

IMPACTO DE LA PÉRDIDA DE LA VEGETACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES DE UN SUELO ALUVIAL

Impact of the Vegetation Loss on the Properties of an Alluvial Soil

Muñoz-Iniestra, D. J.^{1‡}, López G. F.¹, Hernández M. M.¹, Soler A. A.¹ y López G. J.²

RESUMEN

La degradación del suelo casi siempre se dispara con la pérdida de la cubierta vegetal. Sin embargo, no se conoce bien cuál es la secuencia de cambios y el impacto que tiene este hecho sobre las propiedades del suelo a largo plazo. El propósito de este trabajo fue comparar y analizar la dinámica de 16 propiedades de dos clases de suelo aluvial (con distinta textura) a través del tiempo, contrastando diversos sitios donde el suelo está protegido por una cubierta vegetal y otros donde el suelo está desnudo y no permite el establecimiento de plantas. Durante cuatro años se realizaron muestreos para registrar la variación y tendencia en el tiempo de 16 propiedades físicas y químicas. Los datos obtenidos se analizaron e interpretaron utilizando pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas multivariadas. Los resultados indican que la mayoría de las propiedades no mostraron fluctuaciones significativas con respecto al tiempo; esto quiere decir que cuatro años no fueron suficientes para registrar cambios importantes. Sin embargo, la condición del sitio fue el factor más determinante, ya que influyó en más propiedades. Los sitios protegidos por la vegetación resultaron ser más estables y presentaron menos oscilaciones en las propiedades con respecto a los suelos desnudos. Las propiedades más relacionadas con estatus del sitio fueron infiltración, densidad aparente, porosidad, pH y materia orgánica; esta última resultó ser la propiedad de mayor importancia, por la influencia

que tuvo en las demás. Se observó que los suelos de textura fina son más propensos a la degradación física que los de textura gruesa, ya que favorecen el sellado y la formación de costras.

Palabras clave: cambio de uso del suelo, monitoreo de suelos, trópico seco.

SUMMARY

The soil degradation starts by elimination of vegetation, nevertheless currently it is not well known what is the sequence of changes and the impact that this action causes over the soil properties in the long term. The purpose of this research uses to compare and analyze the dynamic of 16 properties of two kinds of alluvial soil (with different texture) through the time, comparing different sites where the soil is protected by a plant cover and other nearby sites where the soil is naked through degradation process. Mexico the sampling took place three times per year during four years to register the variation and trends of 16 physical and chemical properties. Data were analyzed with aid of parametric and no parametric multivariate analysis. The results showed that most of the properties did not show significant variation regarding the time; this means that four years was not enough to register important changes. Nevertheless, the site condition was the most important fact because it affected significantly more properties. Sites protected by vegetation were the most stable and presented less differences in their properties compared to naked sites. The most related properties to the site condition were: infiltration, bulk density, porosity, organic matter, and pH. The organic matter tended to be the key factor due to its influence on all other properties. It was observed that soils with a fine texture have more risk to physical degradation, because it causes the sealing and crusting of the soil.

Index words: land use change, soil monitoring, dry tropic.

¹ UBIPRO Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM. Av. de los Barrios 1, 54090 Los Reyes Iztacala, Tlalhepantla, Estado de México. México.

[‡] Autor responsable (danimi@servidor.unam.mx)

² Instituto de Geografía UNAM. Cd. Universitaria, Distrito Federal, México.

INTRODUCCIÓN

En los sitios poco transformados el uso del suelo está determinado por los tipos de vegetación que, de manera natural, se han establecido ahí y forman parte de los ecosistemas del territorio. Estos lugares cada vez son menos y, al mismo tiempo, son los más importantes para el funcionamiento del planeta y la supervivencia del hombre. En particular, el suelo es uno de los elementos receptores primarios de los impactos ambientales provocados por el cambio del uso del mismo. De acuerdo con la información del Inventario Nacional Forestal (SEMARNAP *et al.*, 2000) se sabe que cerca de la mitad del territorio nacional es afectado en diferentes grados por las actividades humanas. La misma fuente señala que en 29% del territorio se eliminó la vegetación primaria para permitir el establecimiento de actividades agropecuarias. Esto también quiere decir que cerca de 30% de los suelos del país han sido impactados en su calidad original; algunos de ellos están muy dañados. Entre las regiones más deterioradas por el cambio de uso del suelo están las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas. De acuerdo con la SEMARNAT (2002), 45% de los matorrales originales de las zonas secas se han substituido por cobertura antrópica. La expansión ganadera es la principal causa del deterioro de las zonas secas y tropicales.

El cambio de uso del suelo es uno de los temas de mayor interés en la actualidad para las ciencias ambientales y la ecología, ya que este fenómeno constituye uno de los factores involucrados en el calentamiento global al alterar los ciclos biogeoquímicos, como el del agua o el del carbono (Diouf y Lambin, 2001). No hay que olvidar que el suelo contiene las reservas más importantes de carbono en los continentes. La masa total del C orgánico en los suelos se ha estimado en 30×10^{14} kg, similar al promedio de todos los otros reservorios de C en la superficie terrestre, el cual asciende a 21×10^{14} kg (Shugang y Akiyama, 2005). El cambio de uso del suelo también es una de las causas más importantes de la disminución de la biodiversidad.

Al perder los suelos su cobertura natural se presenta, en seguida, una serie de cambios que repercuten de manera negativa en la fertilidad y la productividad natural del suelo; se ha demostrado la importancia de la cubierta vegetal en la conservación de los suelos (Albaladejo *et al.*, 1998). El remplazo de la vegetación para introducir cultivos altera el equilibrio natural, deja la superficie del suelo expuesta a los agentes erosivos e interrumpe

el aporte de restos vegetales al suelo. Por otra parte, en las tierras secas, el abandono agrícola y la falta de prácticas adecuadas de manejo han desencadenado fuertes procesos erosivos, los cuales, aunados a la baja fertilidad del suelo tras largos periodos de cultivo, impiden la colonización vegetal o hacen que ésta avance con mucha lentitud, lo que acelera la pérdida del suelo durante los primeros años de abandono (Aveyard, 1988; Porta *et al.*, 2003).

