

DEGRADACIÓN DEL SUELO Y MODIFICACIÓN DE LOS PAISAJES AGRÍCOLAS POR EROSIÓN MECÁNICA (TILLAGE EROSION)

S. DE ALBA¹, D. TORRI², L. BORSELLI², M. LINDSTROM³

¹ UCM, F. CC. Geológicas, Dpto. de Geodinámica, Ciudad Universitaria s/n, 28040 Madrid, Spain. E-mail: Sdealba@geo.ucm.es.

² CNR-IRPI, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Piazza delle Cascine 15, 50144 Firenze,.

³ USDA-ARS, N.C. Soil Conservation Research Laboratory, Morris, MN 56267, USA.

Abstract. Soil redistribution due to tillage practices has been identified as an intensive soil erosion process. The long-term effects of this intensive soil redistribution within agricultural fields have resulted in a drastic modification of the landscapes. This paper presents several cases of field features observed in agricultural fields of contrasted agronomical and environmental conditions in Central Spain, Tuscany (Italy) and Central Minnesota (USA). The reported field features are presented grouped according to the nature of the effects, into the following five classes: a) Landscape levelling and smoothing; b) Spatial variability of soil properties; c) Modification of morphology of slope profiles; d) Interactions with processes of water erosion; and, e) Spatial variability of productivity. Findings of this study reveal the importance of incorporating the process of soil redistribution by tillage into comprehensive models of soil erosion and hydrological process and the need to explore subsequent interactions and synergies.

Key words: Tillage erosion, soil redistribution, field evidence, soil variability, slopes morphology.

Resumen. La redistribución del suelo por arrastre mecánico durante las operaciones agrícolas de laboreo ha sido reconocido como un proceso *per se* de intensa degradación del suelo. Los efectos acumulados por las prácticas de laboreo realizadas en el pasado han dado lugar a una drástica transformación de los paisajes agrícolas. Se presentan diversos ejemplos de evidencias de campo de los efectos de la redistribución del suelo en paisajes agrícolas de condiciones agroambientales muy contrastadas, en el centro de España, la región Toscana (Italia) y la región central de Minnesota (USA). Las evidencias son agrupadas en cinco categorías: a) Erosión y nivelación del relieve; b) Variabilidad espacial del suelo, c) Modificación de la morfología de laderas; d) Interacción con los procesos de erosión hídrica; y, e) Aumento de la variabilidad espacial de la productividad agrícola. Los resultados revelan la importancia de incorporar los procesos de redistribución y erosión mecánica del suelo, en modelos integrales de erosión e hidrológicos, así como de estudiar las posibles interacciones y sinergias entre los distintos procesos.

Palabras clave: Erosión por laboreo, redistribución de suelo, evidencias de campo,

INTRODUCCIÓN

La redistribución del suelo por arrastre mecánico durante las operaciones agrícolas de laboreo ha sido reconocido como un proceso *per se* de intensa degradación del suelo (erosión mecánica o erosión por laboreo), que en último término da lugar a una profunda transformación de los paisajes edáficos, así como de la geomorfología e hidrología superficial de los paisajes agrícolas (ver una recopilación en Govers *et al.*, 1999). Los modelos empíricos actualmente disponibles en la literatura, que describen los mecanismos de redistribución mecánica del suelo, ponen de manifiesto que la mayoría de los aperos de labranza, comúnmente utilizados en muy diversas condiciones agronómicas, generan tasas de movilización de suelo muy elevadas (e.g., Lindstrom *et al.*, 1992; Govers *et al.*, 1999; De Alba, 2001; Torri *et al.*, 2002). Un ejemplo es el caso del laboreo con el apero convencional de vertedera, que produce la movilización de una capa continua de suelo de hasta 30 ó 40 cm de profundidad (según la profundidad de laboreo) que cubre toda la superficie del campo de cultivo. Una única pasada de vertedera, a una profundidad media de laboreo de 30 cm, da lugar a la movilización de un total de 4050 toneladas de suelo por hectárea labrada (considerando una densidad aparente del suelo de 1.35 g/cm³); mientras que si la profundidad de laboreo fuera de 40 cm la cantidad total de suelo movilizado ascendería a 5400 t/ha.

