

PROCESOS DE EROSIÓN EN DIFERENTES RELIEVES. LA RELACIÓN ENTRE FORMA Y PROCESO

M. SEEGER¹, J. B. RIES¹, I. MARZOLFF², S. WIRTZ¹, T. ISERLOH¹

¹ Physical Geography, Dept. Regional & Environmental Sciences, Trier University, Alemania

² Dept. Physical Geography, FB 11, Goethe-University, Frankfurt a. M., Alemania

RESUMEN

Cada unidad geomorfológica está ligada a una combinación de procesos que llevaron a formarla. Se caracteriza por formas y substratos determinados. El estudio aquí presentado investiga si en estas diferentes unidades de relieve se pueden identificar también diferentes procesos reinantes. Por ello se ha recopilado datos de mediciones de erosión y experimentos llevados a cabo sobre dunas, glaciares, rellenos de valle holocenos, laderas detríticas y terrazas limosas cuaternarias. Los datos se recogieron con diferentes métodos adaptados a las diferentes escalas y complejidad de procesos: *splash* y escorrentía superficial a través de simulaciones de lluvia, erosión en cárcavas efímeras mediante experimentos de escorrentía concentrada, y el crecimiento de *gullies* a través de un seguimiento plurianual en diferentes áreas del NE y SE de la Península Ibérica, el sur de Marruecos y el norte de Burkina Faso. Los resultados demuestran claramente que en la actualidad los procesos reinantes son muy diferentes a aquellos que llevaron a la formación de las unidades de relieve. También podemos constatar, que las dunas y los rellenos de valle holocenos son altamente susceptibles a la erosión por *splash* y escorrentía superficial. A cambio, las terrazas limosas cuaternarias son, en la actualidad, muy poco susceptibles a la erosión. Cabe destacar que la dominancia e intensidad de cada uno de los procesos analizados son específicos en cada una de las unidades de relieve. También se puede constatar, que la diferenciación es más clara cuanto mayor y más complejo es el proceso: la actividad de los *gullies* se diferencia más en las unidades de relieve que la erosión por *splash* y escorrentía superficial.

Palabras clave: Unidades de relieve, procesos de erosión actuales, simulaciones de lluvia, experimentos de escorrentía concentrada, seguimiento de evolución de *gullies*.

ABSTRACT

Geomorphological units are related certain processes and history of development. They are usually well defined by form and material. The study presented here investigates if there are now also different dominating erosion processes and intensities on different relief units. The data obtained on dunes, glaciares (pediments), holocene valley fillings, talus areas and quaternary loam terraces by means of experiments and monitoring has been analysed to quantify the differences of process intensities. Splash and sheet erosion have been quantified with rainfall simulations, rill erosion by rill experiments and gully growth by monitoring throughout several years in areas in NE- and SE-Spain, S-Morocco and N-Burkina Faso. The results show clearly that the processes are nowadays very different to those supposed to be relevant for the formation of the relief units. The dunes and the holocene valley fillings are highly erodible by splash and sheet flow. Contrasting with this, the quaternary loam terraces show an only low susceptibi-

lity for erosion processes. We can conclude that the relief units show now very different dominance of erosion processes and process intensities. We can also conclude that the differentiation is much more clear with increasing scale and complexity of process: gully growth varies much more between the different units as splash and sheet erosion do.

Key words: *Relief units, current erosion processes, rainfall simulations, rill experiments, gully monitoring*

1. INTRODUCCIÓN

La morfología de un paisaje es el fruto de una combinación de procesos, que a lo largo de un periodo más o menos largo, han moldeado la superficie de la tierra. La geomorfología ha sabido identificar y clasificar una gran variedad de formas, y atribuirles ciertos procesos, o combinaciones de procesos, que han sido clave para su formación. Por otro lado, los rasgos topográficos de un paisaje pueden ser determinantes para ciertos procesos actuales. El concepto de las unidades de respuesta hidrológica (*HRU, hydrological response unit*), elaborado hace 2 décadas (Flügel, 1995) para identificar y distinguir diferentes zonas de comportamiento hidrológico diferenciado incorpora, entre otras características del área de estudio, información topográfica. Lo mismo hacen conceptos más recientes para identificación de procesos hidrológicos dominantes (Hellebrand & Bos, 2008; Müller *et al.*, 2009; Scherrer *et al.*, 2007).

Siguiendo un concepto similar, Märker (2001) y Sidorchuk *et al.* (2003) definieron las unidades de respuesta erosiva (*ERU, Erosion Response Unit*). Hasta ahora el concepto ha sido aplicado únicamente para identificar zonas de desarrollo de gullies y su posterior utilización en modelos de crecimiento de éstos. Los avances de los últimos años apuntan en la misma dirección: relacionar las características

topográficas con procesos actuales y su predicción (Anders *et al.*, 2009). Si se añaden los esfuerzos que se están realizando últimamente para una identificación automática de unidades geomorfológicas desde modelos digitales del terreno (Anders *et al.*, 2011; Seijmonsbergen *et al.*, 2011) queda claro que las unidades geomorfológicas ofrecen un gran potencial para cuantificar, de forma distribuida, los procesos actuales que moldean la superficie de la tierra.

Pero para ello es preciso entender y cuantificar las diferencias en los procesos erosivos que pueden ser observados en diferentes unidades geomorfológicas, es decir unidades con características topográficas, de substrato y de génesis similares. Con el presente estudio queremos verificar las siguientes hipótesis:

1. Ciertas unidades geomorfológicas caracterizadas por diferentes materiales y relieve se diferencian claramente en su erodibilidad actual. De modo que la intensidad de diferentes procesos depende de su génesis, del substrato e incluso de su antigüedad.
2. La identificación de esa relación entre unidad y proceso actual depende del proceso en concreto y, especialmente, del método con el que es estudiado.