La pérdida de la cubierta vegetal es el primer paso del proceso de deterioro del suelo; si éste no se controla a tiempo, provocará que el paisaje se desertifique (Stocking y Murnaghan, 2003). La degradación del suelo es un término difícil de visualizar y entender. La mejor forma de saber si un suelo se está degradando es conociendo la dinámica de sus propiedades; esto significa que es necesario realizar monitoreos periódicos de indicadores (Van Lynden y Kuhlman, 2002). Sin embargo, los monitoreos son poco utilizados y no son bien vistos por las agencias de financiamiento gubernamental o privado porque no muestran resultados a corto plazo, son caros y difíciles de ejecutar, y no se ajustan a los tiempos de tomadores de decisiones. No obstante, hay que considerar que muchos procesos naturales son lentos y graduales; en particular, los cambios en las propiedades de los suelos sólo se manifiestan en décadas o, inclusive, en centurias o milenios. Por lo tanto, sólo a través de mediciones científicas periódicas se podrá contar con información confiable y obtener conclusiones válidas que permitan tomar decisiones correctas (Dregne, 2002; Hana y Jauffret, 2008).

El presente trabajo tuvo como propósito monitorear y comparar durante cuatro años consecutivos el comportamiento de 16 propiedades físicas y químicas de dos tipos de suelo aluvial del trópico seco del sur de México, cuyo uso o condición varía desde un estatus más o menos conservado, protegido con una cobertura vegetal natural, hasta un estado degradado, donde el suelo es incapaz de permitir el establecimiento de plantas (suelo desnudo), con el propósito de seleccionar aquellas propiedades del suelo que estén más relacionadas con estatus del lugar y proponerlas como indicadores locales de la degradación del suelo. El área donde se realizó el estudio es una terraza fluvial acumulativa-erosiva que se encuentra en retroceso geomorfológico, lo cual ha determinado la presencia de un patrón recurrente de fragmentos de terrazas o islas que presentan distintas condiciones de degradación o conservación que se

manifiestan en superficies sin cobertura vegetal y con deterioro evidente, las cuales se alternan con áreas con suelos conservados por la cubierta vegetal natural; asimismo existen sitios que presentan estados de degradación intermedios.

Las terrazas estudiadas se encuentran en la cuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla (Figura 1), ubicada en la Sierra Madre del Sur, dentro de la provincia de las Sierras Centrales de Oaxaca. Tiene un clima semiseco semicálido del tipo Bs_0hw (e)g, con lluvias de verano, una temperatura media anual de 21 °C y con una sequía interestival a la mitad del período de lluvias; la precipitación media anual es de 420 mm (García, 2004). Las terrazas se localizan entre las coordenadas 18° 19'08" y 18° 19'45" N y los 97° 27'00" y 97° 27'40" O, sobre las márgenes o riveras del río Zapotitlán, un río intermitente que corre por la parte meridional de la cuenca. Las terrazas fluviales no forman un sistema continuo a lo largo del río, ya que en algunos lugares no hubo condiciones para su formación. Presentan varios mantos aluviales donde se observan estratificaciones de arcilla y limo, arena muy fina, cantos rodados y gravas. Se formaron en el cuaternario bajo condiciones climáticas más húmedas (Buitrón y Barceló-Duarte, 1980). Los suelos son de origen aluvial, calcáreos, profundos y de textura variable. La cubierta vegetal de las terrazas está conformada por un matorral espinoso de mezquite (*Prosopis laevigata*) y palo verde (*Parkinsonia*

praecox), el cual se distribuye de manera irregular y forma manchones que alternan con parcelas agrícolas de temporal y áreas con vegetación secundaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron dos terrazas fluviales, una con suelo de textura franco arenosa en la superficie (terrazza A) y la otra con suelo de textura franco arcillo limosa (terrazza D), separadas por una distancia lineal de 4.4 km (Figura 1). En cada una de las terrazas se escogieron varios escenarios en donde el suelo presentaba diferentes condiciones de conservación, con la finalidad de tener un marco de referencia y comparar las fluctuaciones de las propiedades evaluadas bajo distintas situaciones. La terraza A tiene una superficie de 13 ha y una altitud promedio de 1520 m. Está constituida por franjas de terreno poco fragmentado, protegido con una cubierta vegetal natural, mínima erosión y pocos lugares con suelo desnudo. En la terraza A se seleccionaron dos sitios con suelo desnudo y dos con suelo protegido con plantas (Figura 2; Cuadro 1). La terraza D se localiza hacia el oriente de la cuenca, con una altitud media de 1430 m, tiene una superficie aproximada de 20 ha, de las cuales 10% presenta una fuerte desertificación, el 90% de la superficie restante el uso del suelo está determinado por una mezcla de parches con suelo desnudo y sitios con matorral espinoso (mezquital)

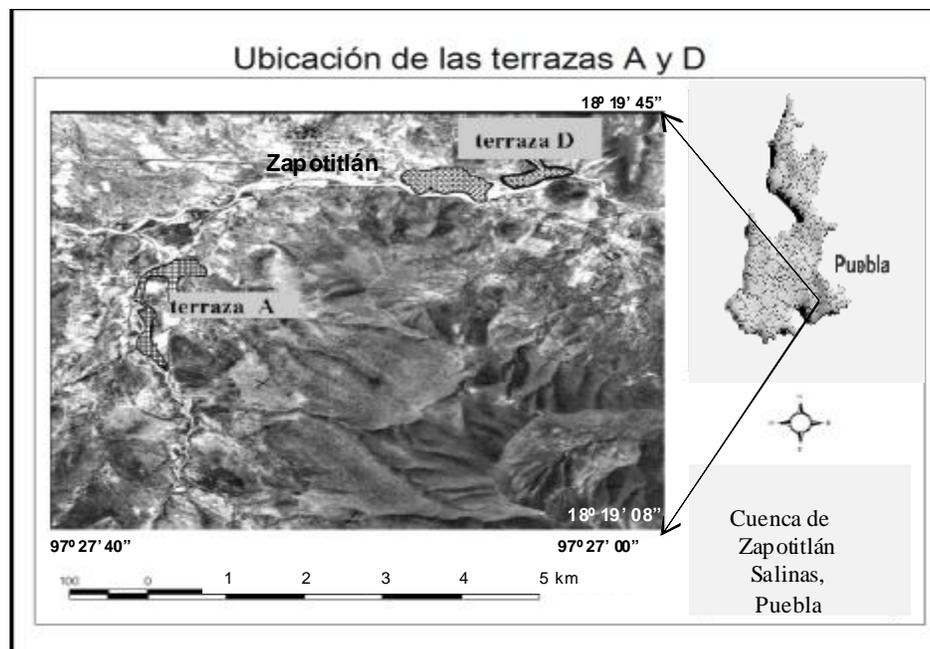


Figura 1. Localización del área de estudio.

