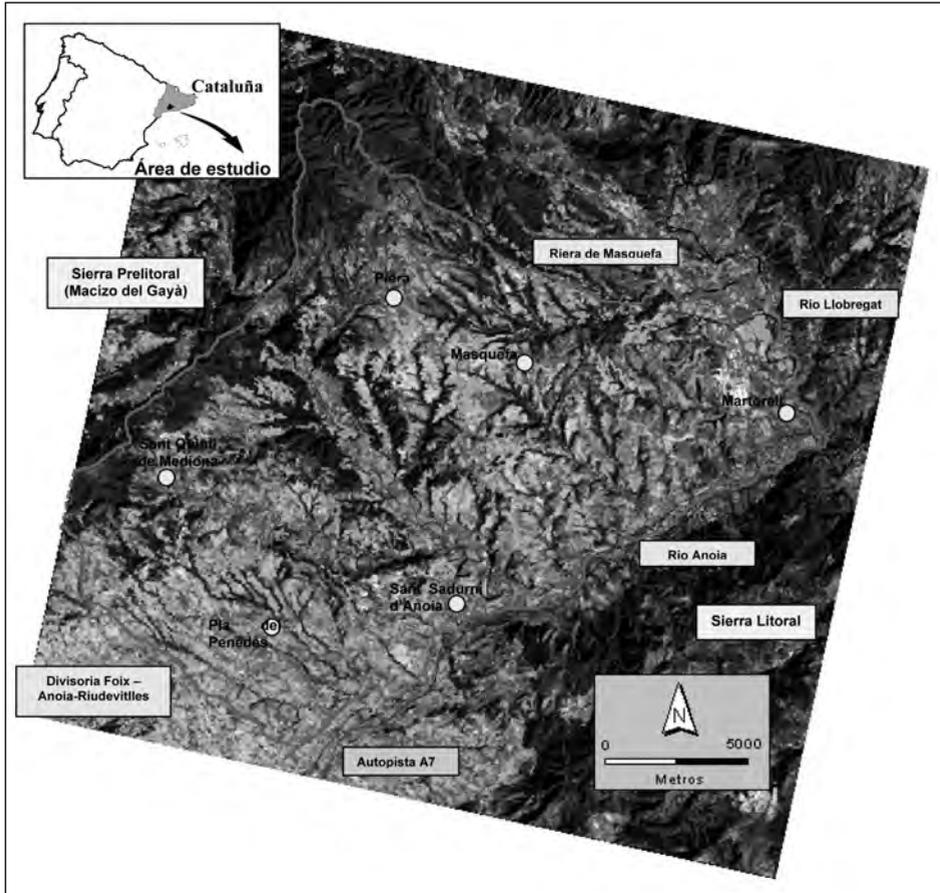


Figura 1. Localización del área de estudio (Imagen Landsat 5 TM)

100 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en plantaciones modernas. También, Ramos y Porta (1997) midieron pérdidas en parcelas de viña de 18-22 Mg ha⁻¹ año⁻¹ causadas por la incisión de surcos en el periodo septiembre-noviembre; y Usón (1998) midió pérdidas de 22 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en una parcela experimental tipo USLE (Universal Soil Loss Equation, Wischmeier y Smith, 1978). Estos valores reafirman los encontrados por otros investigadores en la región Mediterránea, que indican que la viña es uno de los cultivos que mayores pérdidas de suelos producen: 47-70 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en NO Italia (Tropeano, 1983), 35 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en Mid Aisne (Francia) (Wicherek, 1991), 34 Mg ha⁻¹ en un evento de precipitación extrema en el SE Francia (Wainwright, 1996). Esto sin contar con la erosión producida por otros procesos como el desarrollo de cárcavas o barrancos, que pueden significar hasta el 44-80% de las pérdidas totales producidas en una parcela (Poesen y Hooke, 1997), ni cuantificar otro tipo de pérdidas o daños como las pérdidas de nutrientes o daños en infraestructuras.

A escala regional el rasgo fundamental del Alt Penedès-Anoia es la incisión de una densa y profunda red de cárcavas y barrancos excavada en los materiales litológicos poco coherentes que afloran en la depresión (lutitas miocenas con paleocanales de gravas sin cementar), hecho que destaca tanto en la observación de campo como de imágenes de teledetección (Figura 1). Una de las consecuencias más graves de este tipo de procesos erosivos es la disección de las parcelas, que conlleva la dificultad para el tránsito de la maquinaria y la pérdida de superficie agrícola útil (Boixadera, 1983; Porta *et al.*, 1994).

Sin embargo, al igual que ha ocurrido en otras áreas de estudio, donde la investigación de la erosión se ha centrado principalmente en estudiar los procesos de erosión laminar y por surcos (Poesen *et al.*, 1998, 2006), en el Alt Penedès-Anoia no se dispone a priori de información de cual es la afectación a escala regional de estos fenómenos erosivos ni las tasas de erosión. Lo que sí se conoce es que la erosión en esta región viene condicionada por procesos tectónicos que han tenido lugar a escala regional (Gallart, 1981), estando determinada en la actualidad por la fuerte influencia de la actividad humana, especialmente por la gran extensión de los cultivos como la viña y por el abandono de las medidas tradicionales de conservación de suelos.