Fig. 1: Localización de las diferentes áreas de estudio.

2. METODOLOGÍA

Con el fin de entender la relación entre las unidades de relieve y los procesos ahí dominantes en la actualidad, hemos distinguido 5 unidades de relieve, sobre las que se realizaron diferentes tipos de medición y experimentos de los procesos de generación de escorrentía y de erosión. A continuación describimos brevemente estas unidades y las mediciones realizadas a diferentes escalas.

2.1. Unidades de relieve

Los experimentos y las mediciones descritas en el siguiente capítulo se reali-

zaron siguiendo hipótesis diferentes a las que vamos a abordar en esta investigación. Así, las unidades de relieve diferenciadas son fruto de un análisis posterior de las zonas de trabajo y, así, independientes del área de estudio. Así mismo, los tipos de medición o experimentos, y su localización en concreto, se hicieron independientemente de las unidades distinguidas posteriormente. La localización de las áreas de estudio puede verse en Fig. 1.

Un resumen de las unidades y sus principales características se encuentra en Tabla 1.

Tabla 1: Descripción de las diferentes unidades de paisaje.

UNIDAD DE RELIEVE	LOCALIZACIÓN	PENDIENTE	SUBSTRATO	ANTIGÜEDAD
Duna	Burkina Faso	3-8º	Arena, edafogénesis	18-11.000 BP
Glacis	Península Ibérica, Marokko, Burkina Faso	2-7º	Gravas, cantos, limos arcillas	Plio-Pleistoceno
Relleno de valle holoceno	Península Ibérica	1-5º	limos	Holoceno
Ladera detrítica	Península Ibérica	8-15º	cantos	Holoceno, actual
Terraza limosa cuaternaria	Marokko	1-3º	limos	Plistoceno superior / Holoceno

2.1.1. Dunas

La unidad de dunas se encuentra sobre dunas pleistocenas, removidas en la actualidad, en el norte de Burkina Faso (provincia de Ouadalan). Las componen arenas finas y medias, acumuladas en el Pleistoceno tardío, transformadas durante el Holoceno en su superficie por intensos procesos edafogénéticos. Bajo el uso intenso actual, con cultivo de sorgo, la superficie tiende a generar costras a causa de la erosión intensa de los horizontes aluviales.

Sin el impacto humano, las dunas aparecen cubiertas de vegetación densa de gramíneas. Pero cualquier uso las lleva rápidamente a procesos de degradación que conllevan transporte de las arenas que las componen. Así se pueden observar en la región pequeños barchanes, áreas de deflación y laderas cubiertas por acumulaciones recientes de arenas.

2.1.2. Glacis y pedimentos

La unidad de los glacis es mucho más heterogénea. La encontramos en pies de

laderas en el nor-este y el sur de la Península Ibérica, y su origen es mencionado en la bibliografía española como Plio-cuaternario. Podemos encontrar, dependiendo de la posición en la ladera, pedimentos típicos, caracterizados por la erosión (*glacis d'érosion*), pero también zonas cubiertas de material detrítico (*glacis d'accumulation*). Además, se incluyen mediciones en los pies de ladera limosos en el sur de Marruecos y en glacis arcillosos de Burkina Faso.

Este grupo de glacis y pedimentos abarca una gran variedad de sustratos, cubriendo además situaciones climáticas muy dispares.

2.1.3. Rellenos de valle holocenos (Vales)

Contrastando con el anterior, el grupo de los rellenos de valle (en Aragón también denominados Vales) lo encontramos exclusivamente en las 4 áreas de estudio de la Península Ibérica. Se trata de fondos de valle de poca pendiente, rellenos con el material erosionado durante los periodos de gran actividad erosiva en las pendientes que los rodean. La base de es-

tos rellenos ha podido datarse en el Neolítico (Andrés *et al.*, 2002; Sancho *et al.*, 1991), pero el grueso de la sedimentación se produjo durante las Edades de Bronce y del Hierro, pero también durante el periodo de colonización romana.

El material abarca desde grandes masas de gravas hasta gruesos paquetes de limos. Estos últimos dominan las áreas de estudio presentadas aquí. Estos valles de fondo plano son incididos en la actualidad por sistemas de *gullies*, y pueden considerarse un rasgo típico del paisaje mediterráneo humanizado. Si no están bajo un uso agrícola, en general de secano, estas áreas están sometidas a uso ganadero de diferente intensidad y muestran una cubierta vegetal irregular.

2.1.4. Laderas detríticas

Por encima de los rellenos de los valles podemos encontrar laderas recubiertas de material detrítico compuesto de material fino, en general con pedregosidad alta y poco redondeada. Pueden considerarse como los sedimentos de los procesos actuales de erosión, por ejemplo deslizamientos, solifluxión y erosión hídrica.

Las laderas incorporadas en este estudio se encuentran en diferentes zonas del nor-este de la Península Ibérica: el Valle Central del Ebro y en el Pirineo Central. Están generalmente cubiertas por un matorral de baja a alta densidad y son sometidas a pastoreo extensivo.

2.1.5. Terrazas limosas cuaternarias

Las terrazas limosas cuaternarias pueden considerarse un grupo especial: las encontramos en el sur de Marruecos, dentro de las cuencas del Souss y del Draa. En

ésta última, las terrazas constituyen formas típicas en la vertiente sur del Anti-Atlas. Están conectadas, frecuentemente sin ningún cambio de pendiente visible, con los glaciares superiores. En la actualidad, son disecionadas por los *oueds* de régimen torrencial que descienden del Atlas y del Anti-Atlas.

