

POROSIDAD DEL SUELO EN TRES SUPERFICIES TÍPICAS DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO NAZAS

• José Luis González-Barrios • Guillermo González-Cervantes •
• Eduardo Chávez-Ramírez •

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Resumen

Este trabajo presenta el estudio de la porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas: superficie de bosque de pino-encino, superficie de pradera con pastizal y superficie semidesnuda por sobre pastoreo y pisoteo del ganado bovino. La porosidad del suelo se estudió, mediante el análisis de imagen, en monolitos no perturbados, considerando dos parámetros morfológicos: tamaño y forma de los poros. Los resultados muestran que la porosidad total es mayor en el suelo superficial de bosque y de pradera (0.6 y $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en promedio, respectivamente), donde se observan macroporosidades importantes (con poros superiores a 2 mm^2 de forma irregular) asociadas con la presencia de un espeso mantillo de pino-encino o con las abundantes raíces de pastos. En cambio, la superficie semidesnuda afectada por pastoreo presenta una porosidad total reducida ($0.32 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en promedio), con una microporosidad dominante de forma redonda, producto de la compactación y degradación por pisoteo del ganado. Este trabajo muestra las características de la porosidad edáfica en relación con el uso actual del suelo en la cuenca alta del río Nazas.

Palabras clave: espacio poroso, análisis de imagen, compactación del suelo, manejo de cuencas.

Introducción

La porosidad del suelo superficial determina en gran medida los procesos de infiltración y escurrimiento del agua que influyen en la erosión hídrica y el transporte de agua en el suelo (Horowitz y Walling, 2005). El flujo de agua y aire se realiza a través de la porosidad del suelo, condicionada por el tamaño, abundancia y distribución de poros. La porosidad es también un indicador de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Buckman y Brady, 1977).

La clasificación de la porosidad, de acuerdo con sus características de conducción o almacenamiento, puede resumirse en tres categorías (González-Cervantes *et al.*, 2004):

1. Porosidad sub-microscópica, con poros demasiado pequeños que dificultan el agru-

pamiento de moléculas de agua y por lo tanto tampoco permiten el flujo continuo.

2. Porosidad microscópica o capilar, con poros dados por la matriz del suelo y la estructura entre agregados; su morfología depende de la génesis y del uso del suelo; el tamaño de los poros es de entre 15 y $30 \text{ }\mu\text{m}$.
3. Macroporosidad, con poros grandes no capilares que pueden tener diferente origen: actividad microbiana, grietas, cambios volumétricos, contracción-expansión del suelo y efectos inducidos (labranza) en el caso de suelos agrícolas (Pires *et al.*, 2008). Los macroporos dependen también de la presencia de una cubierta vegetal y de las condiciones climáticas (Tuller y Or, 2002; Kutílek, 2004).

La perturbación de la porosidad, provocada por una carga que supere la resistencia a la defor-

mación del suelo y produzca el colapso de los poros, conduce a procesos de degradación edáfica y a la declinación productiva de los ecosistemas (Osuna-Ceja *et al.*, 2006), además de provocar impactos hidrológicos y de régimen de aireación (Li *et al.*, 2009; Muhammad y Rattan, 2009).

El estudio de la porosidad del suelo es importante por su contribución a los servicios ambientales hidrológicos, como la captación, transporte y almacenamiento del agua en la cuenca hidrológica. El objetivo del presente trabajo fue cuantificar la porosidad del suelo y sus variaciones en la capa superficial de 0 a 15 cm de profundidad, mediante la técnica del análisis de imagen en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas, que es una importante zona de captación de agua de lluvia para las actividades productivas del norte árido de México. Las características morfológicas y volumétricas de la porosidad en el perfil superficial del suelo pueden desempeñar un papel importante en la función de transporte y retención del agua en esta cuenca.

Después de una breve presentación de la zona de estudio, se abordarán los materiales y métodos utilizados, y se discutirán los resultados encontrados en las tres superficies analizadas.

Materiales y métodos

Zona de estudio y descripción del suelo

La zona de estudio se ubica en la cuenca alta del río Nazas a 25° 30' de latitud norte y 105° 35' de longitud oeste, en el estado de Durango, México; corresponde a una zona montañosa de origen volcánico en la Sierra Madre Occidental, con una superficie de 18 300 km², con un rango de altitud de 1 600 a 3 200 msnmm (figura 1). El régimen climático característico de esta zona va del clima semi-seco templado BS1kw(w) al templado sub-húmedo C(wo), con temperatura media anual entre 15.9 y 13.3 °C, respectivamente, y una

pluviometría media anual entre los 500 y 900 mm (García, 1993); estas precipitaciones generan una gran cantidad de escurrimientos hídricos que son transportados por el suelo hacia arroyos y acuíferos (Descroix *et al.*, 2004).

En la zona de estudio se seleccionaron tres superficies de suelo típicas de los espacios naturales o productivos, con el propósito de estudiar la porosidad del suelo. Estas superficies cuentan con las siguientes características:

1. Bosque. Superficie de suelo bajo bosque de pino-encino con mantillo tipo mor (Duchaufour, 1995) de 10 cm de espesor, formado por abundantes acículas de *Pinus* spp y hojarasca de *Quercus* spp, con un suelo de tipo cambisol crómico (FAO, 1998) de textura franco arenosa.
2. Pradera. Superficie de suelo bajo pastizal de *Bouteloua gracilis*, con un mantillo de tipo mull de 1 cm de espesor, formado por restos de pasto moderadamente incorporados al suelo de tipo cambisol crómico con textura franco arenosa.
3. Semi-desnuda. Superficie de suelo semi-desnuda con evidencia de compactación por el pisoteo y el sobre pastoreo del ganado bovino, de aspecto mineral sin mantillo evidente, con suelo tipo cambisol crómico de textura franco arenosa.