En este contexto, la finalidad del presente trabajo es analizar los procesos de erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès-Anoia (Barcelona) a escalas semidetallada y detallada, desarrollando y aplicando metodologías basadas en el uso de tecnologías de la información geográfica. Estas metodologías, además de ofrecer información sobre la localización de este tipo de procesos erosivos, servirán para determinar las tasas de erosión.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización y características del área de estudio

La presente investigación se ha llevado a cabo, a escala semidetallada, en un área de 30.000 hectáreas, localizadas en las comarcas de l'Alt Penedès y de l'Anoia, en la provincia de Barcelona (Figura 1). Los límites naturales del área de estudio son: Oeste y Noroeste: Sierra Prelitoral (Macizo del Gayà); Norte: divisoria de la riera de Masquefa; Este: río Llobregat; Sur y Sudeste: divisoria de la cuenca del sistema Anoia-Riudevilles y de la cuenca del río Foix, arroyo de l'Avernó y río Anoia (en la zona del escarpe de la falla Martorell-Gelida). A escala detallada, la investigación sobre las tasas de erosión por barrancos se ha llevado a cabo en un área modelo localizada en la cabecera de la cuenda de la riera Rierussa, justo al sur de la población de Masquefa.

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se localiza en la Depresión del Vallès-Penedès, a la cual se le atribuye una edad aproximada de entre 25 a 2 millones de años, Oligocena a Neógena superior (Arthaud *et al.*, 1977 en Cabrera, 1981). Las fracturas más importantes que limitan la depresión tienen una orientación SW-NE (límites con la Sierra Prelitoral y con la Sierra Litoral). Otras fracturas atraviesan también la fosa de NW a SE (fallas de Capellades-Vallcarca y del Llobregat), habiendo definido en ella

tres dominios sedimentarios diferentes: Vallès, Alt Penedès y Baix Penedès. Los hundimientos diferenciales de estas fallas han condicionado la sedimentación detrítica continental en la depresión. El rasgo fundamental del relieve es el predominio de la erosión y la incisión de la red de drenaje. El relieve en la zona al norte del Río Anoia es significativamente más pronunciado que hacia el sur.

Los depósitos donde se excavan los barrancos están compuestos principalmente por lutitas, con una densidad aparente de $1,80 \pm 0,12 \text{ Mg m}^{-3}$ y textura franca a franco arenosa (Martínez-Casasnovas, 1998; Usón, 1998; Nacci, 2001). El contenido medio de carbonato cálcico es de $36,7 \pm 13,1\%$, la conductividad eléctrica es $CE_{1:5} = 0,19 \pm 0,1 \text{ dS m}^{-1}$ y tienen un SAR (Sodium Adsorption Ratio)¹ muy bajo ($0,37 \pm 0,15$), lo cual indica que se trata de lutitas no dispersivas Faulkner *et al.* (2000).

Desde un punto climático, el área de estudio tiene un clima Mediterráneo, con una temperatura media anual de 15° C y una precipitación media anual entorno a los 660 mm, si bien existe una importante variabilidad interanual de las lluvias (Ramos y Porta, 1994). El máximo de precipitación se registra durante los meses de otoño. Tormentas de elevada intensidad ($>100 \text{ mm h}^{-1}$) en periodos cortos son habituales en la zona (Ramos y Porta, 1994; Usón, 1998). La lluvia es el principal agente erosivo en el área de estudio. Varios estudios realizados en esta zona (Ramos y Porta, 1994; Usón, 1998) han concluido que el valor anual del factor de erosividad de la lluvia (R), que varía entre 1049 y $1200 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1} \text{ año}^{-1}$, no se distribuye homogéneamente a lo largo del año, sino que tiene un máximo absoluto en los meses de septiembre-octubre y otro máximo relativo en abril-mayo.

En cuanto a los suelos, los dos principales subgrupos de suelos descritos en el área de estudio son los *Calcixerepts típicos* y los *Xerorthents típicos* (Soil Survey Staff, 1998). También son frecuentes los *Haploxerepts fluvénticos*, que presentan endopedionnes cálcicos, y los *Calcixerepts petrocálcicos*. Destaca la frecuencia de suelos con mineralogía carbonática, lo cual indica la intensidad de los procesos de calcificación en los suelos del área de estudio. Muchos de estos suelos presentan evidencias de truncamiento de los horizontes superficiales, signo de la ocurrencia de procesos de erosión hídrica. Estas evidencias indican un punto de inflexión en el proceso evolutivo de estos suelos, ligado a la dinámica denudacional. El régimen de humedad de los suelos es xérico y el régimen de temperatura es térmico.

El uso del suelo predominante en el área de estudio del Alt Penedès-Anoia es el cultivo de viña: 10.220 ha en 2002 (fuente: Mapa de Usos del Suelo de Cataluña año 2002, Institut Cartogràfic de Catalunya). Este cultivo se dedica a la producción de vinos de alta calidad y cavas bajo las normas de regulación de las denominaciones de Origen Penedès y Cava, respectivamente. La superficie dedicada a la viña se ha incrementado durante la última década en un 10% gracias a las ayudas de la Unión Europea a la reestructuración

1. $SAR = [Na] / ([Ca + Mg] / 2)^{0.5}$ (Cationes como $\text{mmol}_c \cdot \text{l}^{-1}$).

y reconversión del cultivo (Directivas Europeas EC N° 1493/1999 de creación del mercado común del vino, y EC N° 1227/2000, de regulación del potencial productivo de la viña). El siguiente cultivo mayoritario son los cereales de invierno (herbáceos de secano) (1.350 ha), que constituyen la actual alternancia a la viña. Las zonas forestales, bosques mixtos de *Pinus halepensis* y *Quercus ilex*, y matorrales boscosos, suponen 10.174 ha, donde se incluyen las zonas de montaña y las paredes de barranco vegetadas. El resto del área está ocupada por áreas urbanas e industriales, vías de comunicación y otros usos agrícolas de menor importancia, y suelos con vegetación escasa o nula.

