

EFECTOS DE LAS RODADAS DE TRACTORES EN LA ESCORRENTÍA Y EROSIÓN DE SUELOS EN LADERAS CULTIVADAS CON VIÑEDOS

J. ARNÁEZ^{(1)*}, P. RUIZ-FLAÑO⁽²⁾, T. LASANTA⁽³⁾,
L. ORTIGOSA⁽¹⁾, J. A. LLORENTE⁽¹⁾,
N. PASCUAL⁽¹⁾, N. LANA-RENAULT⁽¹⁾

¹ Área de Geografía Física (DCH), Universidad de La Rioja,
26004-Logroño, España.

² Departamento de Geografía, Universidad de Valladolid,
47011-Valladolid, España.

³ Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Campus Aula Dei,
50080-Zaragoza, España.

RESUMEN. *El viñedo riojano se caracteriza por su elevado nivel de mecanización. Muchas labores agrícolas (arado, remoción del suelo, aplicación de herbicidas y pesticidas, vendimia, etc.) se llevan a cabo con pequeños tractores que circulan en dirección de la máxima pendiente, generando rodadas de aproximadamente 50 cm de anchura y 5-7 cm de profundidad. El desplazamiento de tractores en las parcelas facilita la compactación de la superficie del suelo. Por otro lado, la localización de los viñedos en laderas inclinadas favorece la actividad erosiva de la escorrentía superficial. En este trabajo se pretende aportar información sobre el papel de las rodadas de tractor en la generación de escorrentía y producción de sedimentos en viñedos. Para obtener esta información, se realizaron simulaciones de lluvia con diferentes intensidades. Los resultados confirman que la escorrentía, con medias y altas intensidades de precipitación, alcanza valores más elevados en las rodadas de tractor debido a la compactación del suelo. Las diferencias entre rodadas y áreas sin rodadas (interrills) son menos marcadas por lo que respecta a la producción de sedimentos. Los resultados obtenidos con los experimentos de simulación de lluvia aportan datos sobre las relaciones entre la escorrentía, el impacto de las gotas de lluvia y el transporte de sedimento en suspensión.*

Effects of wheel traffic on runoff and soil erosion in slopes cultivated with vineyards

ABSTRACT. *Mechanization characterizes the vineyards of La Rioja, one of the most important wine regions in Spain. Farming operations (plowing, soil removal, herbicide and pesticide application, harvesting of grapes and its transportation,*

etc.) are carried out with tractors that usually move in the direction of maximum slope, generating wheel tracks approximately 50 cm wide and 5-7 cm deep. The displacement of tractors on plots leads to the compaction of the topsoil and the subsoil. On the other hand, the location of vineyard parcels on steep slopes favours the erosive impact of surface runoff. This paper provides information on the role played by wheel tracks on soil loss by runoff in vineyards. To obtain this information, rainfall simulations with different intensities were carried out. The results confirm that, with moderate and high rainfall intensity, the runoff starts earlier and reach higher values in wheel tracks, due to compaction of the topsoil. Differences between wheel tracks and interrills are less pronounced on sediment yield. These differences are minimal in high intensity storms, having the tractor tracks lesser importance in erosion. By contrast, the drainage micro-network of hillslopes, eliminated by tillage and reactivated by heavy rainfall, seems to have more impact on runoff and erosion. The results obtained with the rainfall simulation experiments shed light on the relationships between runoff, raindrop impact and suspended sediment transport.

Palabras clave: escorrentía, producción de sedimentos, rodadas, mecanización viñedos.

Key words: runoff, sediment yield, wheel track, mechanization, vineyards.

Enviado el 26 de septiembre de 2011

Aceptado el 9 de enero de 2012

*Correspondencia: Área de Geografía Física (DCH). Edificio Luis Vives. Universidad de La Rioja, 26004-Logroño (España). E-mail: jose.arnaez@unirioja.es

1. Introducción

La erosión del suelo es un problema ambiental de enorme trascendencia y está muy condicionado por el uso y gestión del territorio. Las actividades humanas aceleran los ritmos de erosión y exportación de sedimento, en algunas circunstancias con tasas de varios órdenes de magnitud por encima de las correspondientes a la erosión geológica, de manera que convierten al suelo en un recurso no renovable (García-Ruiz y López Bermúdez, 2009).

Entre las actividades con mayor implicación en la erosión destacan, sobre todo, las agropecuarias (García-Ruiz, 2010). Los sistemas agropecuarios tradicionales, apoyados en la necesidad de alimentar a la población en condiciones de baja productividad y escaso intercambio comercial, proporcionaron a los cauces una importante cantidad de sedimentos. No obstante, antes del siglo XX los cambios de uso del suelo ocurrían lentamente, lo que favorecía el mantenimiento en el tiempo de unos paisajes agrarios estables y adaptados a las condiciones ambientales. Los modelos agrícolas intensivos actuales, orientados a los mercados, con elevada productividad por unidad de superficie y cambiantes en breves periodos de tiempo, también se comportan como aceleradores de

la erosión, ya que han requerido la puesta en práctica de técnicas de cultivo poco apropiadas para frenar la erosión o han exigido la modificación del terreno para hacerlo más apto a la mecanización (Cots Folch *et al.*, 2009). Estudios de escorrentía y pérdidas de suelo en áreas agrícolas han mostrado la efectividad de los sistemas de cultivo en la reducción o aceleración de la erosión (Kang *et al.*, 2001).

Uno de los cultivos con mayor actividad erosiva es el viñedo (Cerdan *et al.*, 2006). Hay aproximadamente 6 millones de hectáreas de viñedos en el mundo. Una parte muy importante de esta superficie se encuentra en las regiones mediterráneas (Tonietto y Carbonneau, 2004), caracterizadas por precipitaciones de alta intensidad horaria, periodos de déficit hídrico para las plantas, fuertes desniveles y suelos desarrollados en litologías con baja resistencia a la actividad erosiva del agua o muy susceptibles a los procesos de degradación física.