Como consecuencia de la intensidad del proceso, los efectos acumulados a medio y largo plazo han dado lugar a una drástica transformación de la dinámica física y biológica del suelo tanto en el interior de los campos de cultivo como a escala de ladera y de paisaje (Torri *et al.*, 2002; De Alba *et al.*, 2004). Una mejor comprensión de las implicaciones del proceso de

redistribución del suelo requiere del análisis y reinterpretación de los paisajes agrícolas actuales, con el objeto de identificar y caracterizar aquellos rasgos y evidencias de campo que hayan sido producidos como resultado acumulado de las prácticas de laboreo realizadas en el pasado, así como para documentar las implicaciones de tales transformaciones del paisaje sobre la morfología e hidrología de las laderas, procesos de erosión hídrica, variabilidad espacial de suelos, etc. En este trabajo se presentan diversos ejemplos de rasgos y evidencias de campo presentes en paisajes actuales que revelan los efectos acumulados de la redistribución del suelo ocasionada por las prácticas agrícolas realizadas en el pasado.

MATERIAL Y MÉTODOS

A modo de propuesta de clasificación, las evidencias de campo de redistribución y erosión mecánica del suelo son agrupadas en las siguientes cinco categorías según la naturaleza de los efectos que provocan: a) Erosión y nivelación del relieve; b) Variabilidad espacial del suelo; c) Modificación de la morfología de laderas; d) Modificación e interacción con los procesos de erosión hídrica; y, e) Variabilidad espacial de la productividad agrícola. A continuación, se presenta una descripción de cada tipo y se indican, en cada caso, una serie de referencias bibliográficas que ilustran de forma detallada los procesos y mecanismos de redistribución de suelo involucrados. Se presentan varios casos de estudio correspondientes a paisajes agrícolas de condiciones agroambientales muy contrastadas, de la zona central de España en Castilla-La Mancha, la región Toscana (Italia) y la región de los grandes lagos en Minnesota (Estados Unidos).

EVIDENCIAS DE REDISTRIBUCIÓN DEL SUELO POR LAS PRÁCTICAS DE LABOREO

Erosión y nivelación del relieve

La redistribución del suelo por el laboreo produce una progresiva erosión y rebajamiento del nivel de la superficie del suelo en las zonas de morfología convexa y tramos altos de las laderas; mientras que da lugar a la deposición de material y relleno de las zonas de morfología cóncava y tramos bajos de las laderas (Figura 1). En sectores de ladera de perfil rectilíneo tienen lugar elevadas tasas de transporte de suelo pero sin que se produzcan balances netos significativos de variación del nivel de la superficie del terreno; de tal modo que la capa de laboreo se comporta como una cinta transportadora de suelo, que lo transporta desde las partes altas de la ladera a las partes bajas. La intensidad

del proceso de transporte guarda relación directa con la pendiente local máxima, pero el balance final de pérdida o acumulación de material depende de la curvatura y morfología del terreno. Como resultado a medio y largo plazo la redistribución mecánica del suelo hace que el relieve original resulte progresivamente suavizado y nivelado (Lindstrom *et al.*, 1992; Govers *et al.*, 1999; De Alba, 2003). Otro rasgo fácilmente reconocible en el paisaje, se produce cuando en los campos de cultivo se sitúan obstáculos que interrumpen la trayectoria de laboreo (De Alba *et al.* 2006). Estos obstáculos, ya sean árboles aislados o postes de tendidos eléctricos o telefónicos, modifican los patrones espaciales de transporte de suelo dando lugar a modificaciones de la topografía alrededor de los obstáculos, tal como se ilustra en la Figura 2.