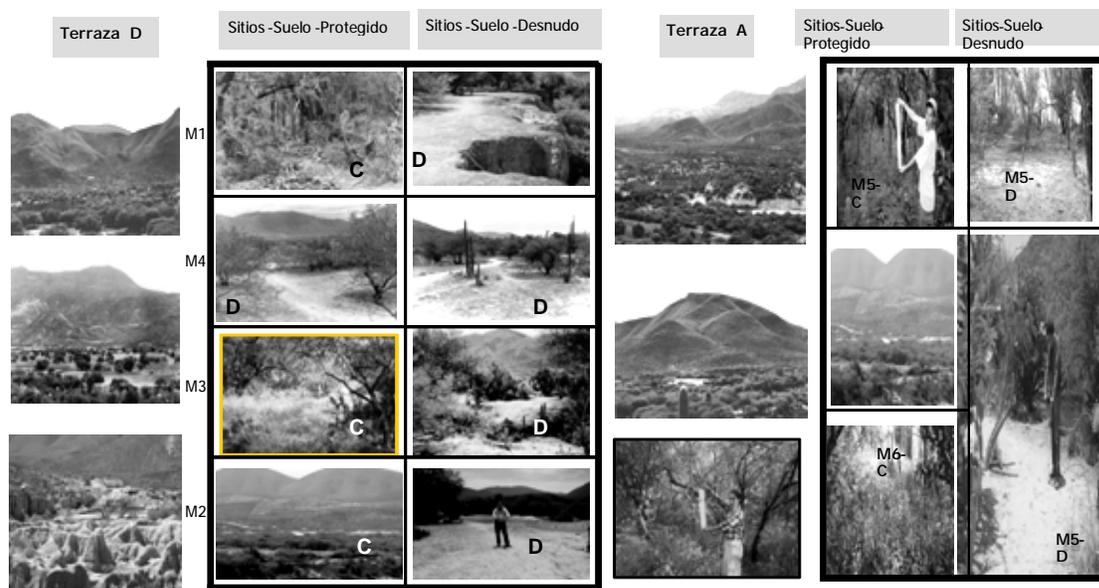


Figura 2. Panorámicas que muestran las condiciones que prevalecen en los sitios donde se realizó el monitoreo en las dos terrazas.

(Figura 2). Aquí la erosión es muy severa y en muchos lugares se pierde el suelo. En la terraza D se eligieron cuatro lugares con suelo desnudo: sin plantas y con problemas de degradación y tres con suelo protegido por una cobertura vegetal natural en buenas condiciones de acuerdo con los criterios FAO (2001) (Cuadro 1; Figura 2).

Cada uno de los sitios de ambas terrazas se visitó tres veces al año (marzo, agosto y noviembre) durante cuatro años consecutivos (2001 - 2004). Los sitios con suelo protegido y aquéllos con suelo desnudo están cerca uno del otro (Cuadro 1; Figura 2). Se colectaron muestras compuestas de suelo superficial (0 - 20 cm); en cada sitio se obtuvieron cuatro submuestras y se mezclaron para formar una sola. Las muestras siempre se colectaron de la misma manera, levantando siempre el mismo volumen; se depositaron en bolsas de polietileno etiquetadas y se transportaron al laboratorio donde se analizaron. Las propiedades evaluadas se presentan en el Cuadro 2. La densidad aparente y la infiltración se evaluaron en campo.

La investigación consideró un diseño de 16 variables de respuesta contra los factores tiempo (cuatro años), tipo de suelo (franco arenoso y franco arcillo limoso) y condición o uso (suelo desnudo y protegido). Los datos obtenidos se analizaron e interpretaron con la ayuda de pruebas estadísticas paramétricas y no paramétricas multivariadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información obtenida durante cuatro años consecutivos de monitoreo (tres visitas por año) en cada uno de los sitios de las dos terrazas, se construyó una base de datos, con 1890 registros incluidos. Los promedios y las estadísticas básicas se muestran en los Cuadros 3 y 4.

Para evaluar el efecto y las interacciones de los factores suelo, tiempo y condición sobre las 16 propiedades estudiadas, se aplicó un análisis de varianza multivariado (Cuadro 5), el cual indica que los tres factores tuvieron un efecto significativo sobre alguna de las propiedades estudiadas. También se observó que no existió interacción entre los tres factores estudiados, sino que actúan de manera independiente sobre las propiedades.

La mayoría de las propiedades evaluadas no mostraron variación estadística significativa con respecto al tiempo. Esto quiere decir que cuatro años de monitoreo no son suficientes para entender la dinámica edáfica; la IUGS (2001) y Paz *et al.* (2006) señalan que para monitorear las propiedades del suelo se requiere hacer observaciones por lo menos durante 10 años. Sólo el limo ($F = 3.62$, $P = 0.0334$) el contenido de limo fue afectado por el tiempo (Cuadro 5). La fluctuación del limo a través del tiempo se debe a su gran movilidad, favorecida por su tamaño pequeño que hace que pueda

Cuadro 1. Ubicación de los sitios de monitoreo en las dos terrazas.

