

EFFECTOS DEL PASTOREO EN CLIMA MEDITERRÁNEO ÁRIDO SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

L. FERNÁNDEZ-POZO, T. BUYOLO y J. CABEZAS

Grupo de Investigación de Análisis de Recursos Ambientales. Facultad de Ciencias. Universidad de Extremadura. 06006. Badajoz. España.

Abstract: The deterioration of a soil's physical properties leads to the breakdown of pedogenic processes and the consequent degradation of the soil. In an arid environment, this can end in desertification. We here describe, in the IV Region of Chile, the impact of grazing by comparing plots of land subjected to a grazing load of 25 goats ha⁻¹ with plots excluded from grazing. Main climatic characteristics are: marked variability of rainfall (mean ca. 140 mm), maxima temperature of 28 °C in summer and minima of 6 °C in winter, and annual evapotranspiration in excess of 900 mm. Plant community consists of shrub (*Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa*, and *Heliotropium stenophyllum*) and grassland (*Bromus berterianus*, *Plantago hipidula* and *Erodium cicutarium*). The predominant soil is a Typic Camborthid. Grazed plots showed increased soil water content, available water-holding capacity, bulk density, microporosity, and penetration resistance, and decreased total porosity. In particular, the greater available water-holding capacity of the grazed plots corresponded to 22 % more water available for the vegetation, but the greater bulk density and penetration resistance and the lower total porosity were indicators of the soil's physical deterioration, with macroporosity being the most markedly affected, its reduction being by more than 60%.

Key words: Arid climate, Bulk density, Grazing, Penetration resistance, Porosity

Resumen: El deterioro de las propiedades físicas del suelo conduce a la ruptura de los procesos edáficos y, consecuentemente, a la degradación del suelo que, en zonas de clima árido da lugar al desencadenamiento de procesos de desertificación. En este trabajo, realizado en la IV Región de Chile, se describe el impacto del pastoreo mediante la comparación de áreas pastoreadas con una carga de 25 cabras ha⁻¹ con otras excluidas. Las principales características climáticas son: marcada variabilidad en las precipitaciones (media anual de 140 mm), temperaturas medias máximas de 28 °C en verano y medias mínimas de 6 °C en invierno, así como una ETP anual que excede los 900 mm. La comunidad vegetal está constituida por arbustos, cuyos principales representantes son *Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa* y *Heliotropium stenophyllum*, y herbáceas, *Bromus berterianus*, *Plantago hipidula* y *Erodium cicutarium* que se asientan sobre Camborthid típico. Las zonas sometidas a pastoreo muestran un incremento en humedad, capacidad de almacenamiento de agua útil, densidad aparente, microporosidad y resistencia a la penetración, así como disminución de la porosidad total. Si bien la capacidad de almacenamiento de agua útil es un 22 % mayor en las áreas pastoreadas, el incremento de la densidad aparente y de la resistencia a la penetración, así como la disminución de la porosidad total en esas áreas, son indicadores del deterioro de las propiedades físicas del suelo, siendo la macroporosidad el parámetro más afectado con una reducción superior al 60 %.

Palabras clave: Clima árido, Densidad aparente, Pastoreo, Porosidad, Resistencia a la penetración

INTRODUCCIÓN

En la actualidad una de las principales amenazas que se ciñen sobre ecosistemas de zonas templadas, y en particular sobre los mediterráneos, es su sobreutilización por parte de herbívoros bien sean silvestres o domésticos (Holechek *et al.*, 2003). Este sobrepastoreo constituye un problema de tal envergadura, que ha obligado a acuñar el término sostenibilidad el cual implica que cualquier actuación sobre un ecosistema debe realizarse de forma que se posibilite el que éste mantenga su funcionalidad en el tiempo (Bakkes *et al.*, 1994). La degradación de un ecosistema es un proceso paulatino que empieza con la pérdida de biodiversidad, sigue con la disminución de cobertura vegetal y termina afectando al suelo, el cual no puede realizar sus funciones ecológicas. Esto puede implicar una restauración tan lenta, costosa e incierta que en la práctica hace que el ecosistema no sea sostenible (Keeney, 1999), ya que el suelo es un recurso natural no renovable a escala de tiempo humana (Jenny, 1980). El conjunto de atributos del suelo inciden sobre la respuesta de éste sobre el resto de los componentes del sistema, así como su capacidad para funcionar (Larson y Pierce, 1991). Constanza *et al.*, (1992) indican que un ecosistema se encuentra en buen estado si es activo, mantiene su organización y autonomía a lo largo del tiempo y es resiliente al estrés. Un sistema se encuentra en equilibrio global cuando cumple sus funciones; proporcionar un medio para el desarrollo de la vegetación; regular y distribuir el flujo y movimientos del agua y nutrientes; almacenar nutrientes y permitir el ciclo de los mismos; filtrar, almacenar, inmovilizar y detoxificar elementos tóxicos; permitir el desarrollo radicular y proporcionar resistencia frente a procesos de degradación del suelo (Doran y Parkin 1994; Karlen *et al.*, 1997; Shukla *et al.*, 2006). Según Doran y Parkin (1994), la capacidad del suelo para sostener el desarrollo de los vegetales se debe a sus propiedades físicas