El suelo de los sitios, en términos edafológicos y geológicos, corresponde al mismo tipo, desarrollado sobre roca volcánica de tipo riolita e ignimbrita, y con variantes en su superficie que pueden ser asociadas con su uso actual.

La medición de la porosidad en secciones delgadas del suelo se realizó con herramientas del análisis de imagen y de microscopía óptica, asumiendo que la porosidad del suelo puede cuantificarse mediante un análisis de imagen en dos dimensiones (Bouma *et al.*, 1979; Sort y Alcañiz, 1999; Maragos *et al.*, 2004; Mooney *et al.*, 2007).

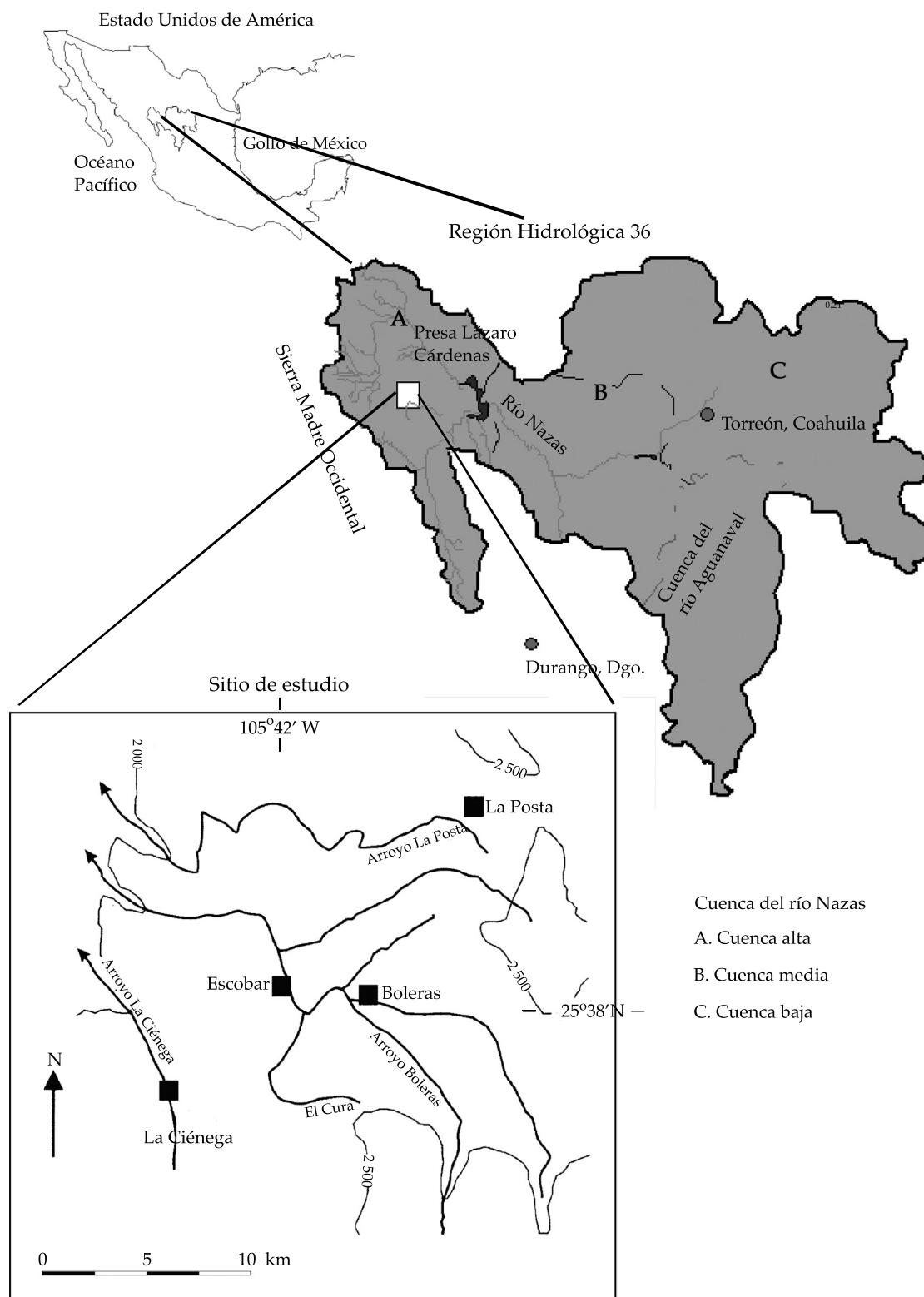


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Toma de muestras de suelo y procesamiento en laboratorio