2.2. Cartografía de las áreas afectadas por barrancos a escala regional

El enfoque metodológico empleado en la presente investigación se ha realizado a diferentes escalas: cartografía y nivel de afección de la erosión por barrancos a escala regional (semidetallada 1:50.000), y determinación de las tasas de erosión a escala detallada (1:1.000).

A escala regional, la extensión del área afectada por barrancos fue determinada a partir de fotografías aéreas verticales con solape estereoscópico del año 1993 (escala aproximada 1:30.000) producidas por el Instituto Cartográfico de Cataluña. Estas fotografías fueron visualizadas a través de un estereoscopio de espejos modelo Topcom, delineando el perímetro de los barrancos a lo largo de las líneas de ruptura convexa que marcan la incisión de los barrancos en los depósitos Miocenos de la Depresión del Penedès. El resultado fue georeferenciado en un ortofotomapa 1:50.000, producido por el anterior instituto y digitalizado como una cobertura de polígonos en el Sistema de Información Geográfica ArcInfo™ (ESRI). Estas líneas fueron validadas por las rupturas de pendiente resultantes de aplicar la función SLOPE de ArcInfo a un modelo digital de elevaciones en formato de malla regular (raster) de 25 x 25 m producido por el Servicio Geográfico del Ejército.

El análisis del área afectada por la erosión por barrancos se refirió a las unidades de relieve identificadas por Martínez-Casasnovas (1998), que se basó en el sistema de clasificación jerárquica propuesto por Zinck (1988). Estas unidades son: Área de montaña (Sierra Prelitoral), Área de pie de monte, Área de vertientes y barrancos (al norte del río Anoia), Área de relieve suavemente ondulado (Pla del Penedès) y Área de niveles aluviales recientes.

2.3. Tasas de erosión por barrancos: retroceso y producción de sedimentos

El análisis anterior sirvió para identificar un área modelo para la determinación, a escala detallada (1:1.000), de las tasas actuales de erosión por barrancos. Se consideró el periodo 1975-1995, para el que existían fotografías aéreas suficientemente detalladas del Instituto Cartográfico de Cataluña (1:7.000 y 1:5.000 respectivamente). El análisis se centró en la cabecera de la cuenca de la riera Rierussa. Esta riera tiene una cuenca de 25 km² y se localiza en la zona de Gelida-Sant Llorenç d'Hortons-Masquefa (Barcelo-

na). En este sistema de barrancos un trabajo previo de Martínez-Casasnovas (1998) comprobó que los barrancos de la parte alta de la cuenca son unos de los más activos del Alt Penedès-Anoia, con tasas de incisión medias de 0,7-0,8 m año⁻¹. La cabecera de la cuenca seleccionada tiene un área de 0,688 km², con un 14,5% de la superficie afectada por barrancos. La pendiente media de esta área, excepto en las paredes de los barrancos, es de 5-9°. La profundidad de los barrancos varía entre 20-32 m, con una pendiente media de las paredes de 41±14,2° (máximo 78°).

Para el cálculo de la tasa de retroceso de las paredes de los barrancos se llevó a cabo, para cada fecha, la delineación del perímetro de los barrancos según la metodología expuesta en el apartado 2.2. El resultado fue restituído mediante técnicas fotogramétricas. La escala de restitución fue 1:1.000. Los errores de posicionamiento de los límites de los barrancos generados en el proceso de restitución fueron de ±0,015 m en XY y de ±0,07 m en Z. Estos errores están dentro de la tolerancia admitida para producir una cartografía 1:1.000 (±0,20 m en XY y ±0,30 m en Z).

Las tasas de producción de sedimentos fueron calculadas a partir de una metodología introducida por Martínez-Casasnovas (1998, 2003), basada en la sustracción de modelos digitales de elevaciones (MDE) de diferentes fechas en formato de malla regular (raster). Estos MDE para los años 1975 y 1995 se construyeron a partir de las curvas de nivel (intervalo 1 m), cotas, líneas de ruptura de pendiente y líneas de suelo generadas a partir de la restitución fotogramétrica de los pares estereoscópicos de ambas fechas. La malla regular de cotas, con una resolución planimétrica de 1 m y altimétrica de 0,01 m, se generó a partir de una triangulación (TIN) y posterior interpolación a raster utilizando la herramienta 3D Analyst del SIG ArcView 3.2 (ESRI). Posteriormente se procedió a la sustracción de los MDE (1995-1975), que produjo una nueva malla de datos con las diferencias de altitud en cada punto de la malla de 1 x 1 m. A partir de aquí se establecieron las zonas con erosión y sedimentación ocurrida en los barrancos. Siguiendo el criterio de DeRose *et al.* (1998), la fiabilidad de la estimación en el cálculo de las diferencias se estableció en el 95% del intervalo de confianza (X±2SD), donde X es la media de las diferencias en las áreas de control establecidas para la calibración de los modelos y SD es la desviación estándar de las diferentes medias de las áreas de control.