Son muy similares a los rellenos de valle descritos más arriba, pero su antigüedad no ha podido ser determinada aún. Existen indicios de que su formación data del periodo de transición entre el Pleistoceno y el Holoceno. Esto, y que están, a causa de las condiciones climáticas, completamente desprovistas de cubierta vegetal, nos hace clasificarlas como una unidad propia.

2.2. Cuantificación de procesos erosivos

2.2.1. *Splash* y erosión por escorrentía superficial

Las simulaciones de lluvia en el campo se llevan a cabo para investigar la generación de escorrentía, la erosión, las características que los controlan así como las consecuencias del impacto de la lluvia en la superficie del suelo (Cammeraat & Imsen, 1998; Cerdà *et al.*, 1998; León *et al.*, 2014; Seeger, 2007).

En los estudios presentes hemos utilizado un simulador de lluvia muy similar al utilizado por varios grupos en Europa (Iserloh *et al.*, 2013b). Una descripción detallada del procedimiento se puede encontrar en Iserloh *et al.* (2012). Sobre una parcela circular ($d=60$ cm, $A=028$ m²) se aplica una lluvia uniforme ($I=40$ mm h⁻¹), que a causa de las características del simulador tiene una energía menor a la precipitación típica de la misma intensidad (Iserloh *et*

al., 2013a). Toda la escorrentía producida durante los 30 min del experimento es recogida en intervalos de 5 min de duración. La producción de material en suspensión es determinada tras la filtración del contenido completo de las muestras y su secado a 105°C. Además, se han normalizado los datos de producción de sedimentos y se expresan en g m^{-2} .

Datos clave para la evaluación de las simulaciones son el coeficiente de escorrentía total (RC [-]), así como la cantidad total erosionada (E [g m^{-2}]) y la concentración de material en suspensión (SSC [g l^{-1}]). Estos fueron recogidos para este estudio en 160 simulaciones sobre todas las unidades de relieve estudiadas.

2.2.2. Erosión en cárcavas efímeras

La erosión causada por flujos concentrados genera cárcavas de pequeñas dimensiones (<1 m de ancho y profundidad), pudiendo alcanzar varias decenas de metros de longitud. El desarrollo de estos *gullies* efímeros puede llegar a incrementar las tasas de erosión hasta alcanzar un orden de magnitud superior a la erosión causada por flujos superficiales no concentrados (Cerdan *et al.*, 2002; Merz & Bryan, 1993; Morgan *et al.*, 1987; Poesen, 1987). A causa de su aparición altamente errática y su fácil destrucción a través del manejo de suelo, los procesos de erosión en cárcavas efímeras son difíciles de cuantificar (Casali *et al.*, 2006).

Para medir la efectividad de los procesos lineales y poder compararlos con otras mediciones y experimentos, se desarrollaron experimentos de escorrentía. Una descripción detallada puede encontrarse en Wirtz *et al.* (2012, 2010). En los experi-

mentos presentados aquí vertimos 72 l de agua con un caudal de 9 l min^{-1} a una cárcava preexistente. En 3 puntos de la cárcava se registra en diferentes momentos del experimento la profundidad del agua y se recogen muestras. Al final de una distancia definida del punto de comienzo (unos 20 m aprox.) se instala un pequeño aforo, en el que se registra continuamente la escorrentía. Además, se registra la velocidad del agua en el frente de la escorrentía así como a través de dos trazadores de diferentes colores tras 3 y 6 minutos de duración del experimento.

Para caracterizar la cárcava, se mide la pendiente en segmentos de 1 m de longitud, así como el perfil transversal detallado de los puntos de muestreo. Los datos relevantes para este estudio son la concentración media de sedimentos en suspensión y el coeficiente de escorrentía normalizado en relación a la longitud de la cárcava (RL). Este puede interpretarse como valor inverso de la infiltración en la cárcava, y así una expresión de la efectividad hidráulica de ésta.

A causa de la reinterpretación a la que son sometidos datos generados en experimentos con otros fines, no existen datos de las Dunas de Burkina Faso. De todas maneras, allí también se forman cárcavas efímeras.

2.2.3. Gullies: las grandes formas

La erosión causada por *gullies* es difícil de cuantificar a causa del tamaño y la complejidad de las formas, así como la singularidad de los eventos que los causan o hacen crecer. A la vez, su crecimiento es fruto de muchos procesos diferentes, como derrumbamientos laterales, incisión y sedimentación.

La observación fotográfica a escala de detalle (Ries & Marzoff, 2003) ha resultado ser el método más eficiente para poder cuantificar los procesos de erosión en *gullies* (Castillo *et al.*, 2012; Giménez *et al.*, 2009). En el caso presente, podemos recurrir a una serie fotográfica, iniciada en 1995, con fotografías primero analógicas y después digitales, realizadas desde globos aerostáticos teledirigidos, cometas, parapentes motorizados teledirigidos y aviones de aeromodelismo con piloto automático. Se han documentado los *gullies* con frecuencias desde escalas semestrales hasta bi-anales. Tras la rectificación de las imágenes y su tratamiento con métodos de fotogrametría es posible documentar detalladamente su crecimiento longitudinal y lateral, al igual que la incisión y la sedimentación en el sistema.

Para poder realizar mediciones comparables entre sistemas de *gullies* diferentes, la cuantificación de la dinámica se ha limitado a la cabecera de éstos, registrando ahí el crecimiento longitudinal máximo (R_{max}), la media de crecimiento longitudinal (R_{mean}) y el incremento de superficie (Area loss).