En cada superficie y a una profundidad de 0 a 15 cm se realizaron mediciones físicas y químicas: textura, densidad aparente, materia orgánica y carbonatos totales. Se obtuvieron muestras de suelo sin alterar (tres monolitos de forma cúbica con dimensiones de 15 x 15 x 15 cm en cada superficie), para caracterizar la porosidad mediante la metodología de Vergière (Bourrier, 1965). En el laboratorio de suelos del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (INIFAP CENID-RASPA), los nueve monolitos fueron sometidos a un proceso de deshidratación mediante el desplazamiento del agua con acetona por un tiempo de 24 horas, después fueron saturados con resina de poliéster (Scout-Bader Crystic fabricada en los Estados Unidos), adicionando un pigmento fluorescente (Uvitex) a la luz ultravioleta “luz negra” para diferenciar espacios vacíos y material mineral del suelo (Murphy *et al.*, 1977). Una vez impregnada y solidificada la resina, los monolitos de suelo pudieron ser seccionados horizontalmente a dos pares de profundidad contrastada (2, 3, 12 y 13 cm de profundidad) y sobre las superficies, previamente pulidas, de cada sección se tomaron imágenes digitales con luz blanca y luz ultravioleta, para observar y cuantificar la porosidad con el método de análisis de imagen (González-Cervantes *et al.*, 2004).

El análisis de imagen

Las imágenes digitales se obtuvieron con una cámara Olympus de sensor óptico CCD (siglas en inglés de *charge-coupled device*) de 4.1 mega píxel, iluminando las secciones pulidas de cada monolito con luz blanca y luz ultravioleta. Se tomaron en cuenta dos escalas de observación con las siguientes resoluciones espaciales: escala M1 para observar los macroporos, con toma rectangular de 127 x 95

mm (12 065 mm²), con una resolución espacial de 56 µm por píxel; escala M2 para observar los microporos con apoyo de un microscopio estereoscópico (ME), con toma rectangular de 13 x 10 mm (130 mm²) a una resolución de 6 µm por píxel. El tratamiento de imágenes se realizó con el analizador *Image Pro Plus*® v4.5 (Media Cibernética, Maryland, EU).

Distribución de la porosidad

La porosidad total de los suelos se estableció a partir de los valores de densidad aparente (pd), que se obtuvieron de 0 a 15 cm de profundidad utilizando el método volumétrico (Descroix *et al.*, 2002). Para el cálculo de la porosidad total se utilizó la ecuación (1), posteriormente se fraccionó en tres grupos de acuerdo con los datos obtenidos en el analizador de imagen:

$$\eta = 1 - (pd/pr) \quad (1)$$

Donde η es la porosidad total (en por ciento), pd es la densidad aparente y pr es la densidad real (2.65 g/cm³), valor promedio reportado en la literatura (Hillel, 1980).

Caracterización de los poros

Las características de los poros se definieron de acuerdo con dos parámetros morfológicos:

1. Tamaño, expresado por el área de la sección de cada poro en la imagen utilizando la ecuación (2). Este parámetro fue agrupado en tres clases en cada escala (cuadro 1):

$$T = 4\pi (\text{área}) \quad (2)$$

Donde T es el tamaño (en mm²); área es la superficie de la sección del poro de acuerdo con Coster y Chermant (1985).

2. Con base en la forma, dada por un índice de alargamiento (Ia), que considera el área y el perímetro de la sección de cada poro en la

Cuadro 1. Caracterización con base en el tamaño de poro.

Categoría o clase de poro	Escala M1	Escala M2
T1	Mayores de 10 mm ²	
T2	De 10 a 2 mm ²	
T3	Menores de 2 mm ²	
T4		Mayores de 0.1 mm ²
T5		De 0.1 a 0.02 mm ²
T6		Menores de 0.02 mm ²

Cuadro 2. Caracterización con base en la forma del poro.

Forma	Índice de alargamiento
Redondos	< 5
Alargados o fisuras	5 a 7
Irregulares	> 10

imagen, aplicando la ecuación (3) (Hallaire *et al.*, 1997), y que da origen a tres clases de formas (cuadro 2):

$$F = (\text{perímetro})^2 / 4\pi (\text{área}) \quad (3)$$

Resultados y discusión

Las características fisicoquímicas del suelo se presentan en el cuadro 3. Se puede constatar que la clase de textura es igual en los tres tipos de superficie y sólo con ligeras diferencias respecto al contenido de arena (mayor en la superficie semidesnuda, menor en la superficie de pradera), así como para el contenido de limo (menor en la superficie semidesnuda) y el contenido de arcilla (mayor en la superficie de pradera y menor en la superficie de bosque). En contraste, se observan marcadas diferencias en el contenido de materia orgánica (MO) y en los valores de densidad aparente (Da): en las superficies de bosque y de pradera se presentan contenidos relativamente altos de MO (11.5 y 6.2 g/100 g, respectivamente) asociados con valores bajos y moderados de Da (1.02 y 1.50 g/cm³, respectivamente). En la superficie de suelo semidesnudo disminuye drásticamente el contenido de materia orgánica (1.4 g/100 g)

y se incrementa el valor de la Da (1.80 g/cm³), lo cual revela un problema de compactación del suelo, que es 20% superior al de la superficie de pradera y 76% mayor al de la superficie de bosque. Esta compactación es más importante que la reportada por Gómez *et al.* (2002), para un Gleysol de textura migajón arcillosa en medio forestal de California, Estados Unidos, cuya compactación alcanza un 11% respecto al suelo no perturbado (Gómez *et al.*, 1995; Gómez *et al.*, 2002).

El contenido de carbonatos totales se mantiene siempre bajo en los tres tipos de superficie, con una ligera diferencia entre ellos (mayor en la superficie semidesnuda, menor en la superficie de bosque), lo cual contribuirá a una mayor o menor cementación o dureza de la matriz mineral del suelo (Descroix *et al.*, 2002).