La tasa de producción de sedimentos fue calculada según la Ecuación 1. A partir de las diferencias de elevación (ED), los valores resultantes se interpretaron de la siguiente manera: un valor negativo de la diferencia significa incisión del cauce, un valor positivo significa sedimentación y un valor próximo a 0 (±0,3 m) se consideró como sin cambios o cambio no significativo.

$$SPR = \frac{GR^2 \cdot BDm \cdot \sum EDn}{A \cdot T} \quad (1)$$

Donde: SPR = Tasa de producción de sedimentos (Mg ha⁻¹ año⁻¹); GR = Resolución de la malla o raster (m) (1 m en el caso de estudio); BDm = Densidad aparente de los materiales Mg m⁻³ (1,80 Mg m⁻³); EDn = Suma de las diferencias de elevación negativas (m); A = Área de los barrancos (ha); T = Tiempo del periodo de estudio (años).

No todos los sedimentos producidos por la erosión en los barrancos son exportados fuera de la cuenca. Parte se deposita dentro del área de barrancos. Para el cálculo de la tasa de sedimentación (Ecuación 2) se consideró una densidad aparente de $1,40 \pm 0,10 \text{ Mg m}^{-3}$, calculada a partir de 5 muestras de sedimentos adquiridas mediante cilindros en la parte baja de las paredes y en la zona del cauce de los barrancos.

$$SDpR = \frac{GR^2 \cdot BDd \cdot \sum EDp}{A \cdot T} \quad (2)$$

Donde: SDpR = Tasa de sedimentación ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$); GR = Resolución de la malla o raster (m) (1 m); BDd = Densidad aparente de los materiales depositados Mg m^{-3} ; EDp = Suma de las diferencias de elevación positivas dentro de los barrancos (m); A = Área de los barrancos (ha); T = Tiempo del periodo de estudio (años).

La tasa media anual de exportación de sedimentos fuera de la cuenca de los barrancos también fue calculada (Ecuación 3).

$$SDRg = \frac{SPR - SDpR}{SPR} \quad (3)$$

Finalmente, la resta de las tasas SPR y SDpR da como resultado la tasa neta de erosión en los barrancos.

2.4. Características de las lluvias

Las características de las lluvias fueron analizadas para el periodo 1975-1995, en el que se realizó el cálculo de las tasas de retroceso y producción de sedimentos en los barrancos. Los datos analizados fueron los del observatorio de Sant Sadurn d'Anoia (Instituto Nacional de Meteorología), estudiándose las lluvias diarias y la media anual de la lluvia en el periodo. Los años del periodo se clasificaron en húmedos, normales o secos de acuerdo a los percentiles 0,9, 0,5 y 0,25 respectivamente según los históricos del área durante el siglo XX (Ramos, 2001).

3. Resultados y discusión

3.1. Grado de afectación de la erosión por barrancos a escala regional

La Figura 2 y Tabla 1 la muestran los resultados del análisis de la afectación de la erosión por barrancos a escala regional referida a las unidades de paisaje identificadas en el área de estudio por Martínez-Casasnovas (1998). De acuerdo a estos resultados, la zona norte del Glacis-Piedemonte es la unidad más afectada por la erosión por barrancos, con el 31,9% del área afectada. Este valor puede considerarse como erosión severa o muy severa (Stroosnijder y Eppink, 1993). El volumen erosionado respecto a la superficie de la unidad es de $3 \text{ hm}^3 \text{ km}^{-2}$. Estas cifras son considerablemente inferiores a las