También habría que considerar el papel de las actuales técnicas de laboreo empleadas. Algunas labores en las viñas (arado, aplicación de herbicidas y pesticidas, etc.) pueden incrementar las pérdidas de nutrientes y de suelos o reducir la productividad (Raclot *et al.*, 2009). Especialmente importante es la circulación de tractores y maquinaria por la parcela agrícola, pues supone la compactación de los primeros centímetros del suelo y la modificación de su funcionamiento hidrológico (van Dijck y van Asch, 2002). Incluso, la compactación puede ser responsable de la disminución de la producción de uva (Louw y Benni, 1991) o de la reducción del crecimiento de las raíces de las plantas (Van Huyssteen, 1988). El indicador más evidente de esta compactación es la profundidad de la rodada en el suelo generada por el tractor o la maquinaria agrícola utilizada.

Los efectos de la compactación del suelo por la maquinaria agrícola son conocidos y han sido estudiados en diferentes tipos de cultivo (Materechera, 2009; Boulal *et al.*, 2011). Sin embargo, es necesario disponer de más información, especialmente relacionada con las consecuencias erosivas que implica la circulación de maquinaria en parcelas agrícolas localizadas en diferentes condiciones ambientales. El objetivo, pues, de este trabajo es conocer y cuantificar el papel de las rodadas de tractores en la generación de escorrentía y producción de sedimentos en laderas cultivadas con viñedos en un clima mediterráneo, comparando los resultados con suelos no afectados por el paso de vehículos. Para obtener la información se han utilizado simuladores de lluvia con diferentes intensidades de precipitación.

2. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el sector riojano de la Depresión del Ebro (fig. 1). Aquí el viñedo se cultiva sobre terrazas y glaciares cuaternarios que llegan a alcanzar una notable extensión (Julián y Peña, 2007). Estas formas del relieve están compuestas de gravas de litologías muy variadas, resultado de la diversidad de las áreas fuente de sedimento, envueltas en una matriz arenosa. También pueden observarse viñedos sobre las areniscas terciarias (miocenas) de la Depresión del Ebro.

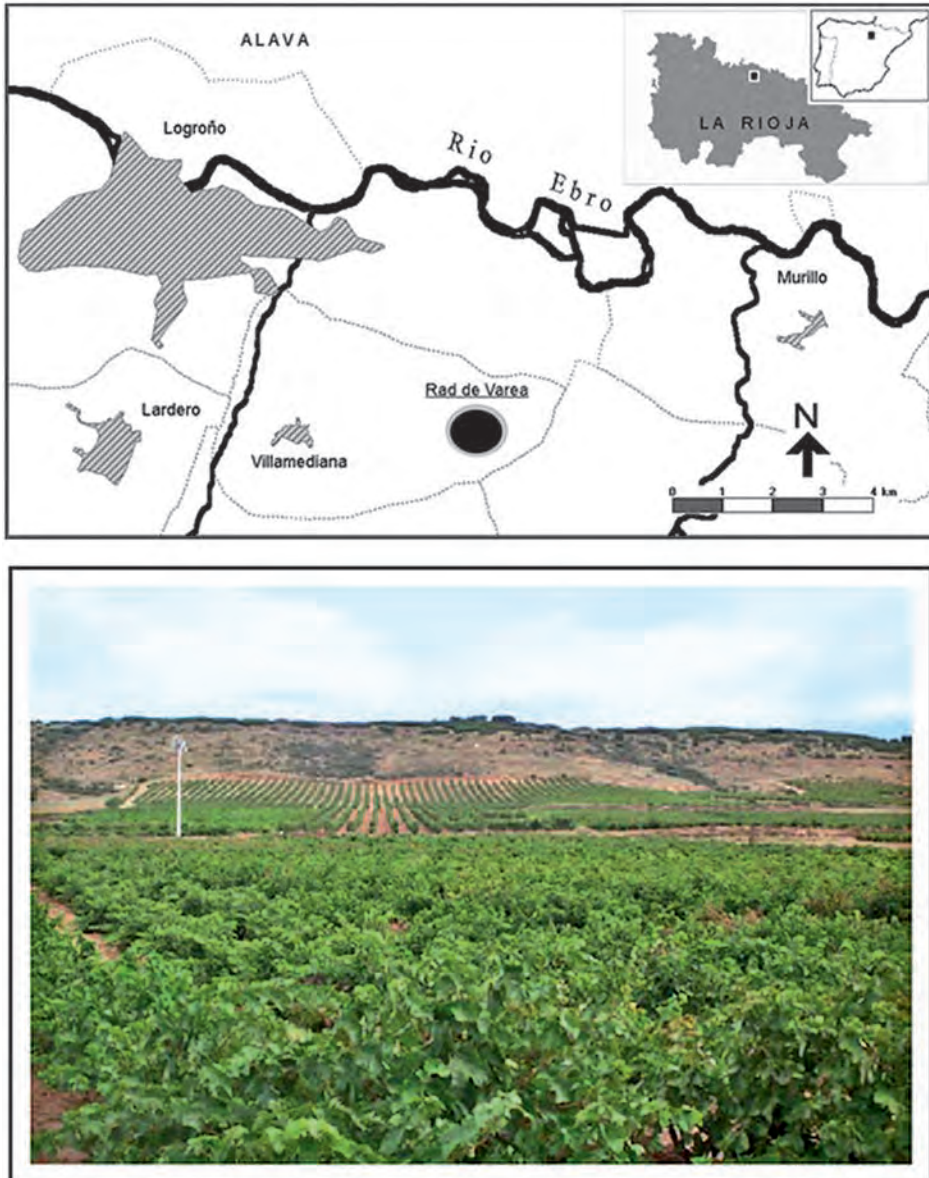


Figura 1. Área de estudio.

El área de estudio es calurosa y seca si se compara con los relieves montañosos próximos del Sistema Ibérico occidental. La temperatura media anual en Agoncillo, estación meteorológica próxima a Logroño, es de 13.4°C. Enero debe calificarse como el mes más frío, con 5.7°C, y julio como el más cálido, con 22.1°C. Las precipitaciones anuales en la Depresión del Ebro riojana son inferiores a los 500 mm y aún se reducen

más en el interior de la cubeta, donde disminuyen por debajo de los 400 mm. Los máximos son primaverales y los mínimos estivales. A lo largo del verano y el otoño es habitual recoger precipitaciones de cierta intensidad horaria: 44.6 mm h⁻¹ y 60.3 mm h⁻¹ para precipitaciones de 30 minutos y periodos de retorno de 10 y 25 años, respectivamente.