| Clave de la terraza Textura del suelo | Clave del sitio | Localización | Condición (suelo protegido o desnudo) |
|--|-----------------|---|--|
| A Suelo franco arenoso | M5-C | 18°18'33.58" N 97°29'19.05" O 1500 m de altitud | Suelo protegido (vegetación primaria) |
| A Suelo franco arenoso | M6-C | 18°17'45.98" N 97°29'23.02" O 1525 m de altitud | Suelo protegido (vegetación secundaria) |
| A Suelo franco arenoso | M5-D | 18°18'36.46" N 97°29'15.20" O 1500 m de altitud | Suelo desnudo |
| A Suelo franco arenoso | M6-D | 18°18'55.92" N 97°29'03.89" O 1510 m de altitud | Suelo desnudo |
| D Suelo franco arenoso | M1-C | 18°19'29.5" N 97°27'16.2" O 1430 m de altitud | Suelo protegido (vegetación primaria) |
| D Suelo franco arcillo limoso | M2-C | 18°19'22.4" N 97°27'28.6" O 1446 m de altitud | Suelo protegido (vegetación primaria) |
| D Suelo franco arcillo limoso | M3-C | 18°19'32.2" N 97°27'08" O 1452 m de altitud | Suelo protegido (vegetación primaria) |
| D Suelo franco arcillo limoso | M1-D | 18°19'33" N 97°27'17.4" O 1430 m de altitud | Suelo desnudo |
| D Suelo franco arcillo limoso | M2-D | 18°19'21.4" N 97°27'29" O 1446 m de altitud | Suelo desnudo |
| D Suelo franco arcillo limoso | M3-D | 18°19'33.1" N 97°27'02" O 1452 m de altitud | Suelo desnudo |
| D Suelo franco arcillo limoso | M4-D | 18°19'33.2" N 97°27'24.11" O 1500 m de altitud | Suelo desnudo |

ser transportado con facilidad por el agua o el viento. A esto hay que agregar que el limo carece de carga, lo que impide que se agrupe con otras partículas y forme agregados de mayor peso y más resistentes al movimiento. Dregne (2002) señala que el limo es la partícula que más se mueve en los eventos fluviales. Además, Oldeman (1988); Soriano *et al.* (2000) y Michelena e Irutia (2002) indican que el limo es una partícula vinculada con la degradación física de los suelos, ya que propicia formación superficial de costras al obstruir los poros y sellar la superficie (Figura 3).

La textura del suelo mostró diferencias significativas entre las dos terrazas. Las proporciones de arena, limo

y arcilla están determinadas por la naturaleza y el origen del suelo. De la textura dependen casi todas las propiedades físicas, razón por la cual la densidad aparente ($F = 79.27$, $P = 0.0000$), la porosidad ($F = 24.53$, $P = 0.0007$) y la infiltración ($F = 13.21$, $P = 0.0006$) presentaron diferencias estadísticas significativas con respecto al tipo de suelo. En particular, la infiltración es más rápida en suelos arenosos que en los limosos y arcillosos, ya que las arenas generan poros más grandes. El pH ($F = 6.53$, $P = 0.0134$), la conductividad eléctrica ($F = 4.98$, $P = 0.0297$) y los carbonatos ($F = 35.63$, $P = 0.0000$) también mostraron importantes diferencias con respecto al tipo de suelo (sitio).

Cuadro 2. Propiedades evaluadas y técnicas analíticas utilizadas para caracterizar los suelos del estudio.

| Propiedad | Técnica analítica |
|-----------------------------------|--|
| Color | Tablas de color de Munsell |
| Densidad aparente | Método del cilindro metálico (muestra no alterada) |
| Densidad real | Método del picnómetro |
| Porosidad total | Cálculo de las porosidades |
| Textura | Método de Bouyoucos (1963) |
| Materia orgánica | Método de Walkley-Black (1947) |
| pH | Con potenciómetro (relación suelo-agua de 1: 2.5) |
| CICT [†] | Método de Schollenberger y Simon (1945) |
| Calcio y magnesio intercambiables | Método desarrollado por Cheng y Bray (1951) |
| Potasio intercambiable | Con espectrofotómetro de emisión de flama |
| Nitrógeno total | Método Kjeldahl de Bremmer y Mulvaney (1982) |
| Carbonatos | Método gasométrico desarrollado por Marton y Newson (1953) |
| Fósforo soluble | Olsen y Sommers (1982) |
| Conductividad eléctrica | Método propuesto por USDA (1982) midiendo con puente de conductividad Wheatstone |
| Infiltración (acumulada) | Método del infiltrómetro de doble anillo |
| Capacidad de campo | Método gravimétrico |

[†] CICT = capacidad de intercambio catiónico total.

Cuadro 3. Media, desviación estándar y valor máximo y mínimo de las propiedades evaluadas durante cuatro años en la terraza A.

| Sitio | Arena | Limo | Arcilla | DA [†] | Poros | MO [‡] | pH | CICT [§] | Ca ²⁺ | K ⁺ | N total | P soluble | CO ₃ | CE [¶] | Infiltración | HCC [#] |
|----------------|-------|-------|---------|--------------------|-------|-----------------|------|-----------------------|------------------|----------------|---------|-----------|-----------------|--------------------|--------------|------------------|
| | % | | | kg m ⁻³ | % | % | | cmol+kg ⁻¹ | | | % | ppm | % | dS m ⁻¹ | mm/h | % |
| M5-C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 71.50 | 18.33 | 10.17 | 1.16 | 51.69 | 4.52 | 7.86 | 20.28 | 14.24 | 2.74 | 0.22 | 8.75 | 4.49 | 0.98 | 552.33 | 20.71 |
| Desv. estándar | 3.42 | 3.28 | 1.70 | 0.03 | 1.23 | 0.88 | 0.23 | 1.16 | 2.30 | 1.58 | 0.07 | 1.86 | 2.12 | 0.22 | 6.96 | 1.20 |
| Máximo | 78.00 | 28.00 | 12.00 | 1.20 | 53.62 | 6.37 | 8.19 | 22.04 | 17.72 | 5.92 | 0.38 | 12.00 | 7.21 | 1.46 | 737.00 | 22.75 |
| Mínimo | 64.00 | 15.00 | 7.00 | 1.11 | 49.20 | 3.07 | 7.43 | 18.32 | 10.30 | 0.62 | 0.13 | 6.00 | 0.71 | 0.75 | 320.00 | 18.96 |
| M6-C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prom. | 73.50 | 17.75 | 8.75 | 1.09 | 54.86 | 3.61 | 7.86 | 21.57 | 18.46 | 1.57 | 0.18 | 6.87 | 9.70 | 1.03 | 580.92 | 47.63 |
| Desv. estándar | 4.70 | 4.56 | 1.36 | 0.08 | 2.85 | 0.99 | 0.34 | 3.18 | 4.56 | 1.07 | 0.06 | 2.07 | 2.39 | 0.20 | 6.53 | 5.77 |
| Máximo | 80.00 | 28.00 | 12.00 | 1.33 | 59.53 | 5.12 | 8.53 | 25.84 | 25.84 | 3.80 | 0.31 | 10.70 | 14.70 | 1.29 | 1160.00 | 59.88 |
| Mínimo | 64.00 | 12.00 | 7.00 | 1.04 | 47.56 | 2.11 | 7.46 | 16.73 | 13.27 | 0.62 | 0.12 | 4.25 | 5.93 | 0.61 | 344.00 | 38.21 |
| M5-D | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Prom. | 68.33 | 19.83 | 11.83 | 1.29 | 46.71 | 2.92 | 8.16 | 17.31 | 14.30 | 1.53 | 0.12 | 4.96 | 9.15 | 0.78 | 217.33 | 43.73 |
| Desv. estándar | 3.80 | 2.98 | 1.11 | 0.06 | 3.32 | 0.75 | 0.30 | 2.16 | 2.27 | 1.05 | 0.04 | 1.11 | 2.55 | 0.16 | 8.42 | 6.01 |
| Máximo | 74.00 | 26.00 | 14.00 | 1.38 | 50.89 | 4.33 | 8.58 | 21.84 | 17.90 | 3.58 | 0.21 | 6.54 | 13.21 | 1.23 | 435.00 | 55.33 |
| Mínimo | 60.00 | 15.00 | 10.00 | 1.14 | 39.90 | 1.87 | 7.69 | 14.82 | 10.29 | 0.54 | 0.05 | 3.17 | 5.00 | 0.63 | 160.00 | 32.45 |