(porosidad, capacidad de almacenamiento de agua, textura, estructura y resistencia a la penetración), así como de sus propiedades químicas. Un suelo con buenas propiedades físicas va a proporcionar al ecosistema un equilibrio entre los aportes y las transformaciones que tienen lugar en él, y del mismo modo al resto de componentes, flora y fauna. Por el contrario, unas propiedades físicas deficientes conducen a la degradación del suelo y, por ende, del ecosistema que bajo determinadas condiciones tanto climáticas como de uso pueden conducir a la aparición de procesos de desertificación. El Convenio de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (Rubio, 2005) define esta como la degradación de tierras en zonas áridas, semiáridas y subhúmedo secas como resultado de factores tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas, estableciendo que la degradación tiene lugar al deteriorarse, entre otros, las propiedades físicas del suelo (Paza *et al.*, 2006).

Especialistas como Oldeman (1994) señalan que a finales del pasado siglo las actividades humanas han provocado una degradación del 40% de las tierras y que el 6% posee tal grado que la inversión económica necesaria para recuperarlas no es rentable. Numerosos autores indican el sobrepastoreo como causa de la degradación de las tierras, incidiendo notablemente en el deterioro de las propiedades físicas del suelo; densidad aparente, textura y resistencia a la penetración (da Silva *et al.*, 2003) y en la pérdida de biodiversidad (Oba y Kaitira, 2006), siendo sus efectos más destacados la exposición de las áreas afectadas a procesos erosivos, tanto hídricos (Valentin *et al.*, 2005) como eólicos (Li *et al.*, 2005), la compactación del terreno (McEvoy *et al.*, 2006), la degradación de la cubierta vegetal (Mainland, 2006; Wiegand *et al.*, 2006) y la disminución del contenido en materia orgánica (Abril y Bucher, 2001; Evrendilek *et al.*, 2004), procesos que en zonas de clima árido, semiárido o subhúmedo seco, conducen a desertificación.

Nuestro objetivo es analizar los efectos que el pastoreo, concretamente caprino, provoca sobre las propiedades físicas de suelos en clima árido mediterráneo, tomando como referencia áreas excluidas y comparándolas con zonas pastoreadas. Ello nos permitirá disponer de mayor información a la hora de establecer la capacidad de carga en estos ecosistemas como base de una gestión sostenible, ya que un sobrepastoreo en estos ecosistemas conduce, irremediablemente, al desencadenamiento de procesos de desertificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la Estación Experimental de Zonas Áridas "Las Cardas", con una extensión de 5436 ha, y ubicada a 45 km al sur de La Serena, en la IV Región de Chile, entre 30°13' y 30°10' de latitud S y 71°13' y 71°19' de longitud W y una altitud media de 260 msnm. El clima es Mediterráneo, cuyas principales características son: marcada variabilidad anual de precipitaciones (9 - 440 mm anuales, media de 140 mm), estando concentradas en otoño e invierno (97 % del total); una temperatura media anual de 17 °C, con máximas medias de 28 °C in verano y mínimas medias de 6 °C in invierno, y una ETP anual que excede los 900 mm, lo cual nos sitúa en una ecosistema de clima árido (Thornthwaite, 1948).

La comunidad vegetal está representada por arbustos y herbáceas, aquellos con dominancia de *Flourensia thurifera*, *Gutierrezia resinosa*, y *Heliotropium stenophyllum*, especies endémicas de Chile, siendo las herbáceas más representativas *Bromus berterianus*, *Plantago hipidula* y *Erodium cicutarium*.