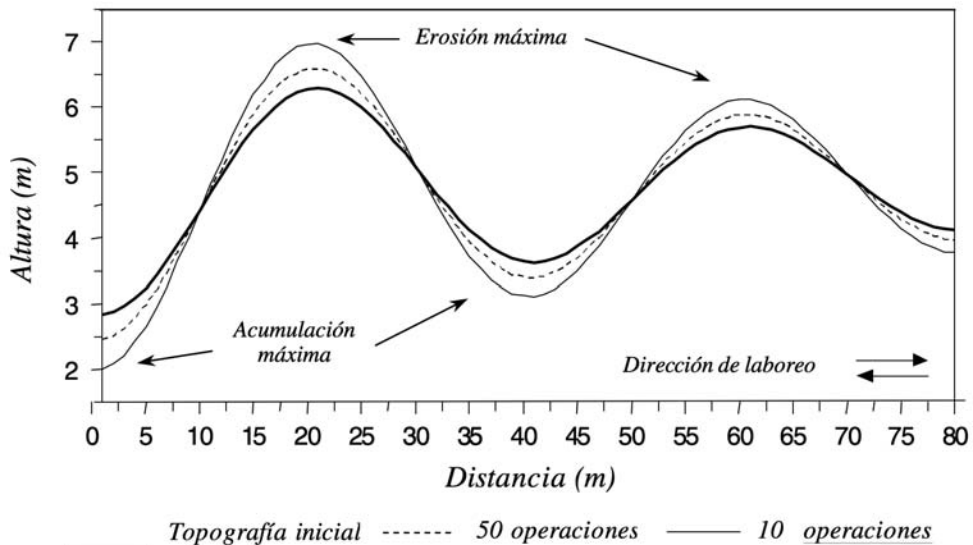


FIGURA 1.- Simulación de la erosión y nivelación progresivas de una ladera agrícola como resultado de la redistribución mecánica del suelo por las prácticas de laboreo. En la figura se presentan los efectos acumulados después de simular 50 y 100 operaciones de laboreo con el apero de vertedera, aplicando el modelo de simulación SORET (Soil Redistribution by Tillage) (De Alba, 2003).



FIGURA 2: Los árboles y postes de tendidos eléctricos o telefónicos representan obstáculos para la realización de las prácticas de laboreo y, por tanto, para el transporte del suelo, favoreciendo la acumulación de suelo a uno de los lados del obstáculo y la erosión en el opuesto. Como consecuencia, alrededor del obstáculo la topografía se ve fuertemente modificada (campo en la Toscana, Italia).

Variabilidad espacial del suelo

La erosión mecánica da lugar al truncamiento de los perfiles edáficos situados en las hombreras y partes altas de las laderas como resultado de la pérdida total o parcial de los horizontes superficiales del suelo (Figura 3). Lo opuesto tiene lugar en las depresiones y partes bajas de las laderas, donde se produce el engrosamiento y enterramiento de los horizontes superficiales debido a la acumulación neta de material sobre el perfil original (Lindstrom *et al.*, 1992; Govers *et al.*, 1999; Torri *et al.*, 2002). En los sectores de ladera de morfología rectilínea, donde el proceso predominante es el transporte de suelo a lo largo del horizonte de laboreo, los horizontes superficiales que forman dicha capa resultan transportados ladera abajo y substituidos por material de suelo procedente de las partes altas de la ladera (Figura 4). Cuando el material transportado procede de perfiles edáficos previamente truncados, y por tanto el suelo transportado procede de horizontes que origina-

riamente fueron subsuperficiales pero que quedaron expuestos en superficie, puede dar lugar a la formación de falsos suelos truncados y perfiles edáficos en los que se presenta secuencias invertidas de horizontes genéticos de suelo. (De Alba, 2000; De Alba, *et al.* 2004). En la Figura 4, la discontinuidad vertical en la presencia de CaCO_3 en los perfiles edáficos situados a media ladera, representa un ejemplo de inversión de la secuencia de horizontes genéticos (*s.l.*).

Modificación de la morfología de laderas

Como patrón general el suelo es transportado desde las partes altas de las laderas y zonas de morfología convexa, para ser acumulado en la base de las laderas y rellenar vaguadas y depresiones localizadas en el interior de los campos. Los bordes y lindes de los campos de cultivo representan barreras físicas que interrumpen el transporte del suelo, dado que los tractores no realizan el laboreo atravesando los límites del campo.