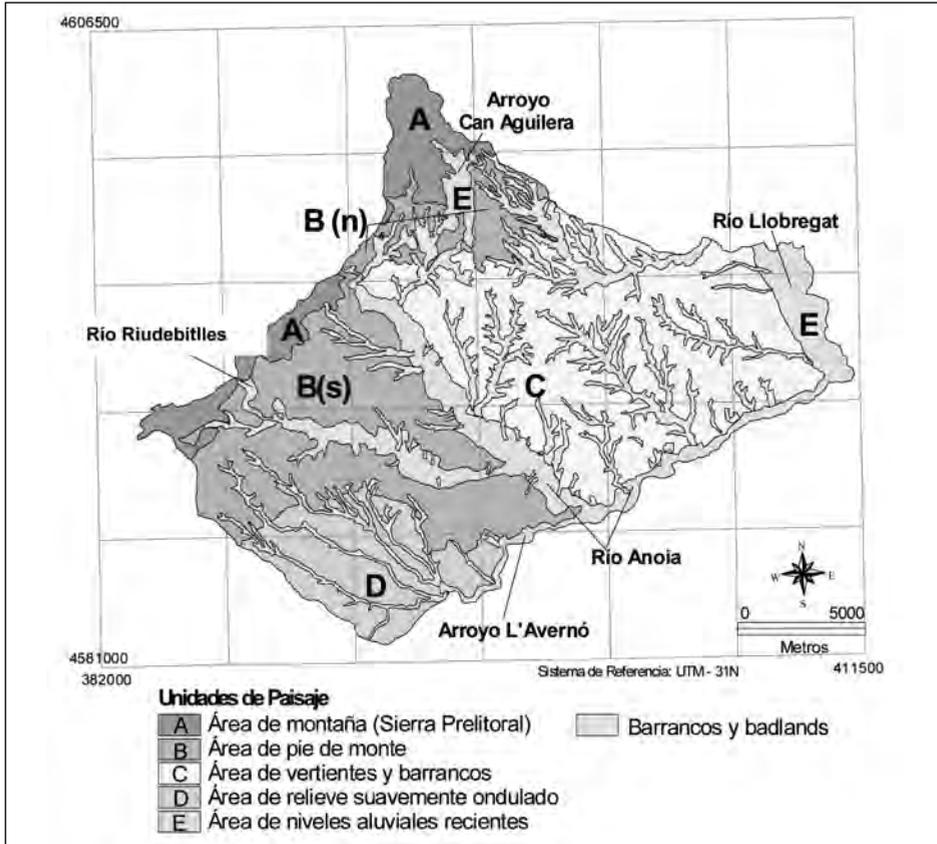


Figura 2. Grado de afectación de la erosión por barrancos a escala regional en el área del Alt Penedès-Anoia. Los barrancos aparecen delineados sobre las unidades de paisaje del área de estudio obtenidas por Martínez-Casasnovas (1998). (Bn indica zona norte de la unidad de paisaje B, y Bs indica zona sur de la unidad de paisaje B)

de la zona sur de la unidad, con tasas de 7,8% y 0,8 $\text{hm}^3 \text{km}^{-2}$ respectivamente. Las diferencias estriban en el control que ejercen los materiales más consolidados de la zona sur de la unidad sobre el desarrollo de los barrancos. No obstante, existen algunos barrancos que conectan las plataformas de conglomerados con los fondos de valle.

La unidad de Glacis altamente disectado, que conecta con la zona norte del Glacis-Piedemonte, está también muy afectada por la erosión por barrancos. Los grandes barrancos ocupan el 23,2% de la unidad, con barrancos de hasta 60 m de profundidad. La unidad presenta la segunda tasa más elevada de volumen erosionado 2,8 $\text{hm}^3 \text{km}^{-2}$. Las otras unidades de paisaje presentan niveles de afectación menores. Así, la unidad de Glacis poco disectado presenta un porcentaje de afectación del 17,0%. El volumen erosionado también es menor que en la unidad de Glacis altamente disectado. En esta uni-

Tabla 1. Área afectada y volumen (estimado) por la erosión por barrancos en el Alt Penedès-Anoia

Unidad de paisaje	Área de la unidad km ²	Área afectada por los barrancos km ² (y % con respecto al total de la unidad)	Volumen erosionado estimado hm ³ (y profundidad máxima de los barrancos m)
A. Montañas de la Sierra Prelitoral	21,52	0	0
B. Glacis-Piedemonte			
- Zona norte	17,55	5,60 (31,9%)	52,7 (43)
- Zona sur	66,31	5,19 (7,8%)	52,1 (45)
- Total unidad	83,86	10,79 (12,8%)	104,8
C. Glacis altamente disectado	114,54	27,17 (23,2%)	326,6 (60)
D. Glacis poco disectado	33,51	5,70 (17,0%)	28,7 (30)
E. Valles aluviales	39,82	0,94 (2,3%)	6,2 (45)
Total área de estudio	293,26	44,60 (15,2%)	466,4

dad (Glacis poco disectado), los barrancos desarrollados son realmente arroyos que han excavado trincheras en sedimentos recientes de fondo de valle. También son característicos de esta unidad los fondos de valle llanos, que constituyen actualmente las vías de expansión de las cárcavas y barrancos en la unidad. Los valles de los ríos (unidad de paisaje Valles aluviales) también presentan incipientes problemas de erosión por barrancos, que disectan las terrazas de los ríos Riudevittles y Anoia.

Aunque estos valores son indicativos de la erosión pasada, en la presente investigación deben también considerarse como indicativos del riesgo de erosión actual ya que evidencias en campo que muestran dicha actividad en las diferentes áreas estudiadas.

3.2. Tasas de erosión por barrancos: retroceso y producción de sedimentos

El análisis anterior muestra el grado de afección a escala regional de la erosión por barrancos, poniendo de manifiesto la erosión producida en las diferentes unidades de paisaje identificadas. El análisis no muestra, sin embargo, las tasas de erosión actual: retroceso de las paredes y producción y exportación de sedimentos, que es analizado en esta sección. El área de estudio se circunscribe a un área modelo correspondiente a una cabecera de un sistema de barrancos de la unidad de paisaje Glacis altamente disectado.

La precipitación media anual del periodo analizado fue de 529±160 mm. El periodo fue normal-húmedo, con 11 años sobre 20 con lluvias entre 615-659 mm. Se registraron 199 lluvias (9,3%) erosivas, siendo la máxima registrada de 95 mm. La intensidad media de las lluvias fue de 12-45 mm h⁻¹.

La Tabla 2 muestra la matriz de contingencia de las áreas afectadas por barrancos en el periodo de estudio 1975-1995, como resultado de la tabulación cruzada entre las coberturas con los límites de los barrancos en las dos fechas. La Figura 3 muestra gráficamente el resultado de la superposición de los límites del sistema de barrancos las fechas consideradas y las áreas de retroceso y relleno.

Tabla 2. Matriz de contingencia de las áreas erosionadas en 1975 y 1995 en la cabecera de la riera Rierussa (Fontsanta).