Bajo estas condiciones se desarrollan suelos de textura francoarenosa, ligeramente alcalinos y escasa fertilidad química cuyo principal representante es Camborthid típico (Soil Survey Staff 1998).

Nuestro estudio fue llevado a cabo en áreas excluidas (ExU) al pastoreo durante 30 años con extensiones de 1 ha y en áreas pastoreadas (GrU) con la misma extensión y una carga de 25 cabras ha-1 sin empleo de fertilizantes.

Muestreo y analítica

Se seleccionaron 8 parcelas, 4 pastoreadas y 4 excluidas. Durante Julio y Agosto de 2005, 2006 y 2007 se tomaron en cada periodo y en cada parcela 5 muestras inalteradas de suelo, de 5 cm de diámetro en los primeros 30 cm de suelo.

Previo a la toma de muestras se determinó la resistencia a la penetración, PR, con un penetrómetro (Eijkelkamp, Giesbeek, The Netherlands) provisto de un cono de 1 cm² de sección y la humedad del suelo, WC, con una sonda Theta probe (Delta-T Devices, HH2, Cambridge, UK). Las muestras se secaron en estufa a 105 °C hasta conseguir peso constante y se determinó la densidad aparente, BD (Blake y Hartge 1986), retención de agua a capacidad de campo, WCHC (Klute y Dirksen 1996). Las muestras fueron pasadas por un tamiz de 2 mm y se determinó textura (Doran y Jones 1996) y retención de agua a punto de marchitez, SWPW, (Klute y Dirksen 1996). Como valor de referencia de densidad real se tomó 2.65 Mg m⁻³ (Doran y Jones 1996; Hillel 1998; Shukla *et al.*, 2006). Los valores de las determinaciones indicadas se utilizaron para el cálculo de otros parámetros; capacidad de almacenamiento de agua útil, AWHC, porosidad total, TP, microporosidad, mP, y macroporosidad, MP (Doran y Jones 1996; Hillel 1998).

Análisis estadístico

Los datos analíticos se analizaron estadísticamente con el paquete informático SPSS 15.0 para Windows, utilizándose el test no paramétrico de Mann-Whitney para establecer si existen diferencias entre los parámetros edáficos obtenidos en función del uso (parcelas ex-

cludidas y pastoreadas). Posteriormente se obtuvieron las matrices de correlación entre los parámetros estudiados para unas y otras, utilizándose para ello el coeficiente de correlación no paramétrico de Spearman.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han comparado los valores medios de las variables estudiadas, en función del uso, excluido versus pastoreado, tabla 1. Las tablas 2 y 3 muestran las matrices de correlación entre los parámetros considerados para ambos usos.

TABLA 1. Propiedades físicas analizadas. ExU, parcelas excluidas; GrU, parcelas pastoreadas; CL, arcilla; SI, limo; SA, arena; WCHC, capacidad de almacenamiento de agua a capacidad de campo; SWPW, capacidad de almacenamiento de agua a punto de marchitez; AWHC, capacidad de almacenamiento de agua útil; BD, densidad aparente; MP, macroporosidad; mP, microporosidad; TP, porosidad total; WC, humedad del suelo; PR, resistencia a la penetración.

	CL(%)	SI(%)	SA(%)	WCHC(mm)	SWPW(mm)	AWHC(mm)***
ExU	9.12±1.85	22.94±4.93	67.93±4.01	17.71±1.42	6.45±0.52	45.41±5.26
GrU	10.56±3.14	23.91±4.33	65.53±4.12	18.56±1.45	6.97±0.79	55.63±5.25
	BD(Mgm ⁻³)***	MP(%)***	mP(%)**	TP(%)***	WC(%)***	PR(kPa)*
ExU	1.36±0.19	24.49±9.92	23.88±3.03	48.36±7.24	3.31±0.72	582±150
GrU	1.60±0.11	9.19±6.39	29.73±3.00	38.92±4.03	5.02±0.57	676±114

* diferencia significativa a p<0.05

** diferencia significativa a p<0.01

*** diferencia significativa a p<0.001

TABLA 2. Matriz de correlación de Spearman para ExU.