El contenido de materia orgánica y la densidad aparente son indicadores del volumen ocupado por la porosidad del suelo (González-Cervantes *et al.*, 2004), sin embargo, no proporcionan información específica sobre el tamaño y la morfología de los poros que constituyen los agregados y la estructura del suelo, razón por la cual se realizó el análisis de imagen.

Como se mencionó anteriormente, el tratamiento de las imágenes digitales tomadas con luz ultravioleta permite representar la porosidad del suelo en dos dimensiones mediante imágenes binarias, en las cuales el programa *Image Pro Plus®* v4.5 puede cuantificar la porosidad; determinando la forma, tamaño y abundancia de los poros. La figura 2 presenta las imágenes binarias de

Cuadro 3. Características físicas y químicas del suelo en tres superficies típicas, a profundidad de 0-15 cm.

Superficie	Arena	Limo	Arcilla	Textura	Materia orgánica	Densidad aparente	Carbonatos totales
	----- % -----				g/100 g	g/cm ³	g/100 g
1. Bosque	76	16	8	Franco arenosa	11.5	1.02	2.58
2. Pradera	68	14	18	Franco arenosa	6.2	1.50	3.80
3. Semi-desnuda	82	6	12	Franco arenosa	1.4	1.80	5.97

los cuatro niveles de profundidad estudiados en cada superficie de suelo. Un análisis de la morfología de la porosidad pone en evidencia la mayor abundancia relativa de poros en las superficies de bosque y pradera. A continuación se detallan esas diferencias con base en la abundancia, tamaño y forma de los poros de las 36 imágenes analizadas.

Distribución de la porosidad

El perfil de la porosidad del suelo, determinado a partir de la densidad aparente (ecuación (1)) y del análisis de imagen, se expone en la figura 3, donde también se muestran los valores promedio y de desviación estándar para las porosidades observadas en los tres tipos de superficie. Es importante mencionar que la variabilidad de la porosidad es mayor en la escala de observación M2, ya que sus imágenes tienen una menor superficie, pero con mayor resolución espacial, que las de la escala M1, como se explicó en la sección de materiales y métodos.

La porosidad total promedio en la superficie de bosque es elevada ($0.62 \text{ m}^3/\text{m}^3$), el de la superficie de pradera es moderada ($0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$) y el de la superficie semidesnuda es baja ($0.32 \text{ m}^3/\text{m}^3$). En los perfiles del suelo de bosque y de pradera, la distribución de la porosidad muestra una tendencia similar, con macroporos en rangos de 0.17 a $0.22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y de 0.16 a $0.23 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (escala M1), y con microporos en rangos de 0.09 a $0.12 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y de 0.10 a $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (escala M2), respectivamente. La porosidad sub-microscópica y la microporosidad muestran

un incremento a 3 cm de profundidad, como si este nivel correspondiera a la influencia máxima del mantillo que se incorpora a los agregados estructurales en ambas superficies de suelo. En contraste con las condiciones antes descritas, la superficie de suelo semidesnuda muestra una macroporosidad muy reducida de 2 a 3 cm de profundidad ($0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en la escala M1 y $0.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$ en la escala M2) y una porosidad sub-microscópica más importante en los niveles próximos a la superficie; la macroporosidad aumenta ligeramente de 12 a 13 cm de profundidad, lo cual indica un menor efecto de la compactación por el ganado. De acuerdo con Gómez *et al.* (1995), la profundidad afectada por la compactación depende de la humedad del suelo y del peso del ganado, aunque en la mayoría de los casos no va más allá de los 40 cm de profundidad.

Análisis morfológico de la porosidad

En la figura 4 se muestra la porosidad que corresponde al tamaño y forma de poro en los cuatro niveles de profundidad observados. Los histogramas presentan seis barras verticales que corresponden a las clases de tamaño de poros (de T1 a T6) y éstas se dividen a su vez en tres subclases, según la forma de los poros (irregulares, alargados y redondos). La superficie de bosque y de pradera muestran, en los cuatro niveles de profundidad, una cantidad mayor de macroporos T1 y T2 (poros de más de 10 mm^2 y poros de 2 a 10 mm^2 , respectivamente), que la superficie de suelo semidesnuda. Estos macroporos son en su mayoría de forma irregular y alargada.