[†] DA = densidad aparente, [‡] MO = materia orgánica, [§] CICT = capacidad de intercambio catiónico total, [¶] CE = conductividad eléctrica, [#] HCC = humedad a capacidad de campo.

En los cuadros 3 y 4, se observa que en la terraza A el pH del suelo es menos alcalino y la conductividad eléctrica tiene valores más bajos; esto es consecuencia, en parte, de una textura más gruesa, que favorece una mayor entrada de agua y una mayor lixiviación

de las sales. Por último, se observa que los suelos de textura fina son más propensos a la degradación física, ya que en ellos se favorece más el encostramiento. Paz *et al.* (2006) señalan que los suelos que tienen más de 40% de limo son los que tienen una mayor probabilidad

Cuadro 4. Media, desviación estándar y valor máximo y mínimo de las propiedades evaluadas durante cuatro años en la terraza D.

| Sitio | Arena | Limo | Arcilla | DA [†] | Poros | MO [‡] | pH | CICT [§] | Ca ²⁺ | K ⁺ | N total | P soluble | CO ₃ | CE [¶] | Infiltración | HCC [#] |
|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|-----------------|------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------------|---------------|--------------------|--------------------|---------------|------------------|
| | ----- % ----- | ----- % ----- | ----- % ----- | kg m ⁻³ | ----- % ----- | ----- % ----- | | ----- cmol kg ⁻¹ ----- | ----- cmol kg ⁻¹ ----- | ----- % ----- | mg kg ⁻¹ | ----- % ----- | dS m ⁻¹ | mm h ⁻¹ | ----- % ----- | |
| M1-C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 49.42 | 34.83 | 15.58 | 0.88 | 56.46 | 9.01 | 7.55 | 28.96 | 19.92 | 2.36 | 0.41 | 6.73 | 17.59 | 1.55 | 568.75 | 64.00 |
| Desv. estándar | 4.87 | 5.61 | 2.31 | 0.09 | 4.83 | 2.33 | 0.15 | 3.43 | 3.95 | 1.64 | 0.06 | 2.07 | 2.93 | 0.27 | 4.42 | 12.59 |
| Máximo | 56.00 | 44.00 | 18.00 | 1.04 | 65.60 | 12.76 | 7.83 | 33.64 | 26.20 | 5.43 | 0.49 | 10.00 | 22.5 | 2.26 | 843.00 | 85.90 |
| Mínimo | 40.00 | 26.00 | 12.00 | 0.74 | 50.35 | 6.07 | 7.30 | 22.27 | 14.77 | 0.52 | 0.30 | 3.87 | 14.00 | 1.27 | 242.00 | 40.21 |
| M2-C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 50.60 | 27.00 | 23.00 | 0.85 | 58.29 | 9.93 | 7.68 | 31.22 | 25.38 | 2.34 | 0.54 | 5.79 | 21.49 | 1.86 | 636.60 | 66.44 |
| Desv. estándar | 4.21 | 3.87 | 3.20 | 0.06 | 3.71 | 1.49 | 0.32 | 4.02 | 4.59 | 0.77 | 0.06 | 1.21 | 2.33 | 0.71 | 5.31 | 7.85 |
| Máximo | 57.00 | 34.00 | 27.00 | 0.89 | 64.90 | 11.5 | 8.12 | 36.29 | 32.64 | 3.43 | 0.60 | 7.70 | 24.30 | 2.65 | 864.00 | 75.03 |
| Mínimo | 46.00 | 25.00 | 19.00 | 0.75 | 56.38 | 7.58 | 7.34 | 26.71 | 21.68 | 1.43 | 0.46 | 4.60 | 19.26 | 1.04 | 481.00 | 54.80 |
| M3-C | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 33.67 | 47.25 | 19.08 | 0.90 | 57.06 | 6.24 | 7.59 | 25.46 | 19.51 | 1.38 | 0.36 | 11.58 | 9.40 | 2.14 | 283.12 | 63.73 |
| Desv. estándar | 5.58 | 5.71 | 2.81 | 0.07 | 7.29 | 1.65 | 0.26 | 3.24 | 2.11 | 0.88 | 0.09 | 2.43 | 2.94 | 1.00 | 6.34 | 6.99 |
| Máximo | 42.00 | 54.00 | 24.00 | 0.97 | 70.00 | 8.97 | 7.99 | 30.54 | 22.42 | 2.68 | 0.45 | 15.00 | 13.21 | 3.62 | 590.00 | 75.14 |
| Mínimo | 26.00 | 38.00 | 16.00 | 0.72 | 41.70 | 4.04 | 7.06 | 20.75 | 16.45 | 0.28 | 0.15 | 8.00 | 5.90 | 0.66 | 144.00 | 49.65 |
| M1-D | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 24.50 | 52.17 | 22.50 | 1.18 | 52.47 | 2.07 | 7.95 | 16.83 | 15.38 | 1.13 | 0.12 | 3.45 | 21.62 | 1.33 | 43.08 | 35.70 |