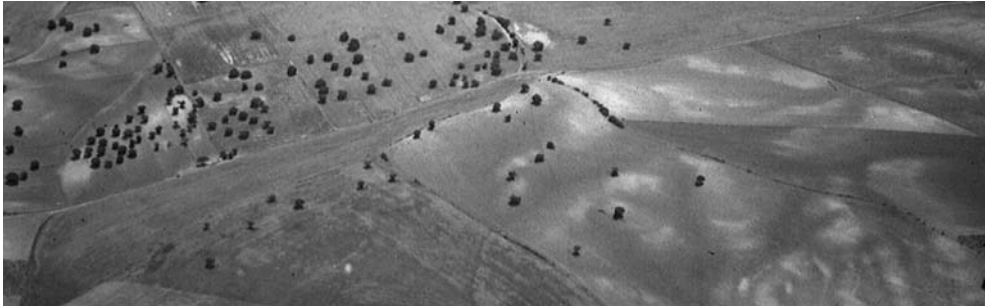


FIGURA 3: Paisaje agrícola con rasgos evidentes de intensa degradación del suelo por erosión. Se observa una presencia generalizada de suelos truncados (en la foto zonas de tonos claros debido a la presencia en superficie de material procedente de horizontes cálcicos originariamente subsuperficiales) en las lomas y hombreras, y en general en los tramos convexos de las laderas (Santa Olalla, Castilla-La Mancha).

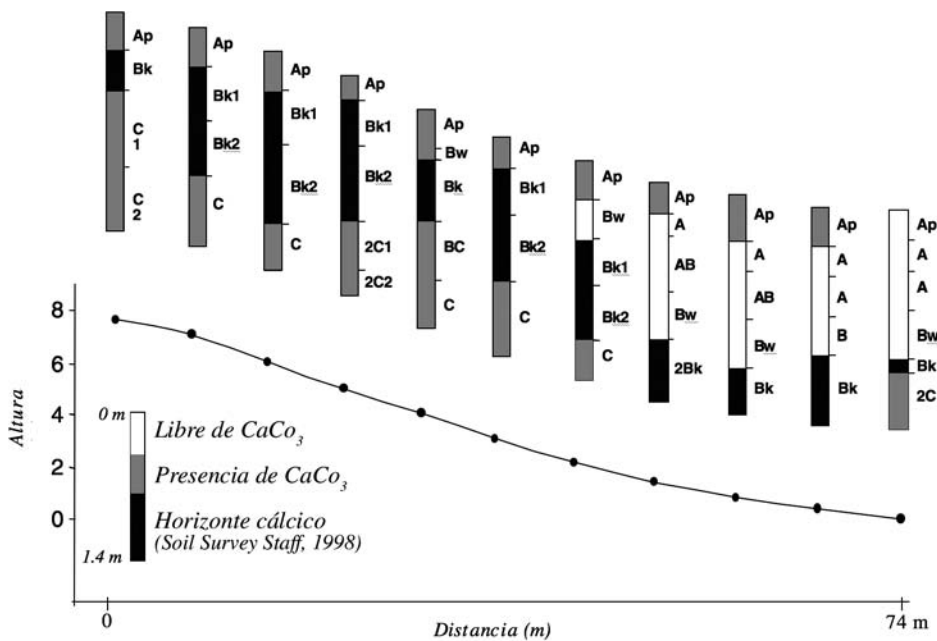


FIGURA 4: Variabilidad espacial de la distribución de CaCO_3 en el perfil de suelo en una ladera agrícola, en la región central de Minnesota (USA). A partir de posiciones intermedias en la ladera, se observa una discontinuidad en la distribución vertical del CaCO_3 en los perfiles de suelo, en los que el horizonte superficial de laboreo está enriquecido en CaCO_3 . En estos perfiles, la capa de labor está constituida por material de suelo que ha sido transportado por las prácticas de laboreo desde zonas más altas en la ladera (De Alba *et al.*, 2004). En el perfil inferior, la ausencia de carbonato en el horizonte Ap indica que el suelo transportado desde las partes altas de la ladera todavía no ha alcanzado la base de ésta.