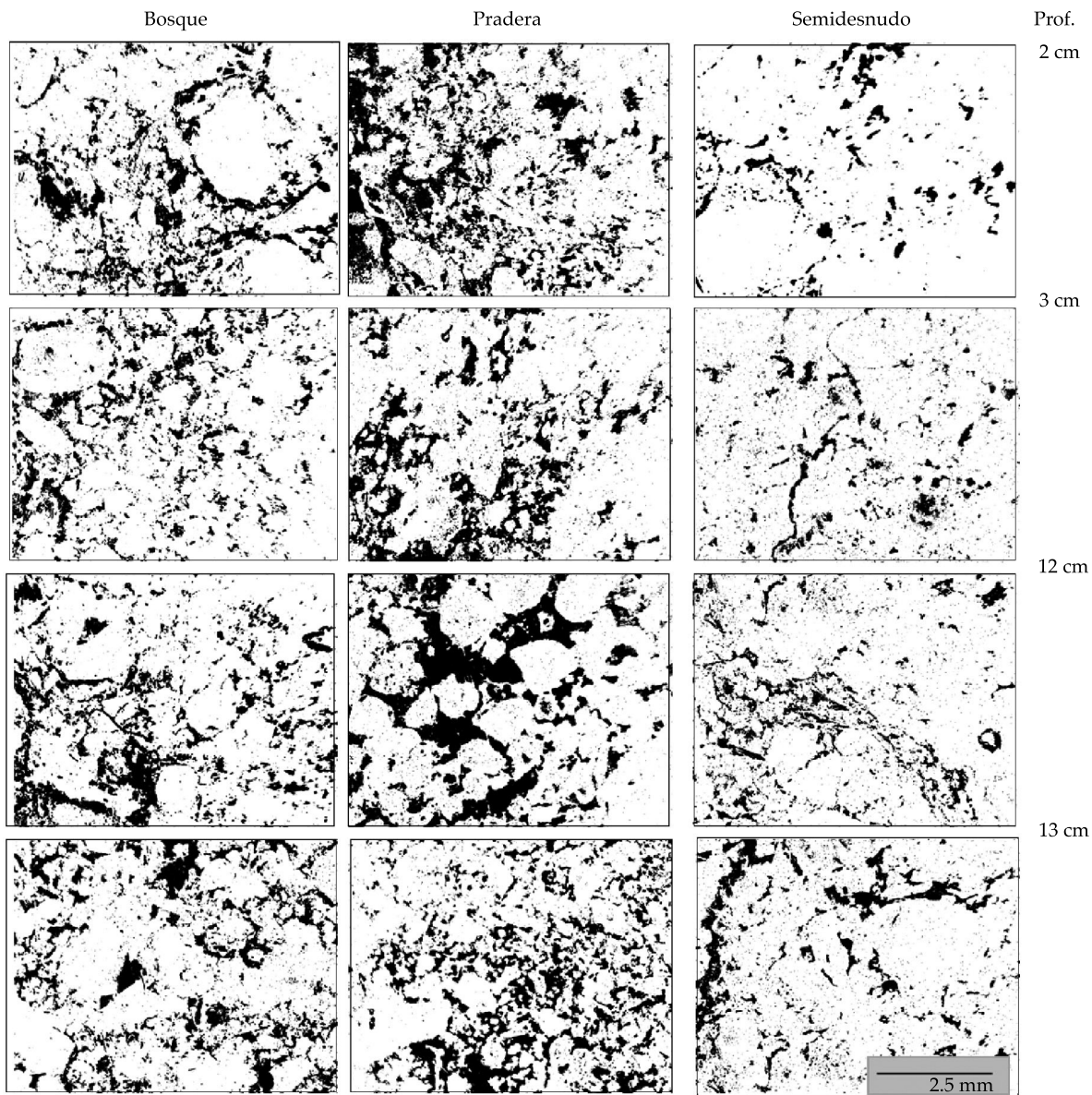


Figura 2. Morfología de la porosidad en los tres tipos de superficie de suelo estudiados a escala M2.

Por el contrario, el tipo de porosidad T1 y T2 es el más reducido en la superficie de suelo semidesnuda, como si tendiese a desaparecer. En las tres superficies de suelo, la diferencia menos marcada en cuanto a macroporosidad se presenta en la clase de poros T3 (menores a 2 mm^2 , formada en su mayor parte por poros redondos y algunos alargados), que muestra una proporción importante en todas las superficies, con un aumento de esa

importancia en los niveles más profundos de estudio (12 y 13 cm), sobre todo en la superficie de suelo semidesnudo. La microporosidad mediana y pequeña (T5 de 0.02 a 0.1 mm^2 y T6 menor a 0.02 mm^2), formada en su mayoría por poros de forma redonda y alargada, muestra una proporción casi constante en las tres superficies de suelo, pero con una ligera diferencia en el suelo semidesnudo, donde se observa una mayor proporción de este tamaño