ExU	AWHC	BD	TP	MP	mP	WC
BD	.677*					
TP	-.767**	-.917**				
MP	-.768**	-.899**	.986**			
mP	.916**	.675*	-.838**	-.853**		
WC	.225	.309	-.022	-.011	-.032	
PR	.660*	.779**	-.711**	-.685*	.503	.399

* correlación a p<0.05

** correlación a p<0.01

*, correlación a p<0.05; **, correlación a p<0.01.

Tabla 3. Matriz de correlación de Spearman para GrU.

GrU	AWHC	BD	TP	MP	mP	WC
BD	.660*					
TP	-.692*	-.896**				
MP	.951**	.741**	.825**			
mP	.972**	.596*	-.664*	-.958**		
WC	-.595*	-.533	.391	.609*	-.641*	
PR	.175	.427	-.301	-.322	.203	-.627*

* correlación a p<0.05

** correlación a p<0.01.

*, correlación a p<0.05; **, correlación a p<0.01.

Ambos usos, excluido y pastoreado, muestran valores similares para arcilla, limo, arena, WCHC, y SWPW, sin embargo se comprueba un ligero incremento de WCHC y SWPW (5 y 8% respectivamente), y del 8% en el contenido de partículas finas, arcilla y limo en GrU. Esta observación también la indican Peco *et al.*, (2006) al comparar áreas pastoreadas y abandonadas de clima mediterráneo. Este ligero aumento, que no alcanza para establecer diferencias significativas, es suficiente para que el resto de parámetros sí las presenten, AWHC, BD, TP, MP, mP, WC, y PR.

AWHC muestra diferencia ($p < 0.001$), entre ExU y GrU, siendo mayor en estas debido al aumento de las fracciones finas del suelo y probablemente, como también indican los mismos autores, a las heces del ganado por su aporte de materia orgánica al incrementar la capacidad de retener agua y favorecer la agregación de las partículas de suelo. Una mayor AWHC en zonas áridas va a suponer ventaja en momentos de stress hídrico y estos están presentes ampliamente a lo largo del año. La matriz de correlaciones nos muestra que en ExU, AWHC se relaciona de forma positiva con BD ($p < 0.05$), mP ($p < 0.01$), y PR ($p < 0.05$) y negativa ($p < 0.01$) con TP y MP. En GrU encontramos similares resultados, si bien en estas la correlación con TP es a $p < 0.05$, desaparece la correlación con RP y aparece con WC ($p < 0.05$), siendo esta negativa. Estos parámetros muestran diferencias significativas entre ExU y GrU, como ya se tratará más adelante, por lo que podemos establecer las dependencias entre AWHC y TP, MP, y BD que aparecen en áreas áridas, las cuales han sido también encontradas por otros autores en clima mediterráneo (Evrendilek *et al.*, 2004).

El mayor contenido en partículas finas, y sobre todo el pisoteo del ganado, provocan que en GrU BD sea mayor, en nuestro caso a $p < 0.001$, reflejándose en menor TP ($p < 0.001$). Esta situación queda patente en la bibliografía (Drewry y Paton, 2000; Daniel *et al.*, 2003;

Pietola *et al.*, 2005; Kurz *et al.*, 2006), al estudiar los efectos del pastoreo sobre TP. La disminución de TP conduce, entre otros, al incremento de erosión hídrica laminar, disminución de la infiltración (Pietola *et al.*, 2005), y de MP (Singleton *et al.*, 2000).

Los macroporos son responsables de la infiltración, drenaje de agua, transporte de solutos, y aireación del suelo (Doran y Jones, 1996; McLaren y Cameron, 1996; Hillel, 1998). Nosotros encontramos una gran disminución en el volumen de macroporos, pasando de 24.5% en ExU y a 9.2% en GrU y ($p < 0.001$), lo que supone una reducción muy superior al doble. Pietola *et al.* (2005) no encuentran diferencias significativas en la macroporosidad de suelos franco arenosos de Finlandia tras 7 meses sin pastorear, mientras que Kurtz *et al.* (2006), en suelos franco arenosos de Irlanda, indican diferencias significativas entre zonas pastoreadas con pisoteo y zonas pastoreadas en las que se impide el paso del animal, estableciendo una disminución de MP en las zonas con pisoteo del 65%. La disminución de MP que observamos en GrU queda patente en un incremento del 22 % en AWHC.