| Desv. estándar | 5.21 | 5.73 | 2.81 | 0.15 | 3.24 | 0.53 | 0.29 | 1.92 | 2.15 | 0.65 | 0.03 | 1.47 | 3.84 | 0.94 | 9.91 | 8.77 |
| Máximo | 34.00 | 58.00 | 27.00 | 1.65 | 56.85 | 3.05 | 8.49 | 21.73 | 19.50 | 2.03 | 0.17 | 5.60 | 31.72 | 3.17 | 54.00 | 46.98 |
| Mínimo | 20.00 | 38.00 | 18.00 | 1.07 | 48.00 | 1.15 | 7.43 | 15.18 | 12.24 | 0.32 | 0.08 | 1.00 | 17.14 | 0.55 | 30.00 | 23.38 |
| M2-D | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 18.00 | 47.00 | 35.00 | 1.12 | 53.21 | 3.33 | 8.28 | 21.26 | 17.65 | 1.39 | 0.18 | 4.50 | 29.95 | 1.39 | 52.75 | 50.22 |
| Desv. estándar | 1.63 | 3.46 | 3.83 | 0.06 | 2.61 | 0.54 | 0.27 | 0.98 | 2.19 | 0.17 | 0.04 | 2.08 | 1.98 | 0.52 | 5.80 | 4.42 |
| Máximo | 20.00 | 50.00 | 38.00 | 1.17 | 56.10 | 4.04 | 8.55 | 22.01 | 20.82 | 1.53 | 0.23 | 7.00 | 32.22 | 1.99 | 70.00 | 56.60 |
| Mínimo | 16.00 | 44.00 | 30.00 | 1.04 | 50.65 | 2.72 | 7.97 | 19.89 | 16.17 | 1.15 | 0.15 | 1.00 | 28.20 | 0.90 | 35.00 | 46.95 |
| M3-D | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 28.00 | 52.00 | 20.00 | 0.97 | 55.30 | 4.64 | 7.82 | 21.66 | 16.81 | 1.67 | 0.25 | 6.53 | 15.27 | 6.60 | 125.08 | 43.87 |
| Desv. estándar | 3.62 | 2.92 | 2.80 | 0.06 | 1.66 | 1.18 | 0.20 | 2.21 | 1.51 | 1.18 | 0.07 | 0.93 | 3.78 | 2.43 | 4.88 | 7.75 |
| Máximo | 36.00 | 57.00 | 24.00 | 1.05 | 57.80 | 6.90 | 8.08 | 25.18 | 19.77 | 3.25 | 0.36 | 8.00 | 20.90 | 10.27 | 267.00 | 55.70 |
| Mínimo | 22.00 | 46.00 | 16.00 | 0.84 | 52.52 | 2.97 | 7.45 | 18.68 | 15.15 | 0.40 | 0.13 | 5.00 | 10.32 | 3.32 | 44.00 | 34.18 |
| M4-D | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 20.09 | 54.27 | 26.36 | 1.14 | 51.89 | 1.74 | 8.34 | 17.40 | 15.01 | 1.21 | 0.11 | 2.41 | 24.47 | 0.84 | 55.09 | 21.63 |
| Desv. estándar | 3.36 | 1.95 | 2.77 | 0.02 | 2.92 | 0.50 | 0.34 | 1.54 | 2.64 | 0.74 | 0.05 | 0.91 | 2.02 | 0.40 | 5.31 | 2.38 |
| Máximo | 26.00 | 56.00 | 30.00 | 1.18 | 55.48 | 2.52 | 8.76 | 20.29 | 18.89 | 2.63 | 0.21 | 4.00 | 27.50 | 1.80 | 81.00 | 24.30 |
| Mínimo | 16.00 | 50.00 | 20.00 | 1.12 | 44.50 | 1.23 | 7.88 | 15.55 | 11.57 | 0.45 | 0.04 | 1.00 | 21.40 | 0.41 | 33.00 | 18.58 |

[†] DA = densidad aparente, [‡] MO = materia orgánica, [§] CICT = capacidad de intercambio catiónico total, [¶] CE = conductividad eléctrica, [#] HCC = humedad a capacidad de campo.

de mostrar degradación física por encostramiento. En todos los sitios de la terraza D, donde la textura es arcillo limosa, se presentaban costras físicas (Figura 3).

La condición del sitio es el factor que mayor impacto tuvo sobre las propiedades de los suelos (Cuadro 5). La proporción de las partículas arenas, limos y arcilla fue diferente entre los sitios con suelo desnudo y los protegidos. La textura es una de las propiedades

más estables del suelo (IUGS, 2001). Sin embargo, en la superficie del suelo ésta es muy dinámica debido a la influencia de factores externos como el viento, el escurrimiento y la influencia humana, entre otros. En los resultados obtenidos se observa que la arena se encuentra en mayor proporción en los suelos protegidos que en los desnudos, lo que indica que las arenas se mueven menos. De acuerdo con lo que establece la ley

Cuadro 5. Valores de F y P del análisis de varianza multivariado, considerando los tres factores y las propiedades monitoreadas.