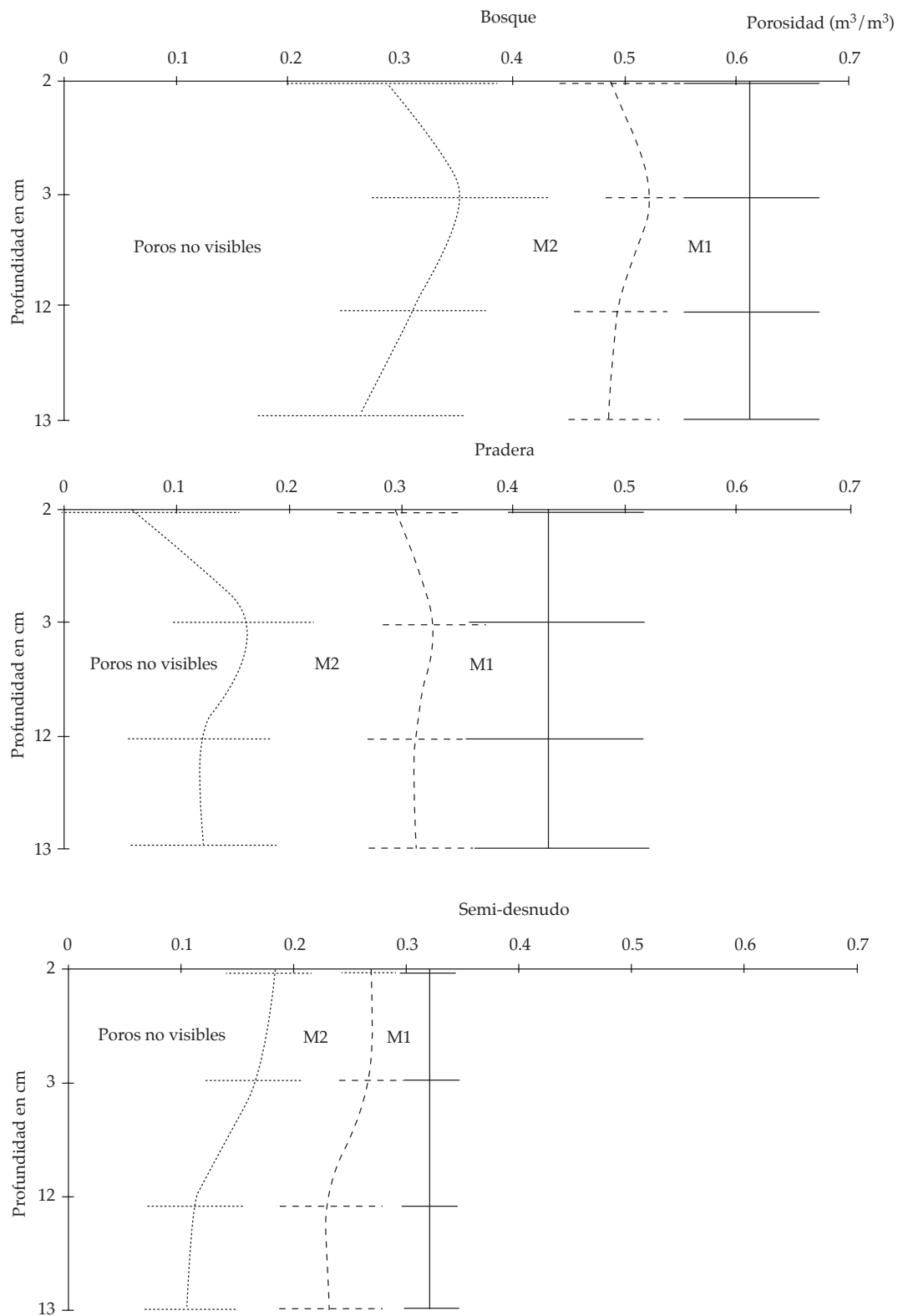


Figura 3. Distribución de la porosidad en las tres superficies típicas de suelo (valores promedio y desviación estándar graficados para los cuatro niveles de profundidad).