Los microporos son los responsables de la retención de agua y solutos (Hillel, 1998). En nuestro estudio encontramos menor volumen de microporos ($p < 0.001$) en ExU, estando dominando el espacio poroso de GrU por microporos (30% frente a un 24% en ExU), por lo que la probabilidad de padecer situaciones de anaerobiosis es mayor en GrU plots.

WC difiere ($p < 0.01$) entre GrU y ExU (50.2 gkg^{-1} y 33.1 gkg^{-1} respectivamente). En estas condiciones de humedad PR es 582 kPa en ExU frente a 676 kPa en GrU plots ($p < 0.05$), diferencia que también reportan otros autores (Chanasky y Naeth, 1995; Mapfumo *et al.*, 1999; Rodd *et al.*, 1999). Vazquez *et al.* (1991) indican que los parámetros edáficos que más directamente están relacionados con PR son WC y BD y Rodd *et al.* (1999) indican que PR

es más sensitiva que BD en sistemas pastoreados, nosotros encontramos en GrU que PR sólo se correlaciona con WC y es negativa ($p < 0.05$), relación que también es mencionada por otros autores (Watts *et al.*, 1996; Becher, 1998; Vaz y Hopmans, 2001; Utset y Cid, 2001; Zhang *et al.*, 2001).

Kurtz *et al.* (2006) no encuentran correlación significativa entre RP y WC, y sugieren una correlación lineal entre PR y BD en áreas pisoteadas y no. Nosotros encontramos en ExU correlación positiva con BD ($p < 0.01$) y negativa con TP ($p < 0.01$) y MP ($p < 0.05$), como también indican Servadio *et al.* (2005).

La figura 1 presenta las relaciones entre las medias de PR y BD, WC, TP, y MP para ExU y GrU. El mayor ajuste lineal en GrU es a $r^2 = 0.922$ para MP, $r^2 = 0.870$ para WC, $r^2 = 0.856$ para BD, y $r^2 = 0.823$ para TP, mientras que en ExU es a $r^2 = 0.866$ para TP, $r^2 = 0.844$ para BD, y $r^2 = 0.821$ para MP, no apreciándose un comportamiento lineal en ExU entre PR y WC, como puede comprobarse en la figura citada ($r^2 = 0.245$).

Henderson *et al.* (1988) establecen un umbral de WC (70% de WCHC), por debajo del cual la incidencia de WC sobre PR es más notable. En nuestro caso WC en GrU representa el 27% de WCHC y en ExU el 19%. En estas no se correlacionan PR y WC ($p = 0.199$, $r^2 = 0.399$).

CONCLUSIONES

Toda actividad humana supone un impacto sobre el ecosistema donde se asienta y el efecto, que sobre sus componentes provoca, está estrechamente ligado a las características de manejo. Nuestro estudio, centrado en establecer los cambios que tienen lugar en las propiedades físicas del suelo al pastorear zonas de clima árido Mediterráneo, pone de manifiesto un incremento de BD y PR así como la disminución de TP y MP. Estos cambios podemos atribuirlos tanto al efecto del pisoteo de los animales como a la incorporación al suelo de sus

deyecciones, siendo esta la única entrada externa al sistema de materia orgánica.

Los cambios observados expresan aspectos positivos y negativos en relación a la calidad del suelo. El déficit hídrico en ecosistemas áridos representa la mayor limitación para el desarrollo y mantenimiento de la vegetación. En este sentido las zonas pastoreadas, en nuestra área de estudio, disponen de mayor AWHC y ello es debido a la textura, que si bien no acusa diferencia significativa, el ligero aumento de partículas finas unido a la disminución del espacio poroso y el predominio en este de los microporos, posibilita que en esas zonas se disponga de un 22 % más de agua útil para la vegetación. La matriz de correlaciones nos indica la estrecha relación, tanto en GrU como en ExU, entre agua útil y microporosidad ($p < 0.01$).