La base de datos sobre el crecimiento de *gullies* es también limitada: en este caso no se pudieron recoger datos en laderas detríticas.

2.2.4. Tratamiento de datos

El tratamiento de datos obtenidos sobre los diferentes procesos de erosión se basa primordialmente en el análisis de distribución y frecuencias: para visualización e interpretación de los datos, se generaron *box-plots* por grupos de relieve. Estos muestran la distribución de los datos alrededor de la mediana. Partiendo de

ahí, hemos utilizado para la evaluación y la comparación los siguientes datos: la ya mencionada mediana, el límite superior del 50 % central de los datos (en el gráfico el límite superior del *box*), y además hemos calculado la media, ya que ésta muestra mucho más la influencia de datos extremos. Y éstos son los que generalmente se pueden considerar como relevantes para los procesos erosivos.

Para comparar las diferentes unidades estudiadas hemos ordenado cada uno de los datos según su magnitud. Ésto ayuda a agrupar diferentes unidades y jerarquizar la susceptibilidad a cada uno de los procesos descritos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Erosión por splash y escorrentía superficial

Sobre las dunas, la generación de escorrentía alcanza una mediana de un 42% (véase Fig. 2, arriba izq.), siendo éste el valor más alto, pero mostrando a su vez una variabilidad muy alta. Muy similar (41%) es la escorrentía producida sobre rellenos de valle holocenos, aunque aquí los experimentos muestran una homogeneidad mucho mayor. Considerablemente menor es la escorrentía producida sobre glaciares (30%), terrazas limosas cuaternarias (29%) y laderas detríticas. Si consideramos la media así como el valor mínimo del 25% de las escorrentías más altas, son de nuevo las dunas y los rellenos holocenos donde se producen las mayores escorrentías superficiales. En cambio, los coeficientes menores se generan en los glaciares y en las laderas detríticas.

Muy similar, aunque más homogénea, es la producción de sedimentos (Fig. 2, arriba dcha.). Los valores más altos se en-

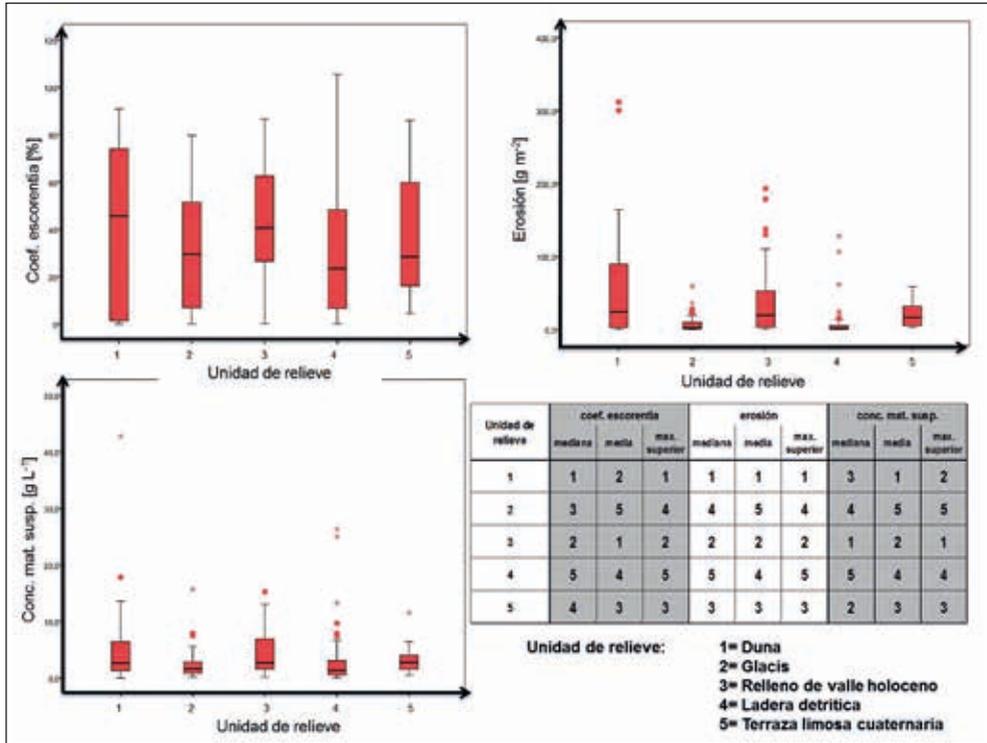


Fig. 2: Resultados de las simulaciones de lluvia. Arriba izq. coeficientes de escorrentía, arriba dcha. tasa de erosión, abajo concentración de material en suspensión.

Tabla 2: Rangos comparativos de los coeficientes de escorrentía, tasas de erosión y concentración de sedimentos. Se ordenan la media, la mediana y la máxima del cuartil superior.

cuentran en las dunas (24 g m^{-2}) y en los rellenos de valle (19 g m^{-2}), así como en las terrazas cuaternarias (16 g m^{-2}). Su variabilidad es alta, aunque va disminuyendo en el mismo orden. En los glacis y las laderas detríticas, la producción de sedimentos es un orden de magnitud menor (2.1 y 1.4 g m^{-2} , respectivamente) y muestran también una variabilidad mucho más reducida.

La concentración de sedimentos producida en las simulaciones de lluvia alcanza en los rellenos de valle 2.7 g L^{-1} (Fig. 2, abajo), y en las dunas y terrazas cuater-

narias 2.6 g L^{-1} . En los glacis y las laderas detríticas, la concentración de sedimentos en suspensión alcanza 1.6 g L^{-1} , respectivamente 1.4 g L^{-1} .