El valle del Ebro se encuentra ocupado desde el Holoceno Medio por el hombre (Utrilla y Rodanés, 1997). La cubierta forestal, como consecuencia de ello, ha quedado reducida en este sector riojano a los espacios más improductivos e inaccesibles (Fernández Aldana, *et al.*, 1989).

Los experimentos fueron realizados en las proximidades de la ciudad de Logroño, en el municipio de Villamediana de Iregua (fig. 1). Los viñedos seleccionados se encuentran entre los 425 y 450 m s.n.m., en laderas de 4° y 5° de pendiente. Las parcelas tienen una orientación SSW, están separadas por pequeñas terrazas de 1 a 2 m de altura y son cultivadas siguiendo la dirección de la máxima pendiente. La litología dominante son las areniscas y arcillas del Mioceno y los suelos son cambisoles calcáricos y calcisoles.

El viñedo riojano está exclusivamente orientado a la comercialización de la uva para la producción de vino y dispone de un alto nivel de mecanización. La mayor parte de las labores agrícolas en las vides se hacen con maquinaria. Se utilizan pequeños tractores de diversa potencia para labores de volteo (desplazamiento de la tierra de forma que el horizonte subsuperficial pasa a la superficie y viceversa), bina (remoción o mullimiento de la tierra sin desplazarla), aplicación de herbicidas y pesticidas, recolección (vendimia) o transporte de la uva. El paso de la maquinaria por el viñedo se realiza siguiendo la dirección de la pendiente y afecta directamente a las características físicas de los suelos. El indicador visual más obvio es la aparición de rodadas, de 45 a 50 cm de anchura y 5 a 7 cm de profundidad, en las que se observa un suelo compactado (fig. 2).

3. Métodos

Para la realización de este trabajo se ha utilizado un simulador de lluvia (tabla 1). La simulación es un método ampliamente aplicado en los estudios de erosión por su bajo coste, por su fácil manejo y por la posibilidad que ofrece de obtener datos controlando determinadas variables y en periodos de tiempo relativamente cortos (Cerdà, 1999). Además, los resultados obtenidos con los simuladores pueden ser utilizados con fines comparativos (Foster *et al.*, 2000). Su mayor inconveniente es la dificultad de extrapolar los datos a áreas extensas o a periodos de tiempo amplios.

El simulador de lluvia utilizado en este estudio cuenta con una estructura metálica, con forma de pirámide truncada, que dispone de unos pies telescópicos. El simulador, de este modo, puede adaptarse a las características del terreno, especialmente a la pendiente y a las rugosidades. La estructura es protegida con una lona de plástico con objeto de preservar el experimento del viento.

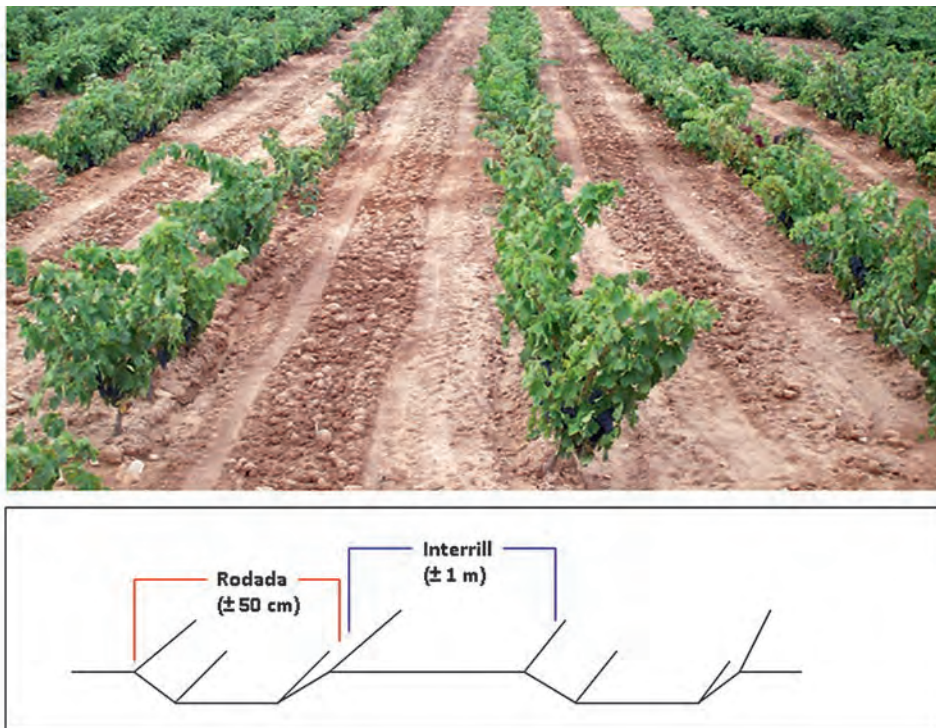


Figura 2. Viñedo cultivado en pendiente. Pueden observarse las rodadas dibujadas por el paso de la maquinaria.

Tabla 1. Principales características del simulador de lluvia.

Estructura	Pies metálicos telescópicos con forma de pirámide truncada cubiertos con un toldo de plástico
Boquillas	Lechler 460.728 para bajas intensidades de precipitación: <35 mm h ⁻¹ Lechler 460.608 para intensidades intermedias: 35-60 mm h ⁻¹ Lechler 460.880 para altas intensidades de precipitación: >60 mm h ⁻¹ Se sitúan a una altura de 2 m sobre la superficie del suelo
Motor	Honda G100
Bomba	Betolini, presión máxima 20 bar
Tanque de agua	70 l
Parcelas	Anillos metálicos de 0.45 m de diámetro
Duración de la prueba	30-45 min.
Diámetro de la gota de lluvia (D ₅₀)	0.5 mm a 1.2 mm
Energía cinética de la gota de lluvia	300.6 a 1556 j m ⁻² h ⁻¹
Intensidades de precipitación	29 a 105 mm h ⁻¹

La boquilla del simulador de lluvia, situada a 2 metros del suelo, genera una distribución homogénea de gotas (coeficiente de homogeneidad de Christiansen: 96.5%). Para las simulaciones de lluvia han sido empleados tres modelos de boquilla, con el objeto de lograr diferentes intensidades de precipitación: Lechler 460.728, 460.608 y 460.880. La primera aporta intensidades inferiores a 35 mm h⁻¹, la segunda de 35 a 60 mm h⁻¹ y la tercera de 60 a 105 mm h⁻¹. Las boquillas están conectadas por medio de un tubo de plástico a una bomba de presión (Betolini), un motor portátil y un depósito de agua de 70 litros.