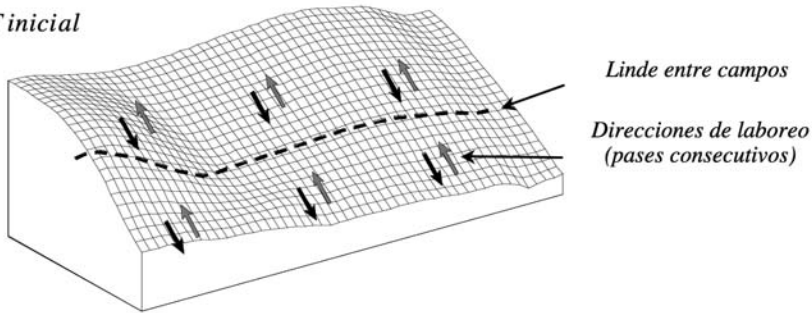
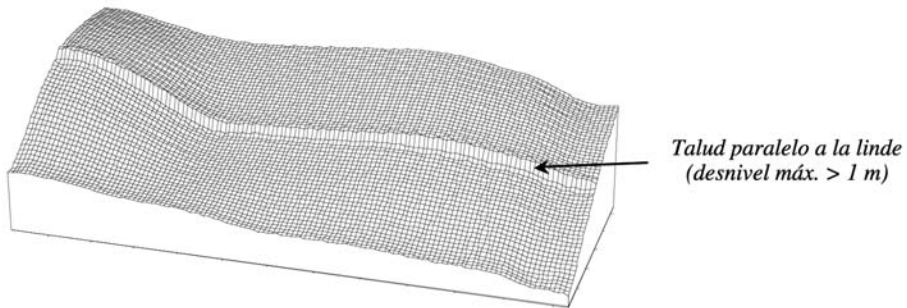
a) *MDT inicial*b) *MDT modificado después de simular 25 secuencias de laboreo*

FIGURA 5: Formación de un talud a lo largo de una lina entre campos de cultivo situada a media ladera, como resultado de la distribución de suelo por las prácticas de laboreo realizadas independientemente en cada uno de los campos (a). La figura (b) muestra el MDT modificado después de simular con el modelo SORET (Soil Redistribution by Tillage, De Alba, 2003) la realización de 25 secuencias de laboreo según la dirección de la máxima pendiente alternando el sentido de la marcha en pases consecutivos.

En consecuencia, el movimiento y redistribución del suelo quedan restringidos al interior de los límites de cada campo. No obstante, a ambos lados de las lindes los balances de pérdida o acumulación de suelo resultan ser opuestos: pérdida neta de suelo en la parte inferior del borde del campo y acumulación de suelo en la parte alta. Cuando la lina entre campos de cultivo se sitúa en posiciones intermedias en la ladera, dichos balances opuestos de pérdida o acumulación de suelo a ambos lados de la lina dan lugar a la rotura del perfil de ladera con la formación de un escalón o talud paralelo a la lina (Fig. 5 y 6). El número, posición y distribución en el paisaje de las lindes entre campos determinan la intensidad y los

patrones espaciales de redistribución de suelo, así como la morfología final de los perfiles de ladera (De Alba, 2002).

Modificación e interacción con los procesos de erosión hídrica

A partir de las simulaciones representadas en la Figura 7, se concluye que sendos procesos de erosión hídrica y mecánica por laboreo presentan patrones espaciales de degradación-agradación diferentes e incluso balances de signo opuesto. El modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project –Flanagan y Nearing, 1995-) de erosión hídrica predice un aumento de la erosión conforme aumenta la longitud de la ladera (distancia desde la divisoria de aguas) y la pendiente del terre-



FIGURA 6: Taludes formados en las lindes entre campos de cultivo como consecuencia del efecto acumulado de la redistribución de suelo por el laboreo. (Izquierda: ladera en Castilla-La Mancha; derecha: ladera en la Toscana, Italia).

no, alcanzando la máxima intensidad en el sector intermedio de ladera (Figura 7); mientras que los modelos de redistribución de suelo por laboreo, predicen pérdidas máximas de suelo en las partes altas de la ladera donde la distancia a la divisoria y la pendiente son prácticamente nulas.