Los datos muestran claramente que los rellenos de valle, las terrazas cuaternarias y las dunas son altamente susceptibles a la erosión por *splash* y escorrentía superficial. Los glacis y las laderas detríticas en cambio lo son mucho menos, ya que no solo están compuestos por material menos erosionable, sino que también producen menos escorrentía superficial (compárense los rangos en la Tabla 2). Cabe resal-

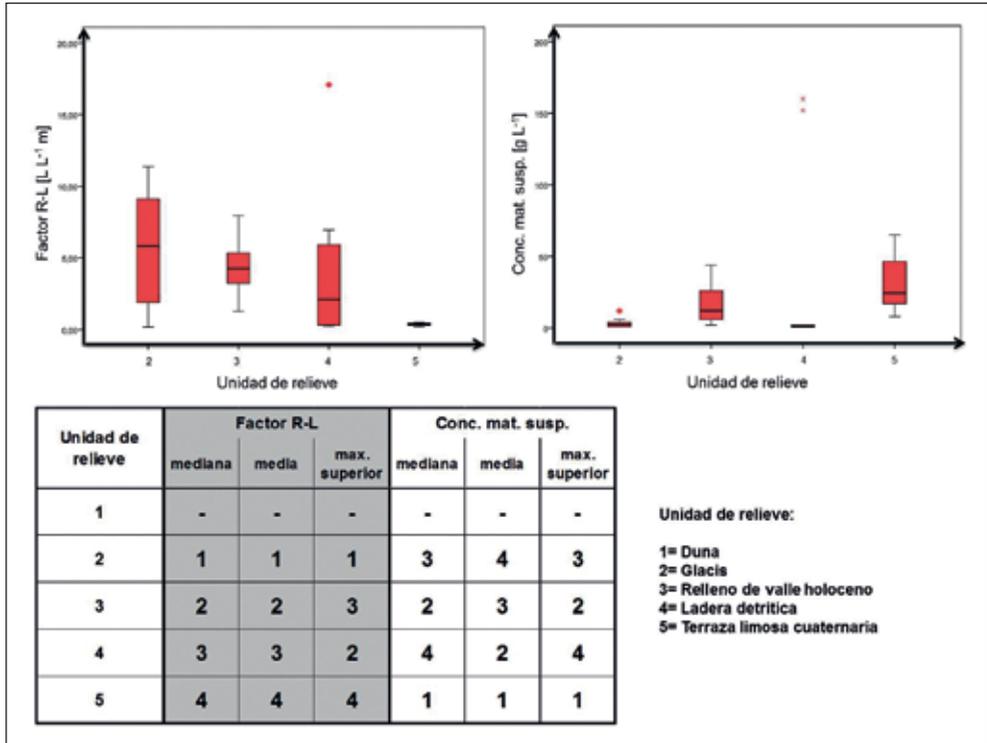


Fig. 3: Resultados de los experimentos de escorrentía concentrada en cárcavas. Izq. factor R-L, representa un valor relativo inverso a la tasa de infiltración; dcha material en suspensión

Tabla 3: Rangos comparativos de los experimentos de escorrentía superficial. Se ordenan la media, la mediana y la máxima del cuartil superior.

tar que, a pesar del tamaño muy reducido del experimento, da una idea muy clara sobre la intensidad de procesos en unidades muchos más amplias, confirmando así resultados que indican la dependencia de la generación de escorrentía y la intensidad de la erosión de factores mucho más complejos (Seeger, 2007) que los analizados por otros autores (Auzet *et al.*, 2004; Le Bissonnais *et al.*, 2005).

3.2. Erosión en cárcavas efímeras

Las cárcavas estudiadas recogen la escorrentía de micro-cuencas con superficies de alrededor de 300 m². Teniendo

en cuenta que la longitud de las cárcavas estudiadas es de unos 20 m, la superficie estudiada supera en uno a dos órdenes de magnitud a la analizada mediante las simulaciones de lluvia.

La efectividad hidráulica de las cárcavas estudiadas en los glacis es, con un valor mediano R-L superando los 5 L L⁻¹ m, muy alta (Fig 3, izq.). Su variabilidad es, a su vez, muy amplia. Esto significa que podemos encontrar áreas dentro de las cárcavas con tasas de infiltración muy bajas. Aquí podemos suponer que las arcillas de los *glacis d'accumulation*, o la roca madre

en los *glacis d'érosion* inhiben la infiltración. Un valor similar, aunque mucho menos variable, nos muestran los rellenos de valle, claramente influenciados por el encostramiento que se produce en la superficie de los limos. A cambio, las laderas detríticas ya dejan infiltrar en general una cantidad mayor durante los experimentos. Pero aquí se muestra de nuevo una alta variabilidad de la efectividad hidráulica. A su vez, los valores medidos en las terrazas cuaternarias del sur de Marruecos son extremadamente bajos y homogéneos.

La concentración de sedimentos detectada en estos experimentos es, con medianas rondando los 25 g L⁻¹, un orden de magnitud mayor que las concentraciones medidas en las simulaciones de lluvia (Fig. 3, dcha.). En las terrazas holocenas, pero también en los rellenos de valle de la Península Ibérica, encontramos las concentraciones más altas, comportándose así en la comparación justamente a la inversa de lo descrito en relación a la efectividad hidráulica (véase la Tabla 3). Similar a lo observado en las simulaciones de lluvia, los *glacis* y las laderas detríticas muestran valores muy bajos de sedimento transportado.