| Propiedad | Tiempo | Terraza | Condición | Propiedad | Tiempo | Terraza | Condición |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|------------|-------------|-------------|
| Arena | F = 3.09 | F = 229.71 | F = 13.69 | Ca ²⁺ | F = 1.66 | F = 2.18 | F = 2.24 |
| | P = 0.0532 | P = 0.0000* | P = 0.0005* | | P = 0.1998 | P = 0.1452 | P = 0.1399 |
| Limo | F = 3.62 | F = 227.30 | F = 8.07 | K ²⁺ | F = 2.31 | F = 0.3355 | F = 3.84 |
| | P = 0.0334* | P = 0.0000* | P = 0.0063* | | P = 0.1087 | P = 0.5648 | P = 0.0552 |
| Arcilla | F = 0.4362 | F = 80.43 | F = 14.53 | Nitrógeno total | F = 0.3084 | F = 0.3460 | F = 14.42 |
| | P = 0.6487 | P = 0.0000* | P = 0.0004* | | P = 0.7359 | P = 0.5588 | P = 0.0004* |
| Densidad aparente | F = 0.0357 | F = 79.27 | F = 51.15 | Fósforo soluble | F = 0.4260 | F = 0.5690 | F = 0.1133 |
| | P = 0.9649 | P = 0.0000* | P = 0.0000* | | P = 0.6447 | P = 0.4539 | P = 0.7377 |
| Porosidad | F = 1.27 | F = 24.53 | F = 23.35 | CO ₃ | F = 0.0541 | F = 35.63 | F = 8.51 |
| | P = 0.2881 | P = 0.0007* | P = 0.0001* | | P = 0.9474 | P = 0.0000* | P = 0.0051* |
| Materia orgánica | F = 0.7952 | F = 2.23 | F = 25.13 | ‡CE | F = 0.8506 | F = 4.98 | F = 0.0003 |
| | P = 0.4566 | P = 0.1408 | P = 0.0007* | | P = 0.4327 | P = 0.0297* | P = 0.9868 |
| pH | F = 2.76 | F = 6.53 | F = 22.25 | Infiltración | F = 0.4282 | F = 13.21 | F = 39.08 |
| | P = 0.0718 | P = 0.0134* | P = 0.0001* | | P = 0.6538 | P = 0.0006* | P = 0.0000* |
| CICT [†] | F = 0.1226 | F = 0.5540 | F = 3.01 | Capacidad de campo | F = 0.7859 | F = 0.1226 | F = 4.79 |
| | P = 0.8849 | P = 0.4599 | P = 0.0884 | | P = 0.4608 | P = 0.8849 | P = 0.0328* |

† CICT = capacidad de intercambio catiónico total, ‡ CE = conductividad eléctrica, * = diferencia significativa ($P < 0.05$).

de stocks, entre más grande sea una partícula su precipitación será más rápida y su desplazamiento será menor; así, al ser más grandes las arenas se mueven menos y, además, por su tamaño tienen mayor probabilidad de ser atrapadas por las raíces y residuos orgánicos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Bochet *et al.* (1998) y Wezel *et al.* (2000), quienes, al trabajar con islas de fertilidad, demostraron que en el suelo protegido de la isla, al tener en su superficie abundante hojarasca, residuos orgánicos y agregados pequeños estables, se reduce la erosión y, por lo tanto, el desplazamiento de partículas, sobre todo las de mayor tamaño (arenas). Por otra parte, el limo se acumula más en los sitios con suelo desnudo, donde se deposita más por efecto del escurrimiento superficial. Con anterioridad, ya se señaló que el limo, por sus características, tiene gran movilidad (Dregne, 2002). Esto no significa que los suelos desnudos pierdan las arenas, lo que ocurre es que reciben o ganan más limo y arcilla, lo cual provoca cambios en la proporción de las tres clases de partículas.

Otro aspecto que también contribuye a la fluctuación de la textura es que los suelos de las terrazas fluviales, dado su origen acumulativo, presentan una granulometría bastante heterogénea (Charlton, 2007). Además, hay que agregar la condición geomorfológica de las terrazas, las cuales, como ya se mencionó, se encuentran en una

etapa de retroceso, sujetas un intenso proceso de erosión diferencial, lo cual afecta a la textura del suelo.

Las propiedades que muestran diferencias significativas, con respecto a condición del sitio, son la densidad aparente ($F = 51.15$, $P = 0.0000$) y la porosidad ($F = 23.35$, $P = 0.0001$), ambas propiedades relacionadas entre sí. Este comportamiento está determinado por las fluctuaciones de la materia orgánica. Los suelos protegidos, al tener mayor cantidad de materia orgánica, presentan más espacio poroso, lo que provoca un decremento de la densidad aparente (Dexter *et al.* 2008). Estos resultados son similares a los encontrados por Albaladejo *et al.* (1998), al evaluar los cambios en las propiedades de un suelo donde se removió la vegetación.

La infiltración es la propiedad que muestra la diferencia estadística más significativa y notoria con respecto al estatus del sitio ($F = 39.08$, $P = 0.0000$), por lo cual se considera que es uno de los mejores indicadores del estatus de los sitios. La cantidad de agua que puede entrar en un suelo protegido por una cubierta vegetal es mayor que en el suelo desnudo; el suelo protegido deja pasar más agua, por ser más poroso, gracias a la materia orgánica y a otras propiedades como la textura y la estructura. En el suelo desnudo, el impacto de las gotas de lluvia produce la rotura de los agregados y la separación de las partículas; así, las partículas más finas van obturando los poros de la superficie y forman



Figura 3. Formación de costras y sellado en suelos desnudos por incremento del limo (fotografía del sitio M2-D, marzo de 2002).

un sello que reduce la entrada de agua y aumenta el escurrimiento y la erosión (Dregne, 2002 y Le Houérou, 2002).

El pH también muestra una diferencia estadística significativa ($F = 22.25$, $P = 0.0001$): los valores menos alcalinos se presentan en los sitios protegidos (Cuadros 3 y 4). Si se considera que todos los sitios monitoreados tienen el mismo clima, el mismo suelo y una geoquímica más o menos similar, entonces las diferencias en el pH sólo pueden ser consecuencia de la condición del sitio; es decir, si el suelo está protegido o no. Los sitios protegidos presentan menor evaporación y mayor entrada de agua, lo cual provoca un lavado más eficiente de las bases; por el contrario, en sitios desnudos se evapora más agua, lo que favorece el ascenso e incremento de sales en la superficie. Por otra parte, hay que considerar también el efecto acidificante que tiene la materia orgánica (Wezel *et al.*, 2000).

La materia orgánica ($F = 22.25$, $P = 0.0001$) y el nitrógeno ($F = 16.39$, $P = 0.0043$) son otras propiedades que muestran un comportamiento estadísticamente distinto en los suelos desnudos y protegidos. Es clara y notoria la diferencia entre los suelos con vegetación y los que están desnudos. Es obvio que la diferencia está determinada por la presencia de la cubierta vegetal, principal fuente de materia orgánica y de nitrógeno del suelo. Albaladejo *et al.* (1998) indican que cuando las plantas se remueven el carbono del suelo decrece muy rápido. Estos resultados concuerdan con los de Perroni-Ventura *et al.* (2006), quienes evaluaron el comportamiento del carbono y de varios nutrientes, con respecto a la presencia de distintas asociaciones vegetales, en Zapotitlán, Puebla, y encontraron importantes diferencias en el contenido de nutrientes en las diferentes coberturas que evaluaron.