Nuestros datos sugieren un deterioro en BD, TP, MP, y PR en GrU. Creemos que el efecto del pisoteo es determinante en ellas, alcanzándose un incremento del 18% en BD y disminución del 20% y 62% en TP y MP respectivamente, resultando ser MP el parámetro físico más afectado por efecto del pastoreo. La acción conjunta de estos parámetros supone un incremento de PR en GrU del 16%. Precisamente el parámetro que más incide sobre PR en ExU es BD ($p < 0.01$, $r^2 = -0.917$), y WC ($p < 0.05$, $r^2 = -0.627$) en GrU. La tendencia lineal que más se ajusta en ExU con PR es TP ($r^2 = 0.866$), mientras que en GrU es MP ($r^2 = 0.922$). En relación a PR, y a tenor de los resultados, podríamos establecer un umbral mínimo de WC. Por debajo, sobre PR incidirían BD, MP, y TP y por encima predominaría el efecto de WC.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por el Plan Nacional I+D+I 2004–2007 a través del Proyecto CGL2004–01285. Queremos expresar nuestro agradecimiento a la Ingeniero Claudia Torres (Estación Experimental de Zonas

Áridas “Las Cardas” de Chile) por su colaboración en el trabajo de campo, así como a Asunción Díaz y Juan García (Laboratorio Agrario y de Residuos de Extremadura) por su ayuda en la parte analítica.

REFERENCIAS

- Abril, A. y Bucher, E. (2001): Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Applied Soil Ecology* 16, 243-249.
- Bachmann, J., Contreras, K., Hartge, K., MacDonald, R. (2006): Comparison of soil strength data obtained in situ with penetrometer and with vane shear test. *Soil & Tillage Research* 87, 112-118.
- Bakkes, J., Van der Born, G., Helder, J., Swart, R., Hope, C., Parker, J. (1994): An Overview of Environmental Indicators: State of the Art and Perspectives. Environmental Assessment Sub-Programme, UNEP, Nairobi.
- Becher, H. (1998): Resistances to penetration of aggregates from loess-driven topsoils at different soil water tensions. *Soil & Tillage Research* 47, 73-81.
- Blake, G. y Hartge, K. (1986): Bulk density, in: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*, Part I, second ed. Agronomy Monograph, Vol. 9. ASA, Madison, pp. 363-375.
- Chanasky, D. y Naeth, M. (1995): Grazing impacts on bulk density and penetrometer resistance in the foothills fescue grassland of Alberta, Canada. *Canadian Journal of Soil Science* 75, 551-557.
- Constanza, R., Norton, B., Haskell, B. (1992): *Ecosystem health: New goals for environmental management*. Island Press, Washington.
- da Silva, A., Imhoff, S., Corsi, M. (2003): Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. *Soil & Tillage Research* 70, 83-90.
- Daniel, J., Potter, K., Altom, W., Aljoe, H., Stevens, R. (2002): Long-term grazing density impacts on soil compaction. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 45, 1911-1915.
- Doran, J. y Jones, A. (1996): Methods for assessing soil quality. *SSSA Spec. Publ.* 49. ASA, Madison.
- Doran, J. y Parkin, T. (1994): Defining and assessing soil quality, in: Doran J., Coleman, D., Bezdicek, D., Stewart, B. (Eds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. *SSSA Spec. Publ.* 35. ASA, Madison, pp. 3-21.
- Drewry, J. y Paton, R. (2000): Effects of cattle treading and natural amelioration on soil physical properties and pasture under dairy farming in Southland, New Zealand. *NZ. J. Agric. Res.* 43, 377-386.
- Evrendilek, F., Celik, I., Kilic, S. (2004): Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grassland, and cropland ecosystems in Turkey. *Journal of Arid Environments* 59, 743-752.
- Henderson, C., Levett, A., Lisle, D. (1988): The effects of soil water content and bulk density on the compactability and soil penetration resistance of some Western Australian sandy soils. *Aust. J. Soil Res.* 26, 391-400.
- Hillel, D. (1998): *Environmental soil physics*. Academic Press, London, 771 p.
- Holechek, J., Pieper, R., Herbel, C. (2003): *Range Management. Principles and Practices*. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Jenny, H. (1980): *The Soil Resource: Origin and Behavior*. Ecological Studies, vol. 37. Springer-Verlag, New York.
- Karlen, D., Mausbach, M., Doran, J., Cline, R.,