La alta efectividad hidráulica observada en los *glacis* hace suponer que éstos están siendo diseccionados por la escorrentía concentrada en los regueros. Las bajas concentraciones son contrarrestadas por cantidades altas de agua que fluyen por los regueros. A cambio, como se ha descrito más arriba, la erosión entre los regueros, es mínima. Así podemos constatar que los *glacis* no continúan formándose bajo las condiciones actuales.

Unas tasas de erosión altas son de esperar en los rellenos de valle, ya que

éstos muestran factores de escorrentía altos en conjunto con concentraciones de sedimentos relativamente altas. La alta susceptibilidad a la erosión detectada en las terrazas cuaternarias, basándose en las concentraciones de sedimentos registradas, solo puede considerarse potencial en este caso, ya que en esta unidad de relieve la escorrentía producida no alcanza a transportar el sedimento a grandes distancias.

3.3. Gullies

El estudio de *gullies* amplía la escala estudiada hasta unas 150 ha. La tasa de crecimiento de un *gully* es el resultado de una compleja interacción de diferentes procesos y factores dentro de la cuenca y en el paquete de sustratos en el que incide el *gully*. De esta manera, la variabilidad dentro de las observaciones es muy alta y oscila en nuestro caso entre 0.07 m y 10 m al año (véase Tabla 4).

Las observaciones de las cárcavas, presentadas en el capítulo anterior, encuentran su continuación en los *gullies* (Tabla 5): en los *glacis* podemos encontrar el mayor crecimiento longitudinal y de superficie de esta forma mayor de erosión estudiada. Las dunas muestran también una actividad alta, mientras que ésta decrece en los rellenos de valle para alcanzar los valores más pequeños en las terrazas limosas cuaternarias. Estas diferencias se pueden explicar fácilmente por las considerables diferencias en la actividad hidráulica de los flujos concentrados.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La diferenciación de unidades de relieve, basada en características morfológicas y de sustratos, pone en evidencia que estas unidades, resultado de una historia de

Tabla 4: Datos de los sistemas de gullies estudiados (Marzolf & Ries, 2007). La tabla ha sido extraída del mismo artículo. Se detallan además del nombre/localización de los gullies los usos del suelo, tipos de litología o unidad de paisaje, tipo de gully, tamaño de la cuenca así como la duración de la observación y las tasas de crecimiento máximas anuales.

Gully site	Land use/land cover landcover	Lithology	Headcut type	Catchment size [ha]	Monitoring [years]	Headcut R_{max} [$m a^{-1}$]
Northeast Spain						
Barranco de las Lenas	abandoned fields/ sparse matorral	Holocene valley filling	rilled-abrupt	21	11	0.07
Barranco Rojo	cereal fields/ young fallow land	Holocene valley filling	abrupt	1.2	4	0.50
Southeast Spain						
Salada 1	almond plantation	Holocene valley filling	abrupt	90	6	0.51
Salada 3	young fallow land	Holocene valley filling	abrupt	1.7	6	0.25
Salada 4	cereal fields	Holocene valley filling	abrupt	50	6	0.15
Luchena 1	very sparse matorral	Holocene valley filling	abrupt	0.3	4	0.13
Freila	rangeland/ abandoned fields	Holocene valley filling	abrupt	5	2	0.25
Casablanca	rangeland	Holocene valley filling	rilled-abrupt	0.7	2	0.17
South Morocco						
Foum el Hassane	loam terrace with stone pavement	Late Glacial/ Holocene loam terrace	rilled-abrupt	0.75	3	0
Icht	loam terrace	Late Glacial/ Holocene loam terrace	abrupt	~150	3	0.31
Burkina Faso						
Gorom-Gorom	grazed <i>Acacia raddiana</i> -savannah	Glacis d'accumulation	abrupt	~100	2	9.85
Oursi	rangeland on dunes	Pleistocene aeolian dune	abrupt	0.3	4	3.16

Marzolf I. & Ries J. (2007) Gully erosion monitoring in semi-arid landscapes. *Zeitschrift für Geomorphologie* 51,4: 405-425.

Tabla 5: Ordenación por rangos de la actividad de los gullies estudiados.

UNIDAD DE RELIEVE	R_{max} [$m a^{-1}$]	R_{mean} [$m a^{-1}$]	AREA LOSS [$m a^{-1}$]
Duna	2	2	2
Glacis	1	1	1
Relleno de valle holoceno	3	3	3
Ladera detrítica	-	-	-
Terraza limosa cuaternaria	4	4	4

paisaje bien diferente, muestran también en la actualidad una dinámica de procesos que las diferencia.

Por supuesto que, por un lado, se evidencia en la aparición, o no, de determinadas formas de erosión, como los *gullies*, en ciertos ambientes morfológicos. Estos son el resultado de un encadenamiento de procesos y estructuras ligadas a las condiciones actuales de usos del suelo, climáticas etc. (Seeger *et al.*, 2009). Pero también su crecimiento actual pone en evidencia que la historia y la génesis de ciertas unidades de relieve son determinantes para la aparición de *gullies*. Así podemos confirmar, desde un punto de vista muy diferente, las ideas que llevan a formar ERUs (Märker, 2001; Sidorchuk *et al.*, 2003). La clara diferenciación del crecimiento de los *gullies* además nos lleva a confirmar nuestra segunda hipótesis: los procesos geomorfodinámicos de gran escala evidencian claramente las diferencias entre las unidades de paisaje, al aglutinar éstas una multitud de procesos.