El tamaño, la velocidad y la energía cinética de las gotas de lluvia en los experimentos de simulación fue calculada siguiendo la metodología descrita por Navas *et al.* (1990) y Martínez-Mena *et al.* (2001). Con intensidades de precipitación entre 30 y 40 mm h⁻¹, la velocidad media de la gota de lluvia fue de 4.4 m sg⁻¹ y la energía cinética de 300.6 j m⁻² h⁻¹. Estos datos fueron validados por medio de un disdómetro laser de la Universidad de Trier (T. Iserloh, Dpto. Physical Geography) que determinó, para una intensidad de 30 a 40 mm h⁻¹, una velocidad media de la gota de lluvia de 4.19 m sg⁻¹ y una energía cinética de 312.17 j m⁻² h⁻¹. Estos valores se incrementaron con la intensidad de la precipitación, de modo que con intensidades de 104 mm h⁻¹ la velocidad media de las gotas fue 5.1 m sg⁻¹ y la energía cinética 1556 j m⁻² h⁻¹.

Las gotas de lluvia caen sobre un área definida por un anillo metálico de 0.45 m de diámetro. El anillo, que recoge la escorrentía superficial generada principalmente por el impacto de las gotas de lluvia, dispone de un pequeño tubo de salida para recoger el agua y la carga de sedimentos en suspensión. La lluvia total es controlada por tres pluviómetros distribuidos en los bordes de las parcelas.

Las pruebas de simulación de lluvia fueron llevadas a cabo durante el verano, periodo en el que los valores de humedad del suelo eran bajos (4-5%). El tiempo de simulación fue de 30 ó 45 minutos para cada prueba.

Las muestras de agua y sedimentos fueron recogidas en pequeñas botellas a lo largo del experimento en intervalos de 3 a 5 minutos. Esta operación se iniciaba en el momento en el que la escorrentía comenzaba a actuar. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio. Al finalizar la prueba de simulación, la profundidad del frente de humedad era medida después de realizar una pequeña zanja en el suelo.

Los datos recogidos en cada simulación fueron: el tiempo entre el inicio del experimento y el inicio del comienzo de la escorrentía (segundos), el coeficiente de escorrentía (porcentaje de lluvia que se convierte en escorrentía), la escorrentía media (mm h⁻¹), la profundidad del frente de humectación al finalizar el experimento (cm), la concentración media de sedimentos (g l⁻¹) y la pérdida total de suelo o tasa de erosión (g m⁻² h⁻¹).

Para el estudio del funcionamiento de la escorrentía y la producción de sedimento con relación al efecto de las rodadas de los tractores en los campos cultivados con viñedos, se realizaron 24 pruebas de simulación con intensidades entre 29 y 105 mm h⁻¹ en 30 minutos (tabla 2). Once pruebas se efectuaron sobre suelos afectados por las rodadas dejadas por los tractores que realizan las diferentes tareas agrícolas en los viñedos. Trece prue-

bas corresponden a áreas próximas a las anteriores (interrills) que conservan la superficie del suelo original, es decir no han sido alteradas por el paso de las ruedas de los tractores.

Tabla 2. Simulaciones de lluvia.

Tipos	Nº	Ip mínima mm h ⁻¹	Ip máxima mm h ⁻¹	Ip media mm h ⁻¹
Rodadas de tractor	11	29	92	53.1 (±16.8)
Interrills	13	29	105	54.7 (±27.4)

Antes de cada simulación se recogieron otros datos de las características de la superficie del suelo: pendiente y microformas. Una fotografía digital y vertical de cada parcela fue realizada para, posteriormente, medir el porcentaje y tamaño de las gravas con un software de tratamiento de imágenes (Adobe PhotoShop®). Finalmente, muestras de suelo a 0-10 cm de profundidad fueron recogidas en el entorno de cada experimento para, después de su análisis en laboratorio, poder disponer de datos sobre su textura, pH y contenido en materia orgánica. La densidad aparente fue calculada a partir de un cilindro de 15 cm de diámetro, con una capacidad de 100 cm³. Se recogieron 6 muestras en cada experimento. Para la resistencia a la penetración de la superficie del suelo se utilizó un penetrómetro Geotester. Se midió la resistencia en transectos paralelos y perpendiculares a la dirección de la pendiente tanto en el interior de las rodadas de tráfico como en las áreas no afectadas por estas rodadas.

4. Resultados y discusión

4.1. Características de los suelos

La microtopografía y las propiedades del suelo donde se realizaron las simulaciones se incluyen en la tabla 3. En general, la superficie del suelo presentó las rugosidades propias de los terrenos arados y volteados, con agregados de cierto tamaño. Estas rugosidades y agregados desaparecen totalmente en las rodadas de los tractores, pues, como es lógico, el peso de la maquinaria, se encarga de apelmazar los suelos. El porcentaje de gravas fue bajo tanto en las rodadas como en las zonas sin rodadas (13-14%), aunque se incrementó en algunos sectores de las parcelas, especialmente aguas abajo. Los suelos con rodadas disponían de cantos incrustados mientras que, por el contrario, en las zonas no afectadas por las rodadas (interrills) un buen número de gravas permanecían sueltas en superficie. La mayor parte de los fragmentos rocosos tenían un diámetro de 1 a 3 cm, aunque en algunos casos se encontraron ejemplares de 7 y 8 cm. Las observaciones en el campo sugieren que los fragmentos rocosos son transportados por la escorrentía y depositados en las concavidades y sectores inferiores de los viñedos. El suelo carecía de cubierta vegetal, ya que los agricultores la eliminan con herbicidas. La composición física y propiedades químicas del suelo tanto para las rodadas como para

las zonas sin rodadas fueron muy homogéneas. Las pruebas de simulación de lluvia fueron realizadas sobre suelos de estructura granular fina y color marrón claro (7.5 YR 5/4, Munsell), con un porcentaje medio de arenas en torno al 37%, de limos, al 42% y de arcillas, al 20%.