Año 1975 (ha)			
Año 1995 (ha)	Áreas afectadas por barrancos	Áreas no afectadas	Total (año 1995)
Áreas afectadas por barrancos	9,58	0,46 ⁽¹⁾	10,04
Áreas no afectadas	1,06 ⁽²⁾	57,78	58,84
Total (año 1975)	10,64	58,24	68,88

⁽¹⁾ Área erosionada en el periodo 1975 - 1995; ⁽²⁾ Área de barrancos rellenada en el periodo 1975-1995.

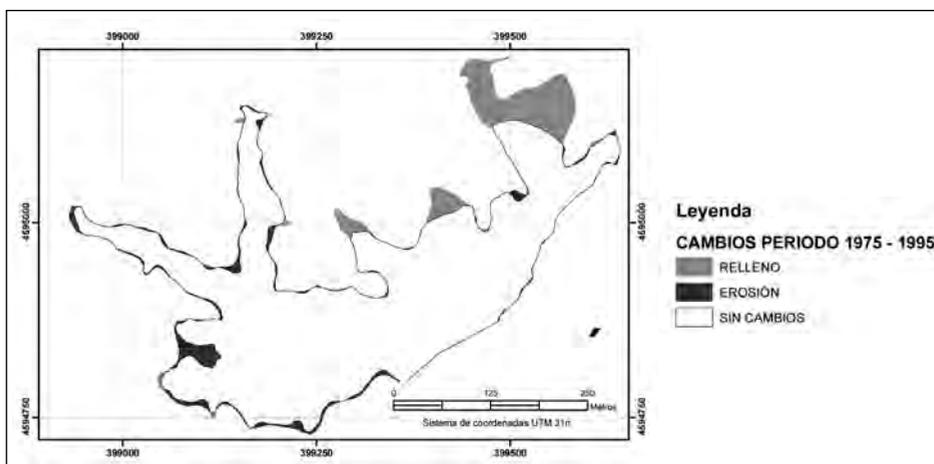


Figura 3. Retroceso y relleno de los barrancos de la cabecera de la riera Rierussa en el periodo 1975-1995

De la Tabla 2 se deduce que el área afectada por los barrancos fue respectivamente de 10,64 y 10,4 ha respectivamente en 1975 y 1995, lo cual puede parecer erróneo en una primera interpretación. Esta aparente disminución del área afectada es debida al relleno de parte de algunos barrancos para creación de nuevas plantaciones de viña (práctica común en el área de estudio). El área erosionada entre 1975 y 1995 fue de 0,46 ha (de las 68,8 ha de la cuenca), es decir el 0,7% de la cuenca. Esto representa una tasa anual de erosión de $0,023 \text{ ha año}^{-1}$ o una tasa de retroceso lineal de $0,08 \text{ m año}^{-1}$. Estas tasas son tasas por defecto, ya que las áreas erosionadas y rellenadas en el periodo no han podido ser evaluadas. No obstante, son similares a las encontradas por otros investigadores (Vandekerckhove *et al.*, 2001). El retroceso no es uniforme a lo largo del perímetro. La erosión en las paredes lateral parece más importante que el retroceso de la cabecera, aunque esto puede estar enmascarado por algunas medidas de conservación que se aplican para evitar la erosión remontante.

La Tabla 3 resume los datos de erosión y sedimentación en el periodo 1975-1995 para los barrancos de la cabecera del sistema de la riera Rierussa. De ella se deduce que el 51,5% del área ocupada por los barrancos sufrió algún tipo de erosión durante dicho periodo, mientras que en el 29,1% del área se produjo deposición de materiales. La Figura 4 muestra las diferencias de elevación de los años 1975 y 1995 a partir de las cuales se ha realizado el análisis de las tasas de producción de sedimentos. El total de volumen de materiales desplazado durante el periodo fue de $94423 \pm 4498 \text{ m}^3$ ($169961 \pm 8097 \text{ Mg}$), con una tasa de producción de sedimentos (SPR) de $846 \pm 40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Parte de este volumen desplazado fue depositado dentro del área estudiada (41,0% de los materiales): $38711 \pm 2545 \text{ m}^3$ ($54196 \pm 3563 \text{ Mg}$), lo cual supone una tasa de sedimentación media (SDpR) de $270 \pm 18 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. La tasa de erosión neta (NE), calculada como SPR-SDpR, fue de $576 \pm 58 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con una tasa de exportación de sedimentos (SDRg) del 68,1%.

Los patrones de erosión y sedimentación no fueron uniformes a lo largo del área de estudio (Figura 4). La erosión se produjo principalmente en las paredes laterales casi verticales, caracterizadas por la ausencia de vegetación. Así, los movimientos de masa, que preferentemente ocurren en las paredes orientadas al N o NE, vendrían a suponer hasta el 46,9% de la producción total de sedimentos dentro del barranco. Los sedimentos que se

Tabla 3. Tasas de erosión y deposición en el área afectada por barrancos en la cabecera de la riera Rierussa en el periodo 1975-1995.