Las vaguadas y depresiones intermedias, corresponden a zonas de concentración de la escorrentía superficial y, por tanto, a máximos de pérdida de suelo por erosión hídrica; mientras que son zonas de acumulación neta de suelo por las operaciones de laboreo (De Alba, *et al.*, 2004). Ello

pone de manifiesto la importancia de la interacción y retroalimentación de sendos procesos. Las prácticas de laboreo provocan el rellenado de las vaguadas y depresiones, mientras que la erosión hídrica la movilización y transporte del suelo acumulado en las vaguadas, lo que a su vez, acentúa la topografía local y favorece la acumulación de suelo por el laboreo.

Otro importante mecanismo de interacción entre ambos procesos es consecuencia de la intensa transformación de la topografía (Fig. 1, 2, 5, 6) producida por la redistribución del suelo por el laboreo. Sin duda, la

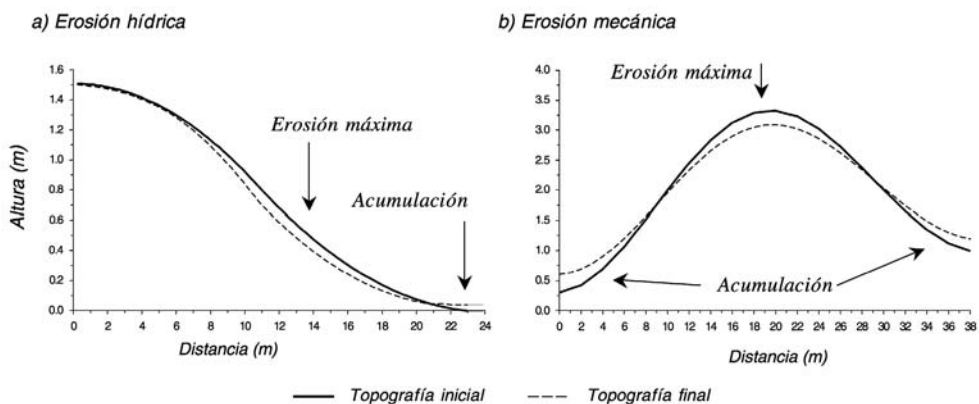


FIGURA 7: Variabilidad espacial de las zonas de erosión y acumulación de suelo como resultado de los procesos de a) erosión hídrica según el modelo WEPP – Water Erosion Prediction Project (Flanagan y Nearing., 1995), y, b) erosión mecánica según el modelo SORET – Soil Redistribution by Tillage (De Alba, 2003).

transformación de la topografía conlleva, a su vez, una drástica modificación de las líneas de flujo y de drenaje superficial, así como de los patrones espaciales de concentración de escorrentía, lo que afecta a la variabilidad espacial e intensidad de la erosión hídrica. Más aún, la influencia sobre la erosión hídrica es todavía más compleja, si se tiene en cuenta los efectos que la modificación de la morfología de los perfiles edáficos puede tener sobre el comportamiento hidrológico del perfil de suelo, los flujos subsuperficiales de agua en el suelo y la variabilidad espacial de la infiltración. Todo ello revela la importancia de las interacciones y sinergias potenciales entre los procesos de erosión hídrica y mecánica.

Variabilidad espacial de la productividad agrícola

Los efectos de la redistribución del suelo sobre la productividad de los campos de cultivo van a depender de la naturaleza y fertilidad de los distintos horizontes del perfil de suelo, así como de su variabilidad espacial. No obstante, como tendencia general se ha observado que el aumento de la variabilidad de las propiedades del suelo ocasionado por el laboreo, a su vez, da lugar un aumento significativo de la variabilidad de la productividad (Schumacher *et al.*, 1999; Torri *et al.*, 2002; De Alba *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

La redistribución del suelo producida por las operaciones convencionales de laboreo representa *per se* un proceso de intensa transformación de los paisajes agrícolas. Los efectos acumulados a medio y largo plazo dan lugar a una drástica modificación de los perfiles edáficos y de los patrones de variabilidad espacial de los suelos. Más aún, la redistribución del suelo por el laboreo provoca una severa modificación de la topografía y como consecuencia sobre la hidrología

superficial y subsuperficial de las laderas (ej., variabilidad de la infiltración, drenaje superficial y subsuperficial, etc.), así como sobre los procesos geomorfológicos activos (ej. erosión hídrica, estabilidad de laderas, etc.).