- Harris, R., Schuman, G. (1997): Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4-10.
- Klute, A. y Dirksen, C. (1986): Hydraulic conductivity and diffusivity, in: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part I*, second ed. Agronomy Monograph, Vol. 9. ASA, Madison. pp. 687-734.
- Kurz, I., O'Reilly, C., Tunney, H. (2006): Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113, 378-390.
- Larson, W. y Pierce F. (1991): Conservation and enhancement of soil quality, in: *Proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*. International Board of Soil Research and Management. Bangkok. pp. 175-203.
- Li, F.-R., Kang L.-F., Zhang, H., Zhao, L.-Y., Shirato, Y., Taniyama I. (2005): Changes in intensity of wind erosion at different stages of degradation development in grasslands of Inner Mongolia, China. *Journal of Arid Environments* 62, 567-585.
- Mainland, I. (2006). Pastures lost? A dental microwear study of ovicaprine diet and management in Norse Greenland. *Journal of Archaeological Science* 33, 238-252.
- Mapfumo, E., Chanasky, D., Naeth, M., Baron, V. (1999): Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. *Can. J. Soil Sci.* 79, 191-199.
- McEvoy, P., Flexen, M., McAdam, J. (2006): The effects of livestock grazing on ground flora in broadleaf woodlands in Northern Ireland. *Forest Ecology and Management* 225, 39-50.
- McLaren, R. y Cameron, K. (1996): Soil Science: Sustainable Production and Environmental Protection. Oxford University Press, Auckland.
- Oba, G. y Kaitira, L. (2006): Herder knowledge of landscape assessments in arid rangelands in northern Tanzania. *Journal of Arid Environments* 66, 168-186
- Oldeman, L. (1994). The global extent of soil degradation, in: Greenland, D., Szabolcs, I. (eds.), *Soil resilience and sustainable land use*. CAB Int., Wallingford, pp. 99-118
- Peco, B., Sánchez, A., Azcárate, F. (2006): Abandonment in grazing systems: Consequences for vegetation and soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113, 284-294.
- Pietola, L., Horn, R., Yli-Halla, M. (2005): Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. *Soil & Tillage Research* 82, 99-108.
- Rodd, A., Papadoulous, Y., Lafflamme, L., McRae, K., Fillmore, S., Wilson, R. (1999): Effect of rotational grazing on selected physical properties of a gleyed Brunisolic Gray Luvisol loam in Nova Scotia. *Canadian Journal of Soil Science* 79, 117-125.
- Rubio, J. (2005): Influencia sobre los ecosistemas terrestres: Riesgo de degradación, in: *Simposio Internacional sobre el cambio climático, desde la ciencia a la sociedad*. Presidencia de la Generalitat Valenciana (ed.), Valencia. pp. 83-94.
- Servadio, P., Marsili, A., Vignozzi, N., Pellegrini, S., Pagliai, M. (2005): Effects on some soil qualities in central Italy following the passage of four wheels drive tractor fitted with single and dual tires. *Soil & Tillage Research* 84, 87-100
- Shukla, M., Lal, R., Ebinger, M. (2006): Determining soil quality by factor analysis. *Soil & Tillage Research* 87,

- 194-204.
- Singleton, P., Boyes, M., Addison, B. (2000): Effect of treading by dairy cattle on top soil physical conditions for six contrasting soil types in Waikato and Northland, New Zealand, with implications for monitoring. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 43, 559-567.
- Soil Survey Staff. (1998): *Keys to Soil Taxonomy*, 8th ed. USDA Natural Resources Conservation Service, US Government Printing Office, Washington.
- Thorntwaite, C. (1948): An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Utset, A. y Cid, G. (2001): Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil & Tillage Research* 61, 193-202.
- Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. (2005): Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63, 132-153.
- Vaz, C. y Hopmans, J. (2001): Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. *Soil Science Society of America Journal* 65, 4-12.
- Vazquez, L., Myhre, D., Hanlon, E., Gallaher, R. (1991): Soil penetrometer resistance and bulk density relationships after long-term no tillage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 22, 2101-2117.
- Watts, C., Dexter, A., Dumitru, E., Arvidsson, J. (1996): An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part I. A laboratory test. *Soil & Tillage Research* 37, 161-174.
- Wiegand, K., Saltz, D., Ward, D. (2006): A patch-dynamics approach to savanna dynamics and woody plant encroachment – Insights from an arid savanna. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 7, 229-242.
- Zhang, B., Zhao, Q., Horn, R., Baumgartl, T. (2001): Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil & Tillage Research* 59, 97-106.