	Área afectada (m ²)	Diferencia de altitud media (m)	Volumen total (m ³)	Masa total estimada (Mg)	Tasa media anual (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Erosión	50888	-1,86	94423±4498	169961±8097	SPR 846±40
Estable	19152	-0,007	130±1693	234±3047	1,2±15
Deposición	28788	1,34	38711±2545	54196±3563	SDpR 270±18

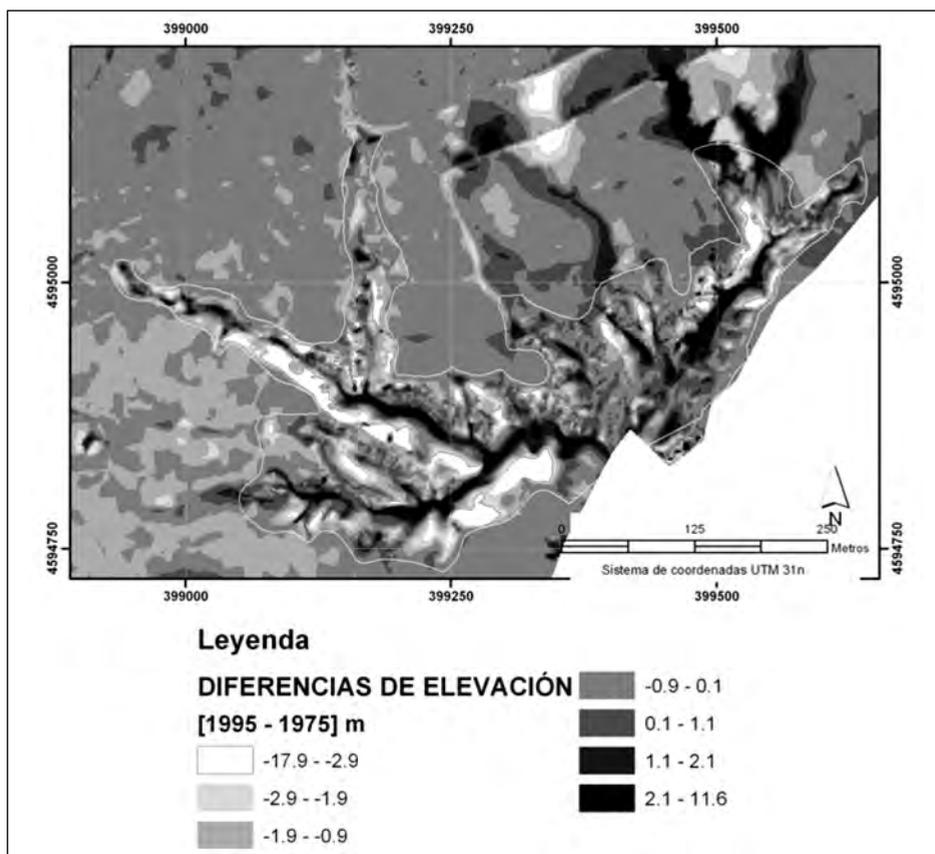


Figura 4. Diferencias de elevación calculadas a partir de los modelos digitales de elevación detallados (1 m de resolución) obtenidos por restitución fotogramétrica de fotografías aéreas de las fechas 1975 y 1995

depositan lo hacen preferentemente en la parte media y terminal de los cauces. Suponen hasta el 31,9% de los sedimentos generados lo cual, si se compara con resultados de otras áreas de estudio 2,2-15,8% (DeRose *et al.*, 1998), puede estar indicando una cierta estabilización de los cauces.

Con respecto a las tasas de erosión obtenidas en otras zonas de estudio, existe una diferencia de un orden de magnitud menor en relación a la obtenida en el Alt Penedès-Anoia (Bufalo y Nahon, 1992; Martínez-Casasnovas y Poch, 1998). Tal diferencia es atribuible al método de cálculo de la erosión. Mientras otros métodos sólo incluyen los procesos de generación de sedimentos por flujo superficial, el propuesto incluye también la incisión de los cauces, los movimientos en masa, la erosión lateral de los cauces y la erosión remontante.

4. Conclusiones

La presente investigación pone de manifiesto la importancia de los procesos de erosión en la región vitícola del Alt Penedès-Anoia (Barcelona), destacando la importancia de los procesos de erosión por cárcavas y barrancos, habitualmente menos estudiados que los procesos de erosión laminar o por surcos. La investigación se ha basado en el uso de tecnologías de la información geográfica (sistemas de información geográfica y teledetección), contribuyendo al desarrollando métodos para la cuantificación de la erosión como el análisis multitemporal de modelos digitales de elevación. Estos métodos, en comparación con otras técnicas o modelos existentes de medida o estimación de la erosión en cárcavas y barrancos, integran la erosión causada por diversos tipos de procesos: flujo superficial, movimientos en masa, erosión de paredes laterales por los cauces, retroceso de las cabeceras de las cárcavas o barrancos o incisión de los cauces.

En esta área de estudio, la cartografía de la erosión por barrancos a escala regional, ha puesto de manifiesto que el 15,2% de la superficie ha sido afectada por la erosión por barrancos. Existen unidades de paisaje donde la disección alcanza el 31,9% del área (zona norte del Glacis-Piedemonte) o unidades donde la disección es muy baja (2,3% en la zona de relieves aluviales recientes). Las diferencias estriban en el control que ejercen los materiales subyacentes y en el potencial para la erosión en cada zona (diferencia de elevación con respecto al nivel de base). Los procesos de erosión por barrancos están actualmente activos, con tasas medias anuales de generación de sedimentos (en el área modelo de Masquefa) de $846 \pm 40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y de erosión neta de $576 \pm 58 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo cual supone una tasa de exportación de sedimentos del 68%. Esta tasa neta promedio representa 2,78 veces la erosión producida por eventos extremos de precipitación en parcelas de viña, lo cual indica la importancia de los procesos de erosión por barrancos en la generación de sedimentos en el área de estudio.