Las evidencias de campo presentadas revelan la importancia de incorporar los procesos de redistribución y erosión mecánica del suelo, en modelos integrales de procesos de erosión e hidrológicos, así como de estudiar sus posibles interacciones y sinergias. La elevada intensidad del proceso revela la necesidad de desarrollar indicadores de riesgo con objeto de predecir la extensión, intensidad e implicaciones de la redistribución del suelo en los paisajes agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de un contrato de investigación del Programa Ramón y Cajal (MCyT), de una beca post-doctoral Marie Curie de la Unión Europea (HMPF-CT-2000-00706), y de la Junta de CC. de Castilla-La Mancha.

REFERENCIAS

- De Alba, S. (2000). Redistribución del suelo por las prácticas de laboreo: Erosión por Laboreo. *Edafología*, 7(2), 7-89.
- De Alba, S. (2001): Modelling the effects of complex topography and patterns of tillage on soil translocation by tillage with mouldboard plough. *J. Soil and Water Conservation*, 56, 335-345.
- De Alba, S. (2002): Implicaciones geomorfológicas de la redistribución y erosión del suelo por el laboreo (Tillage erosion). En A. Pérez-González, J. Vegas, M.J. Machado (eds). *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio*. SEG-ITGE, 219-225.
- De Alba, S., Lindstrom, M.J., Torri, D., Borselli, L., Schumacher, T.E. (2002):

- Field evidence of high intensive soil redistribution by tillage in agricultural fields of contrasted agro-ecological environments in Spain, Italy, and Minnesota (USA). En: T. Quine (ed.). *Soil Variability on Agricultural Land. Evolution, Characterisation & Importance. An International Symposium. Universities of Reading and Exeter, UK.*
- De Alba, S. (2003): Simulating long-term soil redistribution generated by different patterns of mouldboard ploughing in landscapes of complex topography. *Soil & Tillage Research*, 71,71-86.
- De Alba, S., Lindstrom, M., Schumacher, T.E., Malo, D.D. (2004): Transformation of soil landscapes due to soil redistribution by tillage: Towards a new conceptual model of soil catena evolution in agricultural landscapes. *Catena*, (En prensa).
- De Alba S., Borselli, L., Torri, D., Pellegrini, S., Bazzoffi, P. (2006): Assessment of tillage erosion by mouldboard plough in Tuscany (Italy). *Soil & Tillage Research*, 85:123-142.
- Flanagan, D.C. y Nearing, M.A. (1995): USDA-Water erosion prediction project (WEPP) hillslope profile and watershed model documentation. NSERL Report. No.10 USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.
- Govers, G., Lobb, D.A., Quine, T.A. (1999): Tillage erosion and translocation: emergence of a new paradigm in soil erosion research. *Soil & Tillage Research*, 51, 167-174.
- Lindstrom, M.J., Nelson, W.W., Schumacher, T.E. (1992): Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil & Tillage Research*, 24, 243-255.
- Schumacher, T.E., Lindstrom, M.J., Schumacher, J.A., Lemme, G.D. (1999): Modeling spatial variation in productivity due to tillage and water erosion. *Soil & Tillage Research*. 51, 331-339.
- Soil Survey Staff (1998): *Keys to Soil Taxonomy*. USDA. 328 pp.
- Torri, D., Borselli, L., Calzolari, C., Yañez, M., Salvador-Sanchis, M.P. (2002): Soil erosion, land use, soil quality and soil functions: Effects of erosion. En: Rubio, J.L., Morgan, R:P:C:, Asins, S., Andreu, V.(eds), *Man an soil at the third millennium*. Geoforma Ediciones - CIDE, 131-148.