Tabla 3. Características de los suelos.

	Rodadas	Sin rodadas
Pendiente (°)	4.7 (±1.6)	3.5 (±1.07)
Cubierta de gravas (%)	13.8 (±18.8)	15.2 (±16.6)
Tamaño de gravas (cm)	1.7 (±0.6)	2.6 (±1.2)
Cubierta vegetal (%)	-	-
Arenas (%)	36.4 (±1.2)	37.3 (±1.2)
Limos (%)	41.8 (±1.1)	41.8 (±0.6)
Arcillas (%)	21.6 (±0.6)	19.7 (±0.7)
pH	8.5 (±0.06)	8.5 (±0.06)
Materia orgánica	0.9 (±0.06)	0.7 (±0.05)
Carbonatos (%)	20.5 (±0.9)	17.2 (±0.9)
Densidad aparente Mg m ⁻³	1.3 (±0.2)	1.1 (±0.07)
Resistencia kg cm ⁻²	3.3 (±1.3)	2.9 (±0.6)

El pH medido osciló entre 8 y 8.5 y los niveles de materia orgánica fueron bajos (0.7-0.9%). Los valores de densidad aparente fueron más elevados en las rodadas que en las áreas sin rodadas, lo que indica compactación de la superficie del suelo en el primer caso. Los datos de resistencia media a la penetración oscilaron entre 3.3 para los primeros y 2.9 kg cm⁻² para los segundos.

4.2. Escorrentía

Las simulaciones de lluvia aportaron información sobre la escorrentía en relación a diferentes intensidades de precipitación. En la tabla 4 se han incluido los datos medios en las áreas con rodadas de tractor frente a aquellas otras que no disponen de este tipo de incisiones (interrills). Se puede observar, como era de esperar, un incremento de la escorrentía a medida que aumentan las intensidades de precipitación. Además, como se pone de manifiesto en la fig. 3, las rodadas fueron capaces de generar más escorrentía, especialmente con tormentas de moderada y alta intensidad. Con intensidades moderadas (35-60 mm h⁻¹), los coeficientes medios de escorrentía fueron de un 14.5% en las rodadas de tractor y, con altas intensidades (>60 mm h⁻¹), un 31.2%. Estos porcentajes para estos mismo grupos de intensidades son de un 7% y un 23.2% para las áreas de inte-

rills. Este comportamiento es explicable por las características de la superficie de los suelos. El peso de los tractores compacta los primeros centímetros del suelo reduciendo el volumen de grandes poros y su capacidad de infiltración (Bengough, 1991; Materechera, 2009). Soane *et al.* (1981) señalan que la compactación del suelo es responsable de la reducción de la conductividad hidráulica, la permeabilidad y la circulación del agua y el aire entre los poros del suelo. En la tabla 3 se pueden consultar los datos correspondientes a la densidad aparente del suelo y a la resistencia a la penetración que son algo más elevados en las rodadas de tractor. Por lo tanto, es de esperar que la escorrentía actúe con mayor rapidez y en mayor cantidad que en el caso de los sectores que no han sido pisados por la maquinaria agrícola. Estos presentan una mayor porosidad como consecuencia de la abundancia y disposición de los agregados.

Tabla 4. Escorrentía y tasas de erosión según intensidad de precipitación.

Intensidad precipitación	Rodadas de tractor			Interrills		
	Escorrentía mm h ⁻¹	C. escorr. %	T. erosión g m ² h ⁻¹	Escorrentía mm h ⁻¹	C. escorr. %	T. erosión g m ² h ⁻¹
Baja <35 mm h ⁻¹	3.5 (±1.3)	6.7 (±3.4)	8.7 (±8.4)	4.7 (±2.4)	8.8 (±5.6)	13.4 (±12.3)
Media 35-60 mm h ⁻¹	9.8 (±3.8)	14.5 (±6.6)	11.5 (±8.3)	7.2 (±5.1)	7.0 (±4.0)	13.7 (±13.5)
Alta >60 mm h ⁻¹	27.7 (±1.6)	31.2 (±6.7)	51.5 (±8.9)	26.1 (±22.3)	23.2 (±13.1)	49.4 (±43.8)

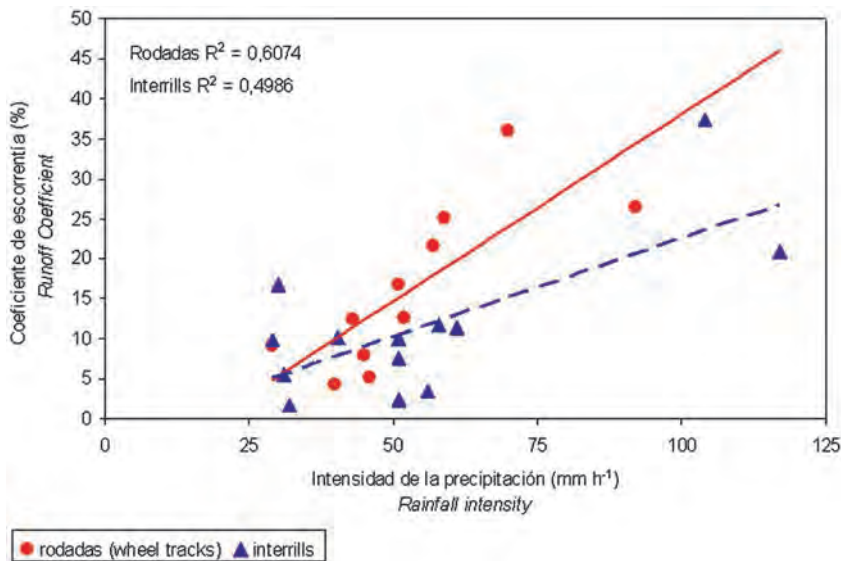


Figura 3. Relaciones entre las intensidades de precipitación y coeficientes de escorrentía.