Referencias bibliográficas

- BALCELLS, A. (1980). *El problema agrario en Cataluña. La cuestión rabassaire (1890-1936)*. Serie de Estudios. Ministerio de Agricultura.
- BOIXADERA, J. (1983). *Proyecto de un área modelo de conservación de suelos en Pira-Masquefa*. Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Lleida, Lleida.
- BUFALO, M., NAHON, D. (1992). Erosional processes of Mediterranean badlands: a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion. *Geoderma*, 52: 133-147.
- CABRERA, L. (1981). Influencia de la tectónica en la sedimentación continental de la cuenca del Vallès-Penedès (provincia de Barcelona, España), durante el Mioceno inferior. *Acta Geológica Hispánica*, 16(3): 165-171.

- DE ROSE, R.C., GÓMEZ, B., MARDEN, M., TRUSTRUM, N.A. (1998). Gully erosion in Mangatu forest, New Zealand, estimated from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 1045-1053.
- FAULKNER, H., SPIVEY, D., ALEXANDER, R. (2000). The role of some site geochemical processes in the development and stabilisation of three badland sites in Almería, Southern Spain. *Geomorphology*, 35: 87-99.
- GALLART, F. (1981). Neógeno superior y Cuaternario del Penedès (Catalunya, España). *Acta Geológica Hispánica*, 16: 151-157.
- LÓPEZ, C. (1994). *Establecimiento de un plan de conservación de suelos en un área modelo de 490 ha en el Alt Penedès*. Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria de Lleida, Lleida.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. (1998). *Suelo-paisaje-erosión. Erosión por cárcavas y barrancos en el Alt Penedès-Anoia (Cataluña). Un enfoque de estudio mediante tecnologías de la información espacial: Bases de datos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Tesis doctoral, Universidad de Lleida, Lleida.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A., POCH, R.M. (1998). Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse Joaquín Costa. *Limnética*, 14: 83-91.
- MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. (2003). A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50 (2-4): 293-308.
- NACCI, S. (2001). *Alteraciones en el régimen hídrico del suelo asociadas a la sistematización y cambios en el manejo de tierras con viña de secano en el Anoia -Penedès*. Tesis doctoral, Universidad de Lleida, Lleida.
- POESEN, J., HOOKE, J.M. (1997). Erosion, flooding and channel management in the Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21: 157-199.
- POESEN, J., VANDAELE, K., VAN WESEMAEL, B. (1998). Gully erosion: Importance and model implications. En: *Modelling soil erosion by water* (Boardman, J., Favis-Mortlock, D., Eds.). NATO ASI Series, Vol. I 55, Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, pp. 285-311.
- PORTA, J., RAMOS, M.C., BOIXADERA, J. (1994). Mechanical measures for runoff management and erosion control in the vineyards of North East Spain. En: *Conserving soil resources: European perspective* (Rickson, R.J., Ed.), CAB International, Wallingford, pp. 369-378.
- PORTA, J., RAMOS, M.C. (1995). Pèrdues de Sòl i de nutrients per erosió en camps de vinya: quantificació. En: *Jornades de Transferència de Tecnologia sobre Conservació de Sòls i Aigües en Vinyes* (Martínez-Casasnovas, J.A., Ed.). DMACS-UdL i INCAVI-DARP, Vilafranca del Penedès-Lleida, pp. 56-62.

- RAMOS, M.C., PORTA, J. (1994). Rainfall intensity and erosive potential in NE Spain Mediterranean area. First results on sustainability of vineyards. *Il Nuovo Cimento*, 17: 291-299.
- RAMOS, M.C., PORTA, J. (1997). Analysis of design criteria for vineyard terraces in the mediterranean area of North East Spain. *Soil Technology*, 10: 155-166.
- RAMOS, M.C. (2001). Rainfall distribution patterns and their changes over time in a Mediterranean area. *Theoretical and Applied Climatology*, 69: 163-170.
- SOIL SURVEY STAFF, (1998). *Keys to Soil Taxonomy, 8th edition*. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C.
- STROOSNIJDER, L., EPPINK, L.A.A.J. (1993). *Principles of soil and water conservation*. Lecture notes of course K200-500/510. WAU. Wageningen, The Netherlands.
- TROPEANO, D. (1983). Soil erosion on vineyards in the Tertiary Piedmontese basin (northwestern Italy): studies on experimental areas. *Catena Supplement*, 4: 115-127.
- USÓN, A. (1998). *Medidas de control de la erosión en suelos de viña de las comarcas Anoia – Alt Penedès (Barcelona): Efectividad y viabilidad*. Tesis doctoral. Universidad de Lleida, Lleida.
- VANDEKERCKHOVE, L., POESEN, J., OOSTWOUW WIJDENES, D., GYSSELS, G. (2001). Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. *Catena*, 44: 133-161.
- WAINWRIGHT, J. (1996). Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France. *Catena*, 26: 24-47.
- WICHEREK, S. (1991). Viticulture and soil erosion in the North of Parisian Basin. Example: The Mid Aisne Region. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.*, 83: 115-126.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook No. 537, Washington, D.C.
- ZINCK, J.A. (1988). *Physiography and Soils. Soil Survey Courses*. Subject matter K6. ITC Lecture Notes SOL-41.