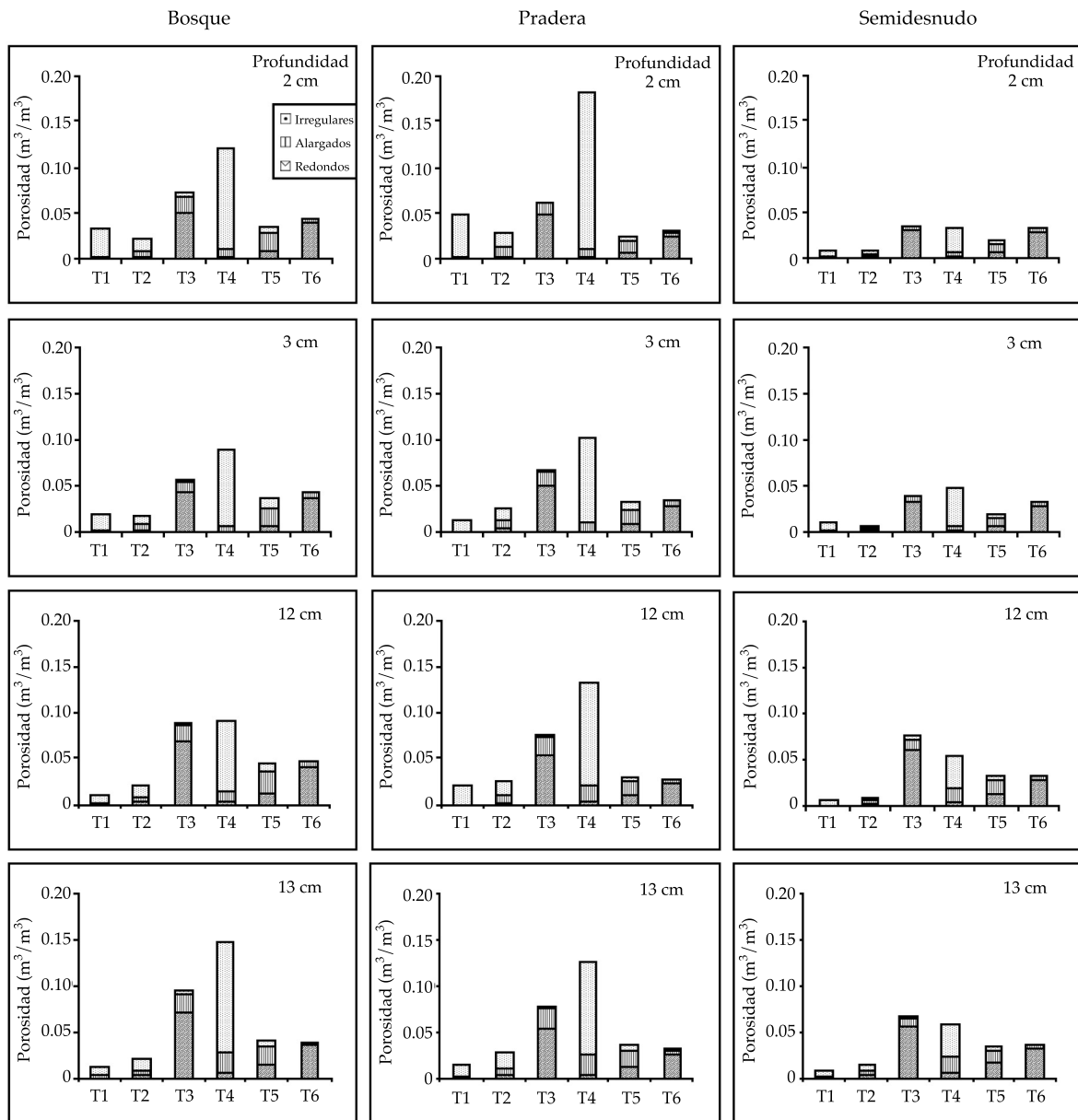


Figura 4. Porosidad correspondiente al tamaño y forma de poros observados.

de poros en los niveles profundos (12 y 13 cm). La microporosidad de tamaño “grande” (T4 mayor a 0.1 mm^2 , formada en su mayoría por poros de forma irregular) muestra la mayor importancia tanto en la superficie de pradera como en la de bosque, no así en la superficie semidesnuda, en la que comparte su

importancia con la clase T3 (poros de tamaño menor a 2 mm^2).

En las diferentes superficies de suelo, la mayoría de los poros tiene forma irregular o redonda, y en menor proporción la forma alargada de acuerdo con el índice de alargamiento del análisis de imagen. Los poros

conforme irregular se presentan principalmente en clases de tamaños T1, T2 y T4, es decir, los poros de mayor tamaño observados en ambas escalas (M1 y M2). Por el contrario, los poros con forma redonda se sitúan especialmente en clases de tamaños T3, T5 y T6, es decir, en los poros de menor tamaño. Por su parte, los poros de forma alargada se ubican con mayor frecuencia en los tamaños de poros T3, T4 y T5, esto es, en los poros de tamaño mediano.

De esta manera, el análisis de imagen permite establecer la importancia relativa de tamaños y formas de poros presentes en el suelo de cada tipo de superficie estudiada.

Estos resultados permiten concluir que los tres tipos de superficie estudiados tienen diferencias en su porosidad total, así como en la proporción de tamaños y formas de los poros. Estas diferencias condicionarían el flujo de agua y aire en el suelo, lo cual sería importante cuantificar, como lo sugieren Descroix *et al.* (2002).

Conclusiones

El análisis de imagen usado en este trabajo muestra las diferencias cualitativas y cuantitativas de la porosidad del suelo en los tres tipos de superficie típicas estudiadas en la cuenca alta del río Nazas: las superficies de bosque y de pradera presentan una porosidad parecida, aunque la macroporosidad de ambas superficies esté asociada con factores diferentes: en la superficie de bosque, la macroporosidad de forma irregular está relacionada con la presencia de un espeso mantillo que provee una gran cantidad de materia orgánica (que proviene de las acículas de pino y las hojas de encino) de lenta mineralización e incorporación a la capa superficial del suelo; mientras que en la superficie de pradera, dicha macroporosidad está asociada con la masa radicular de la vegetación herbácea (pastos y anuales) que penetra la superficie del suelo y que debe propiciar una buena aireación y circulación del agua en el suelo. Los pastos promueven el desarrollo de una

fuerte estructura granular, lo cual favorece el balance de macro y microporos. En contraste, la superficie de suelo semidesnuda por pisoteo y sobre pastoreo del ganado bovino presenta una porosidad reducida, compuesta en su mayoría por microporos de forma redonda, asociados con la matriz endurecida del suelo, que revela un estado de degradación por compactación física.

Las características de la porosidad del suelo analizadas en este estudio comparativo muestran que es necesario tomar precauciones para evitar que las superficies de suelo semidesnudas por pisoteo y sobre pastoreo del ganado aumenten, ya que pueden ocasionar una disminución del flujo de agua y aire hacia horizontes profundos del suelo y exacerbar el proceso de erosión, como lo sugieren los trabajos de Descroix *et al.* (2007). Las repercusiones hidrológicas de tales superficies deben recomendar un mayor control de las actividades productivas en la zona y ser objeto de estudios finos de hidrodinámica superficial, para conocer mejor el funcionamiento hidrológico de los suelos forestales y poder generar información útil para la toma de decisiones. El fomento y control de las actividades forestales, agrícolas y pecuarias en esta zona deberán tener un mayor respaldo en trabajos científicos que ayuden a orientar el manejo de las cuencas hidrológicas hacia un futuro más sostenible.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a las instituciones que apoyaron la realización de estos trabajos, en particular al Conacyt y al INIFAP.

Recibido: 09/06/09

Aceptado: 24/06/11

Referencias

- BOUMA, J., JONGERIUS, A., and SCHOONDERBEEK, D.
Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay using micromorphometric data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 43, 1979, pp. 261-264.