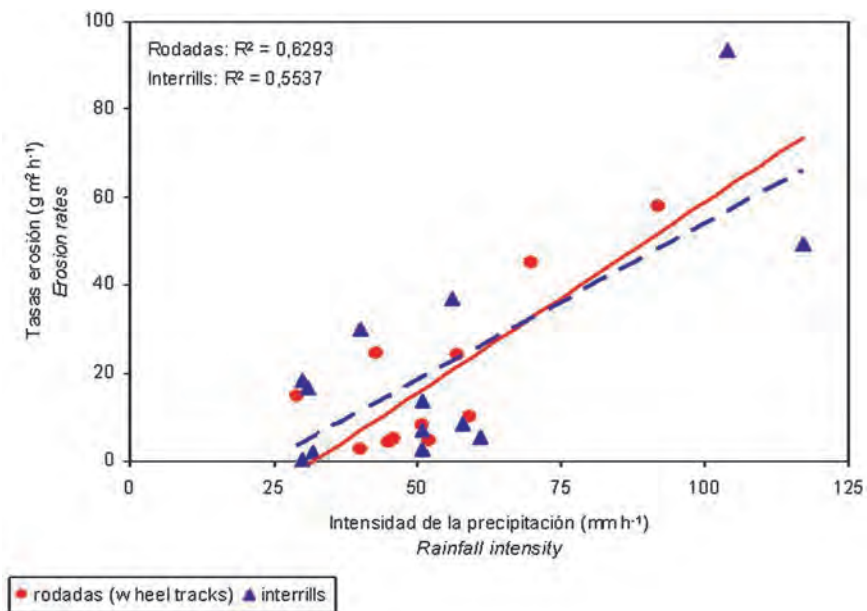


Figura 4. Relaciones entre la intensidad de las precipitaciones y las tasas de erosión.

4.3. Tasas de erosión

Las tasas medias de erosión también se incrementan con la intensidad de las precipitaciones (tabla 4 y fig. 4), pasando de $8.7 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, con intensidades bajas ($<35 \text{ mm h}^{-1}$) a $51.5 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, con intensidades altas ($>60 \text{ mm h}^{-1}$), en el caso de las rodadas. Lo mismo sucede en las áreas de interrills: $13.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para tormentas de $<35 \text{ mm h}^{-1}$ y $49.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para tormentas de $>60 \text{ mm h}^{-1}$. En la fig. 4 se observa que las tasas de erosión son ligeramente superiores en las áreas interrills con precipitaciones de baja y moderada intensidad. Por el contrario, con intensidades altas las tasas de erosión son ligeramente superiores en las zonas con rodadas de tractores ($51.5 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ frente a $49.4 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Sin embargo, tendríamos que concluir que no se manifiesta una marcada diferencia entre los dos grupos, al menos la que cabría esperar como consecuencia del comportamiento de la escorrentía. Es probable que, en las zonas afectadas por las ruedas de los tractores, el apelmazamiento del suelo reduzca la disponibilidad de sedimentos, de modo que, aunque hay una relativa cantidad de escorrentía superficial, no se produce un proporcional arranque de sedimentos. En el caso de las zonas sin rodada, sí habría una mayor cantidad de sedimentos en condiciones de ser transportados. No obstante, la capacidad de infiltración de los suelos reduce la disponibilidad de agua superficial y su capacidad para movilizar partículas.

4.4. Relación escorrentía y tasas de erosión

La relación entre los coeficientes de escorrentía y las tasas de erosión reafirma lo dicho en los apartados anteriores (fig. 5). Con los mismos coeficientes de escorrentía, las

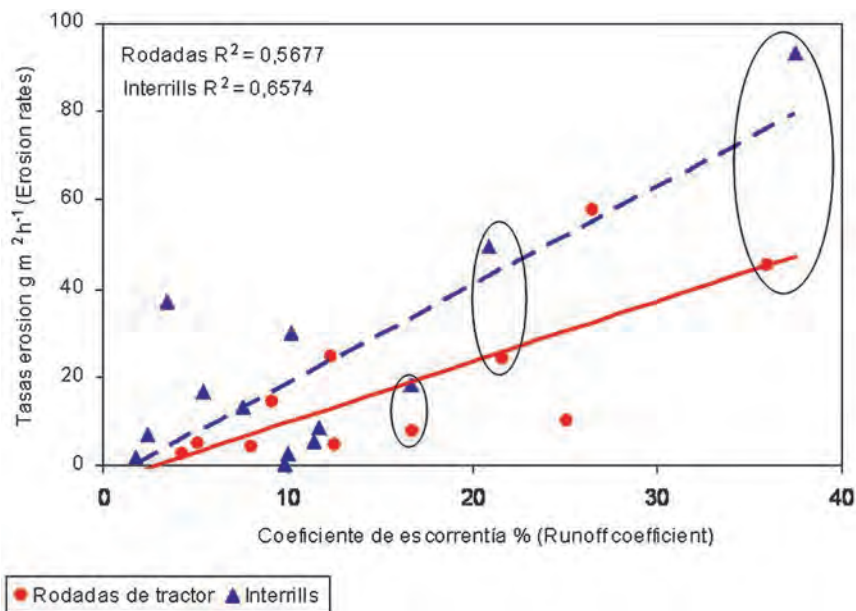


Figura 5. Relaciones entre los coeficientes de es correntía y tasas de erosión.

áreas de rodadas de tractor generan mucha menos movilización de sedimentos. Por mostrar algún ejemplo, con un coeficiente de es correntía del 16.8%, ocasionado por una precipitación de intensidad media, en el caso de las rodadas, se genera una tasa de erosión de $8\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$; en el caso de las áreas de interrills, con este mismo coeficiente de es correntía, se alcanzan los $18.2\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$. Si el coeficiente de es correntía es propio de una tormenta de alta intensidad, con un valor del 36%, en las rodadas la producción de sedimentos es de $45.2\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$ mientras que en los interrills es de $93.2\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$. El apelmazamiento del suelo por las rodadas reduce las posibilidades de disponibilidad de sedimentos.