CONCLUSIONES

-Los tres factores estudiados (tiempo, condición y suelo) tuvieron un efecto significativo sobre las propiedades estudiadas. Sin embargo, la condición del sitio fue el factor que más impacto tuvo en la fluctuación de las propiedades.

-También se observa que no existieron interacciones entre los factores, ya que actúan de forma independiente.

-La mayoría de las propiedades evaluadas no mostraron grandes cambios con respecto al tiempo, lo que indica que cuatro años no fueron suficientes para registrar la variación de las propiedades. Se encontró que el tipo de suelo se comporta como un factor de predisposición al deterioro; los lugares más susceptibles son los que tienen suelos arcillo-limosos, con baja cantidad de materia orgánica y elevado contenido de carbonatos.

-La condición del sitio fue el factor más determinante en las diferencias entre los suelos protegidos y los desnudos, siendo las propiedades más impactadas por este factor: textura, densidad aparente, porosidad, pH, carbonatos, infiltración, retención de humedad, materia orgánica y nitrógeno. De todas ellas, la materia orgánica parece ser la propiedad de mayor peso, ya que su presencia tiene una influencia considerable en el funcionamiento del suelo. Se comprobó que la materia orgánica genera más poros y aumenta la entrada y reserva de agua.

-Los suelos desnudos no permiten el crecimiento de plantas porque, al tener bajos contenidos de materia orgánica y más limo, son más densos, compactos y tienden a formar sellos y costras, lo que disminuye la retención de agua e incrementan la aridez del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Unidad de Biología y Prototipos de la Facultad de Estudios Superiores de Iztacala, UNAM, por el financiamiento y apoyo al proyecto. Se agradece también a todos los estudiantes de la carrera de Biología que colaboraron en el trabajo de campo. Nuestra gratitud al Biólogo Ángel Durán Díaz por el asesoramiento en el análisis estadístico de los resultados.

LITERATURA CITADA

Albaladejo, M. J., R. Martínez-Mena, and V. Castillo. 1998. Soil degradation and desertification induced by vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Use Manage.* 14: 1-5.

- Aveyard, J. M. 1988. Land degradation: changing attitudes, why? *J. Soil Conserv.* 44: 46-51.
- Bochet, E., J. L. Rubio, and J. Poesen. 1998. Relative efficiency of three representative scrubland species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology* 23: 139-150.
- Buitrón B., E. y J. Barceló-Duarte. 1980. Nerineidos (Mollusca-Gasteropoda) del Cretácico Inferior de la Región de San Juan Raya, Puebla. *Revista del Instituto de Geología UNAM* 4: 46-55.
- Charlton, R. 2007. *Fundamentals of fluvial geomorphology.* Routledge and the Taylor & Francis Group. London, U. K.
- Dexter, A. R., G. Richard, D. Arrouays, E. A. Jolivet, and O. Duval. 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144: 620-627.
- Diouf, A. and E. Lambin. 2001. Monitoring land-cover changes in semi-arid regions: remote sensing data and field observations in the Ferlo, Senegal. *J. Arid Environ.* 48: 129-148.
- Dregne, H. E. 2002. Land degradation in the drylands. *Arid Land Res. Manage.* 16: 99-132.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2001. *Guidelines for qualitative assessment of land resources and degradation.* FAO. Rome, Italy.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5a ed. Serie Libros 6. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F.
- Hana, A. and S. Jauffret. 2008. Are long-term vegetation dynamics useful in monitoring and assessing desertification processes in the arid steppe, southern Tunisia. *J. Arid Environ.* 72: 557-572.
- IUGS (International Union of Geological Sciences). 2001. *Geoindicators: tools for assessing rapid environmental changes.* The US Global Change Research Information Office. [En línea]. Disponible en: <http://www.gcrio.org/geo/title.html>. (Consulta: febrero 24, 2001).
- Le Houérou, H. N. 2002. Man-made deserts: desertization processes and threats. *Arid Land Res. Manage.* 16: 1-36.
- Michelena, R. y C. Irutia 2002. La degradación del suelo. pp. 12-45. *In: Publicaciones del Instituto Nacional de Suelos.* Buenos Aires, Argentina.
- Oldeman, L. R. 1988. Global assessment of soil degradation (GLASOD): guidelines for general assessment of true status human-induced soil degradation. International Soil Reference and Information Centre. Wageningen, The Netherlands.
- Paz, M. J., J. Sánchez, and F. Visconti. 2006. Combined use of GIS and environmental indicators for assessment of chemical, physical and biological soil degradation in Spanish Mediterranean Region. *J. Environ. Manage.* 79: 150-162.
- Perroni-Ventura, Y., C. Montaña, and F. García O. 2006. Relationship between soil nutrient availability and plant species richness in a tropical semiarid environment. *J. Vegetation Sci.* 17: 719-728.
- Porta, J., M. López-Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente.* 3er ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- SEMARNAP-UNAM-INEGI (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca-Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática). 2000. *Inventario Nacional Forestal.* SEMARNAP. México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Informe de la situación del medio ambiente en México. pp. 85-121. *In: Compendio de estadísticas ambientales.* SEMARNAT, México.
- Shugang, J. and T. Akiyama. 2005. A precise, unified method for estimating carbon storage in cool-temperate deciduous forest ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* 134: 70-80.
- Soriano, M., C. M. Asensio, H. Delgado y F. J. Lozano. 2000. Riesgo de degradación física en el término municipal de Pechina (Almería, España). *Serie Edafología* 7-3: 93-103.
- Stocking, M. y N. Murnaghan. 2003. *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra.* Trad. al español por C. Padilla y J. Abadejo. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Van Lynden, G. W. J. and T. Kuhlman. 2002. Review of degradation assessment methods. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/agl/agll/lada/emailconf.stm> (Consulta: abril 7, 2004).
- Wezel, A., J.-L. Rajot, and C. Herbrig. 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agroecosystems in semi-arid Niger. *J. Arid Environ.* 44: 383-398.