La contribución de las cárcavas efímeras a la erosión total del suelo es intensamente discutida desde hace décadas, aunque numerosos autores han podido constatar su importancia (por ejemplo Auzet *et al.*, 1993; Cerdan *et al.*, 2002). Pero su desarrollo, la dinámica y los procesos que las generan siguen sin entenderse en su conjunto y complejidad (Govers *et al.*, 2007; Parsons, 1987; Wirtz *et al.*, 2013). A pesar de considerarse a veces como el primer paso a los *gullies* descritos en el párrafo anterior, las cárcavas efímeras muestran un comportamiento diferenciado en las diferentes unidades de relieve: primero, no las distinguen tan claramente. Y, segundo, hacen aparición también en

ambientes donde no hemos observado *gullies*: las laderas detríticas. La intensidad de los procesos de erosión y transporte de sedimentos es muy variable dentro de las cárcavas y, además, han mostrado ser muy difíciles de cuantificar en el campo. Nuestros experimentos nos han permitido identificar diferencias en la dinámica hidráulica y erosiva y entender, en el caso de las terrazas cuaternarias del sur de Marruecos, la clara diferencia entre la susceptibilidad a la erosión y la erosión real. Ésta es aquí muy reducida a causa de la mínima efectividad hidráulica (quiere decir, la alta tasa de infiltración) en esta unidad de relieve. Las unidades más afectadas por la erosión por flujos concentrados son los glaciares y los rellenos de valle holocenos.

Las tasas de erosión y las escorrentías producidas por las simulaciones de lluvia son altamente variables dentro de las unidades de relieve. La escala detallada de este tipo de medición deja claro, que son algunos factores bien definidos los que rigen la generación de escorrentía y la erosión (Arnaez *et al.*, 2007; Cerda *et al.*, 1998; Le Bissonnais *et al.*, 2005). Pero, por otro lado, a pesar de una cierta borrosidad en la diferenciación, las simulaciones de lluvia demuestran que la incertidumbre en los factores determinantes de la erosión ya detectada con anterioridad (Seeger, 2007) puede ser explicada con las diferentes unidades de relieve.

Podemos resumir que:

1. las dunas y los rellenos de valle holocenos son especialmente susceptibles a la erosión por *splash* y escorrentía superficial,
2. los glaciares, en cambio, son disecionados en la actualidad por cárcavas y *gullies*,

3. las terrazas limosas cuaternarias son, por último, las unidades de menor actividad geomorfodinámica.

Nuestros resultados demuestran que una cartografía geomorfológica tradicional puede aportar nuevos datos para cuantificar y entender procesos de erosión actuales.

5. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos, con este artículo, agradecer a Jose María García Ruiz su dedicación y su pasión por la Geografía de los procesos de erosión en Aragón. Sin él, no habríamos llegado a donde estamos, no hubiésemos aprendido tanto.

Por supuesto que también queremos agradecer el apoyo financiero de la DFG (*Deutsche Forschungsgemeinschaft*), que en diferentes proyectos ha hecho posible recoger todos los datos presentados aquí.

Tampoco queremos olvidar a todos aquellos estudiantes de Trier, Frankfurt, Freiburg y Zaragoza que nos han acompañado a lo largo y ancho de tantos experimentos.

6. BIBLIOGRAFÍA

Anders, N.S., Seijmonsbergen, A.C. & Bouten, W., 2009. Modelling channel incision and alpine hillslope development using laser altimetry data. *Geomorphology*, 113: 35–46.

Anders, N.S., Seijmonsbergen, A.C. & Bouten, W., 2011. Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. *Remote Sensing Environment*, 115: 2976–2985.

Andres, W., Ries, J. & Seeger, M., 2002. Pre-Holocene sediments in the Barranco de las Lenas, Central Ebro Basin, Spain, as indicators for climate-induced fluvial activities. *Quaternaire International*, 93-94: 65–72.

Arnaez, J., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P. & Ortigosa, L., 2007. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vi-

neyards. *Soil Tillage Research*, 93: 324–334. doi:doi: DOI: 10.1016/j.still.2006.05.013.

Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Ludwig, B. & Maucorps, J., 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the north of France. *Catena*, 20, 41.

Auzet, A. V., Poesen, J. & Valentin, C., 2004. Soil surface characteristics: Dynamics and impacts on soil erosion. *Earth Surface Processes and Landform*, 29: 1063–1064.

Cammeraat, L.H. & Imeson, A.C., 1998. Deriving Indicators of Soil Degradation from Soil Aggregation Studies in Southeastern Spain and Southern France. *Geomorphology*, 307–321.

Casali, J., Loizu, J., Campo, M.A., De Santisteban, L.M., Álvarez-Mozos, J., 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena*, 67: 128–138.

Castillo, C., Pérez, R., James, M.R., Quinton, J.N., Taguas, E.V. & Gómez, J.A., 2012. Comparing the Accuracy of Several Field Methods for Measuring Gully Erosion. *Soil Sci Soc Am J.*, 76: 1319–1332.

Cerdà, A., Schnabel, S., Ceballos, A. & Gómez-Amelia, D., 1998. Soil hydrological response under simulated rainfall in the Dehesa land system (Extremadura, SW Spain) under drought conditions. *Earth Surface Processes and Landform*, 23: 195–209.

Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Bourennane, H. & Souchère, V., 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil Tillage Research*, 67: 99–108. doi:doi: DOI: 10.1016/S0167-1987(02)00045-4.

Flügel, W.A., 1995. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 9: 423–436.