Para disponer de información comparativa se han relacionado los resultados de es correntía y tasas de erosión obtenidos en rodadas de tractor e interrills de parcelas cultivadas con viñedos y otros tipos de usos del suelo. La metodología empleada ha sido la de la simulación de lluvia, con intensidades de precipitación en torno a los $55\ m\ h^{-1}$. En la tabla 5 y en la fig. 6 se incluyen los datos. En campos en pendiente y bancales se observa que la es correntía supera el 25% del agua precipitada. Por el contrario, en viñedos los porcentajes se muestran mucho más moderados: 11.4% para interrills y 16.1% para rodadas. Las tasas de erosión son más elevadas en los campos en pendiente ($29.8\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$) y viñedos, especialmente en las áreas interrills ($21.8\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$), y se muestran más moderadas en los bancales ($11.9\ g\ m^{-2}\ h^{-1}$).

A partir de esta información se comprueba que las áreas de interrills en los viñedos generan una menor es correntía (11.4%), aunque producen una importante cantidad de sedimentos al disponer de suficiente material suelto para poder ser transportado. En los

bancales, las tasas de erosión son más moderadas con valores medios de $11.9 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Este comportamiento está relacionado con la importante cubierta herbácea o de matorral que cubre los suelos de los bancales. Los campos en pendiente aportan los datos más elevados en cuanto a generación de escorrentía y producción de sedimentos. El valor medio del coeficiente de escorrentía alcanza el 30% y la tasa de erosión media ha sido calculada en $29.8 \text{ g m}^{-2} \text{ ha}^{-1}$. Algunas de estas parcelas están muy degradadas, con escasa cubierta vegetal y procesos de erosión muy activos.

Tabla 5. Resultados principales de las simulaciones de lluvia para diferentes usos del suelo.

	Nº simulaciones	Intensidad Precipitación	Coefficiente escorrentía (%)	Tasa erosión ($\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
Viñedos rodadas	11	53.2 (± 16.8)	16.1 (± 10.0)	18.2 (± 18.3)
Viñedos interrills	12	54.7 (± 27.4)	11.4 (± 9.51)	21.8 (± 26.0)
Bancales	12	61.9 (± 11.5)	26.2 (± 17.3)	11.9 (± 6.7)
Campos en pend.	60	53.4 (± 4.9)	29.9 (± 28.4)	29.8 (± 39.9)

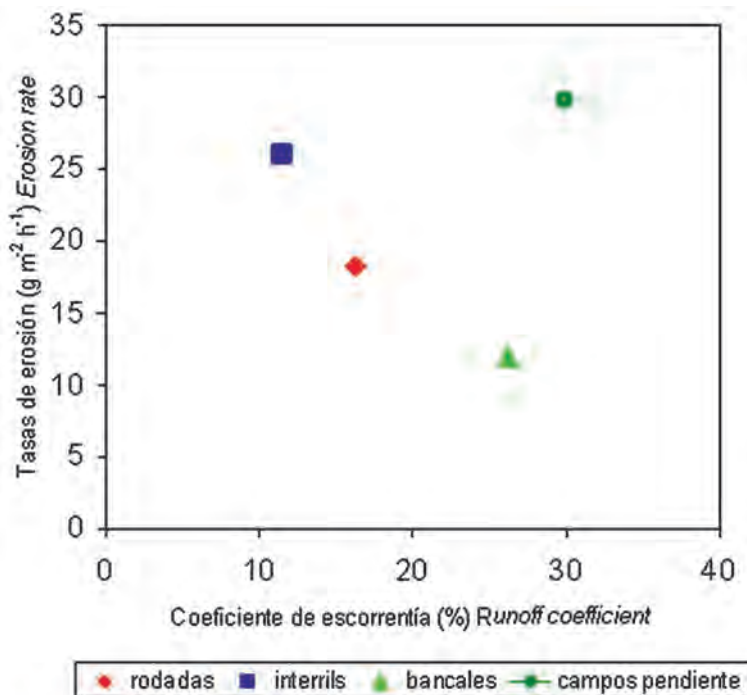


Figura 6. Tasas de erosión y coeficientes de escorrentía en diferentes usos del suelo.

5. Conclusiones

Los suelos cultivados con viñedos en La Rioja ocupan una importante superficie en laderas de una relativa pendiente. Dado que estos cultivos están orientados a la comercialización de la uva para la producción de vino, con una elevada rentabilidad, los campos son sometidos a diferentes tareas con maquinaria, especialmente con tractores. El peso de esta maquinaria inscribe rodadas en la superficie del suelo en dirección de la máxima pendiente que tienen consecuencias en la generación de escorrentía y producción de sedimentos. De hecho, la compactación del suelo por maquinaria empeora la calidad de los suelos, al reducir la infiltración y la capacidad de retención de agua, incrementa la escorrentía y plantea problemas a la producción agrícola (Way *et al.*, 2005). Según Botta *et al.* (2006), la relevancia de este problema estaría principalmente relacionada con las condiciones iniciales del suelo, la presión de inflado y anchura de las ruedas de los tractores y la intensidad de circulación. Con respecto a este último aspecto, se ha comprobado que causa un mayor nivel de compactación el primer paso de las ruedas del tractor que los sucesivos (Soane, 1980; Botta *et al.*, 2009). Es de esperar, pues, que con estas condiciones la escorrentía actúe con mayor rapidez y en mayor cantidad en estos sectores que en aquellos otros que carecen de rodadas.

A partir de simulaciones de lluvia realizadas con diferentes intensidades de precipitación se ha comprobado que la escorrentía es más alta en las rodadas de los tractores. Desde un punto de vista de la producción de sedimentos, especialmente de la procedente del impacto de las gotas de lluvia (que es la que realmente registra una simulación de lluvia de las características aplicadas en este trabajo), el papel de las rodadas es más limitado. De hecho, las tasas de erosión con simulaciones de lluvia son ligeramente inferiores a las registradas en áreas sin rodadas en tormentas de baja y media intensidad, lo que se justifica con toda probabilidad por la falta de disponibilidad de sedimento como consecuencia del apelmazamiento del suelo.