Giménez, R., Marzloff, I., Campo, M.A., Seeger, M., Ries, J.B., Casali, J. & Álvarez-Mozos, J., 2009. Accuracy of high-resolution photogrammetric measurements of gullies with

- contrasting morphology. *Earth Surface Processes and Landform*, 34: 1915–1926.
- Govers, G., Giménez, R. & Van Oost, K., 2007. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. *Earth-Science Review*, 84: 87–102.
- Hellebrand, H. & Bos, R. van den, 2008. Investigating the use of spatial discretization of hydrological processes in conceptual rainfall runoff modelling: a case study for the meso-scale. *Hydrological Processes*, 22: 2943–2952.
- Iserloh, T., Fister, W., Seeger, M., Willger, H. & Ries, J.B., 2012. A small portable rainfall simulator for reproducible experiments on soil erosion. *Soil Tillage Research*, 124: 131–137.
- Iserloh, T., Ries, B.J., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fister, W., Geißler, C., Kuhn, N.J., León, F.J., Peters, P., Schindewolf, M., Schmidt, J., Scholten, T., Seeger, M., 2013a. Comparative measurements with seven rainfall simulators on uniform bare fallow land. *Z. Geomorphology*, 57: 1–10.
- Iserloh, T., Ries, J.B., Arnáez, J., Boix-Fayos, C., Butzen, V., Cerdà, A., Echeverría, M.T., Fernández-Gálvez, J., Fister, W., Geißler, C., Gómez, J.A., Gómez-Macpherson, H., Kuhn, N.J., Lázaro, R., León, F.J., Martínez-Mena, M., Martínez-Murillo, J.F., Marzen, M., Mingorance, M.D., Ortigosa, L., Peters, P., Regúés, D., Ruiz-Sinoga, J.D., Scholten, T., Seeger, M., Solé-Benet, A., Wengel, R. & Wirtz, S., 2013b. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. *Catena*, 110: 100–112.
- Le Bissonnais, Y., Cerdan, O., Lecomte, V., Benkhadra, H., Souchère, V., Martin, P., 2005. Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, 111–124.
- León, J., Seeger, M., Badía, D., Peters, P. & Echeverría, M.T., 2014. Thermal shock and splash effects on burned gypseous soils from the Ebro Basin (NE Spain). *Solid Earth*, 5: 131–140. doi:10.5194/se-5-131-2014.
- Märker, M., 2001. Regionale Erosionsmodellierung unter Verwendung des Konzepts der Erosion Response Units (ERU) am Beispiel zweier Flusseinzugsgebiete im südlichen Afrika.
- Marzolff, I. & Ries, J.B., 2007. Gully erosion monitoring in semi-arid landscapes. *Z. Für Geomorphology*, 51: 405–425. doi:doi:10.1127/0372-8854/2007/0051-0405.
- Merz, W. & Bryan, R.B., 1993. Critical conditions for rill initiation on sandy loam Brunisols: laboratory and field experiments in southern Ontario, Canada. *Geoderma*, 57: 357–385. doi:doi: 10.1016/0016-7061(93)90050-U.
- Morgan, R.P.C., Martin, L. & Noble, C.A., 1987. Soil erosion in the United Kingdom: a case study from mid- Bedfordshire. Occas. Pap. - Silsoe Coll. Cranfield Inst. Technol. 14.
- Müller, C., Hellebrand, H., Seeger, M. & Schobel, S., 2009. Identification and regionalization of dominant runoff processes - a GIS-based and a statistical approach. *Hydrological Earth System Science*, 13: 779–792.
- Parsons, A.J., 1987. The role of slope and sediment characteristics in the initiation and development of rills. *Process. Mes. Eros.* 25e UGI Paris 1984 211–220.
- Poesen, J., 1987. Transport of rock fragments by rill flow – a field study., in: Rill Erosion - Process and Significance. *Catena Suppl.* Band. CATENA-Verlag, Cremlingen, pp. 35–54.
- Ries, J.B., Marzolff, I., 2003. Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp. *Catena*, 50: 309–328.
- Sancho, C., Gutiérrez-Elorza, M. & Pena-Monné, J.L., 1991. Erosion and sedimentation during the Upper Holocene in the Ebro Depression: quantification and environmental significance. In: *Soil Erosion Studies in Spain*. Geoforma Ediciones (M. Sala, J.L. Rubio & J.M. García-Ruiz, Edts): 219–228 pp., Logroño.
- Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A.O. & Cordery, I., 2007. Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. *Hydrological Earth System Science*, 11: 907–922.
- Seeger, M., 2007. Uncertainty of factors determining runoff and erosion processes as quantified by rainfall simulations. *Catena*, 71: 56–67.

- Seeger, M., Marzolff, I. & Ries, J.B., 2009. Identification of gully-development processes in semi-arid NE-Spain. *Z. Geomorphology*, 53: 417–431.
- Seijmonsbergen, A.C., Hengl, T. & Anders, N.S., 2011. Semi-Automated Identification and Extraction of Geomorphological Features Using Digital Elevation Data.
- Sidorchuk, A., Märker, M., Moretti, S. & Rodolfi, G., 2003. Gully erosion modelling and landscape response in the Mbuluzi River catchment of Swaziland. *Catena*, 50: 507–525. DOI: 10.1016/S0341-8162(02)00123-6.
- Wirtz, S., Seeger, M. & Ries, J.B., 2010. The rill experiment as a method to approach a quantification of rill erosion process activity. *Z. Geomorphology*, 54: 47–64.
- Wirtz, S., Seeger, M. & Ries, J.B., 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91: 21–34. doi:10.1016/j.catena.2010.12.002.
- Wirtz, S., Seeger, M., Zell, A., Wagner, C., Wagner, J.-F. & Ries, J.B., 2013. Applicability of Different Hydraulic Parameters to Describe Soil Detachment in Eroding Rills. *PLoS ONE* 8, e64861. doi:10.1371/journal.pone.0064861.