A escala de ladera las rodadas pueden canalizar la escorrentía favoreciendo el desarrollo de rigolas, aunque realmente desde un punto de vista de la producción de sedimentos se muestran mucho más activos procesos como el arroyamiento laminar. Las incisiones y rigolas –incluso cárcavas–, que aparecen con tormentas de elevada intensidad, se desarrollan aprovechando más la micro-red de drenaje, muchas veces oculta por las labores agrícolas, que las rodadas de los vehículos.

Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación INDICA (CGL2011-27753-C02-01 y -02), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

Referencias bibliográficas

- BENGOUGH, A. G. (1991). The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth. En: *Soil Analysis. Physical Methods* (Smith, K. A., Mullins, C. E., Eds.). Marcel Dekker, pp. 431-445, New York.

- BOTTA, G., JORAJURÍA, D., ROSATTO, H., FERRERO, C. (2006). Light tractor frequency on soil compaction in the rolling Pampa region of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 86: 14-19.
- BOTTA, G., TOLON BECERRA, A., BELLORA TOURN, F. (2009). Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil & Tillage Research*, 103: 381-386.
- BOULAL, H., GÓMEZ-MACPHERSON, H., GÓMEZ, J. A., MATEOS, L. (2011). Effect of soil management and traffic on soil erosion in irrigated annual crops. *Soil & Tillage Research*, 115-116: 62-70.
- CERDÀ, A. (1999). Simuladores de lluvia y su aplicación a la Geomorfología. Estado de la cuestión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 25: 45-84.
- CERDAN, O., POESEN, J., GOVERS, G., SABY, N., LE BISSONNAIS, Y., GOBIN, A., VACCA, A., QUINTON, J., AUERSWALD, K., KLIK, A., KWAAD, F., ROXO, M. J. (2006). Sheet and rill erosion. En: *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons, pp. 501-513.
- COTS FOLCH, R., MARTÍNEZ CASASNOVAS, J. A., RAMOS, M. C. (2009). Agricultural trajectories in a Mediterranean mountain region (Priorat. NE Spain) as a consequence of vineyard conversion plan. *Land Degradation and Development*, 20 (1-13).
- FERNÁNDEZ ALDANA, R., LOPO, L., RODRÍGUEZ, R. (1989). *Mapa forestal de La Rioja*. Instituto de Estudios Riojanos, 72 pp. + 1 mapa a escala 1:100.000, Logroño.
- FOSTER, I. D. L., FULLEN, M. A., BRANDSMA, R. T., CHAPMAN, A. S. (2000). Drip-screen rainfall simulators for hydro and pedo-geomorphological research: the Coventry experience. *Earth Surf. Process. Landforms*, 25 (7): 691-707.
- GARCÍA-RUIZ, J. M. (2010). The effect of land uses on soil erosion in Spain: a review. *Catena*, 81: 1-11
- GARCÍA-RUIZ, J. M., LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (2009). *La erosión del suelo en España*. Sociedad Española de Geomorfología, 441 pp., Zaragoza.
- JULIÁN, A., PEÑA, J. L. (2007). Las acumulaciones cuaternarias en el sector occidental de la Depresión del Ebro. En: *Espacios Naturales y Paisajes en La Rioja* (Arnáez, J., García Ruiz, J. M. Eds.). Instituto de Estudios Riojanos, pp. 63-71, Logroño.
- KANG, S., ZHANG, L., SONG, X., ZHANG, S., LIU, X., LIANG, Y., ZHENG, S. (2001). Runoff and sediment loss responses to rainfall and land use in two agricultural catchments on the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes*, 15: 977-988.
- LOUW, P. J. E., BENNI, A. T. P. (1991). Soil surface condition effects on runoff and erosion from selected vineyard soils. En: *Proceedings of the Conference on Cover Crop for Clean Water*, Jackson Tennessee, pp. 25-26.
- MARTÍNEZ-MENA, F., ABADÍA, R., CASTILLO, V., ALBADALEJO, J. (2001). Diseño experimental mediante lluvia simulada para el estudio de los cambios en la erosión del suelo durante la tormenta. *Cuaternario y Geomorfología*, 15: 31-43.

- MATERECHERA, S. A. (2009). Tillage and tractor traffic effects on soil compaction in horticultural fields used for peri-urban agriculture in a semi-arid environment of the North West Province, South Africa. *Soil & Tillage Research*, 103: 11-15.
- NAVAS, A., ALBERTO, F., MACHÍN, J., GALÁN, M. (1990). Design and operation of a rainfall simulator for field studies on runoff and soil erosion. *Soil Technology*, 3: 385-397.
- RACLOT, D., LE BISSONNAIS, Y., LOUCHART, X., ANDRIEUX, P., MOUSSA, R., VOLTZ, M. (2009). Soil tillage and scale effects on erosion from fields to catchment in a Mediterranean vineyard area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134: 201-210.
- SOANE, B. D. (1980). The role of field traffic studies in soil management research. *Soil Tillage & Research*, 1: 205-237.
- TONIETTO, J., CARBONNEAU, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing region worldwide. *Agr. Forest Meteorol.*, 124: 81-97.
- UTRILLA, P., RODANES, J. M. (1997). La actuación del hombre sobre el paisaje durante la Prehistoria en el valle medio del Ebro. En: *Acción humana y desertificación en ambientes mediterráneos* (García-Ruiz, J. M., López García, P., Eds.). Instituto Pirenaico de Ecología, pp. 61-98, Zaragoza.
- VAN DIJCK, S. J. E., VAN ASCH, W. J. (2002). Compaction on loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil & Tillage Research*, 63: 141-153.
- VAN HUYSTEEN, L. (1988). Soil preparation and grapevine root distribution –a qualitative and quantitative assessment. En: *The Grapevine Root and Its Environment. Technical Communication*, 125, pp. 1-15, Pretoria.
- WAY, T., ERBACH, D., BAILEY, A., BURT, E., JOHNSON, E. (2005). Soil displacement beneath an agricultural tractor drive tyre. *J. Terramech.*, 2005: 35-46.