- BOURRIER, J. La mesure des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode Vergière. *Bulletin Technique du Génie Rural*. No. 73, 1965, pp. 112-124.
- BUCKMAN, H. y BRADY, N. Naturaleza y propiedades de los suelos. Barcelona: Editorial Montaner y Simon, 1977, 590 pp.
- COSTER, M. y CHERMANT, J.L. *Précis d'analyse d'image*. Paris: CNRS, 1985, 120 pp.
- DESCROIX, L., GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L., VANDERVAERE, J.P., VIRAMONTES, D., and BOLLERY, A. An experimental analysis of hydrodynamic behavior on soils and hill slopes in a subtropical mountainous environment (Western Sierra Madre, Mexico). *Journal of hydrology*. No. 266, 2002, pp. 1-14.
- DESCROIX, L., GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L. y ESTRADA, J. La Sierra Madre Occidental, una fuente de agua amenazada. Gómez Palacio, México: Ediciones INIFAP-IRD, 2004, pp. 133-143.
- DESCROIX, L., VIRAMONTES, D., ESTRADA, J., GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L., and ASSELINE, J. Investigating the spatial and temporal boundaries of hortonian and hewlettian runoff in Northern Mexico. *Journal of hydrology*. No. 346, 2007, pp. 144-158.
- DUCHAUFOR, Ph. *Pédologie. Sol, Végétation, Environnement*. Paris: Abregés Editorial Masson, 1995, pp. 324.
- FAO. *World Reference Base for Soil Resources*. World Resources Report No. 84. Rome: The Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998, pp. 91.
- GARCÍA, G. Variabilidad de los elementos del clima. En *Estudio de los factores que influncian los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36*. Loyer, J.L., Estrada, J., Jasso, R. y Moreno, L. Gómez Palacio, México: Ediciones INIFAP-ORSTOM, 1993, pp. 121-142.
- GÓMEZ, G., CAMBELL, D.J., and ROBERTSON, E.A. Algunas propiedades físicas relacionadas con la calidad del suelo bajo tres tipos de vegetación. *Terra*. Vol. 13, núm. 4, 1995, pp. 207-215.
- GÓMEZ, G., POWERS, R.F., SINGER, M.J., and HORWATH, W.R. Soil compaction effects on growth of young Ponderosa Pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*. Vol. 66, No. 4, 2002, pp. 1334-1343.
- GONZÁLEZ-CERVANTES, G., SÁNCHEZ-COHEN, I. y ROSSIGNOL, J.P. Morfología de los poros de circulación preferencial del agua en el suelo mediante técnicas de análisis de imagen. Caso de una cuenca del norte de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. 19, núm. 3, julio-septiembre de 2004, pp. 15-23.
- HALLAIRE, V., CURMI, P. et WIDIATMAKA. Morphologie de la porosité et circulations préférentielles en saturé. Cas des horizons d'un système pédologique armoricain. *Etude Gestions de sols*. Vol. 4, No. 2, 1997, pp. 115-126.
- HILLEL, D. *Environmental soil physics*. New York: Academic Press, 1980.
- HOROWITZ, A.J. and WALLING, D.E. (editors). *Sediment Budgets*. International Association of Hydrological Sciences IAHS Press. Publication No. 292, vol. 2, 2005, pp. 262-270.
- KUTÍLEK, M. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil & Tillage Research*. Vol. 79, 2004, pp. 175-184.
- LI, Y.X., TULLBERG, J.N., FREEBAIRN, D.M., and LI, H.W. Functional relationships between soil water infiltration and wheeling and rainfall energy. *Soil & Tillage Research*. Vol. 104, 2009, pp. 156-163.
- MARAGOS, P., SOFOU, A., STAMOU, G.B., TZOUVARAS, V., PAPTAEODOROU, E. and STAMOU, G.P. Image analysis of soil micromorphology: feature extraction, segmentation, and quality inference. *EURASIP. Journal on Applied Signal Processing*. Vol. 2004, No. 6, 2004, pp. 902-912.
- MOONEY, S.J., MORRIS, C., CRAIGON, J., and BERRY, P. Quantification of soil structural changes induced by cereal anchorage failure: Image analysis of thin sections. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. Vol. 170, No. 3, 2007, pp. 363-372.
- MUHAMMAD, A. and RATTAN L. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. *Soil and Tillage Research*. Vol. 103, 2009, pp. 364-372.
- MURPHY, C.P., BULLOCK, P., and TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. *Journal of Soil Science*. Vol. 28, 1977, pp. 498-518.
- OSUNA-CEJA, E., FIGUEROA-SANDOVAL, B., OLESCHKO, K., FLORES-DELGADILLO, M.L., MARTÍNEZ-MENES, M. y GONZÁLEZ-COSSIO, F. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*. Vol. 40, 2006, pp. 27-38.
- PIRES, L.F., CÁSSARO, F.A.M., REICHARDT, K., and BACCHI, O.S. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. *Soil and Tillage Research*. Vol. 100, 2008, pp. 72-77.
- SORT, X. and ALCÁÑIZ, J.M. Modification of soil porosity after application of sewage sludge. *Soil and Tillage Research*. Vol. 49, 1999, pp. 337-345.
- TULLER, M. and OR, D. Unsaturated hydraulic conductivity of structured porous media. *Vadose Zone Journal*. Vol. 1, 2002, pp. 14-37.

Abstract

GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L., GONZÁLEZ-CERVANTES, G. & CHÁVEZ-RAMÍREZ, E.
Soil porosity for three typical surfaces in the Nazas River upper watershed. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 1, January-March, 2012, pp. 21-32.

This work presents a soil porosity study for three typical soil surfaces in the Nazas River upper watershed. The soil surfaces studied were: pine-oak forest, grassland and bare soil due to cattle trampling. Using image analyses, soil porosity in undisturbed soil monoliths was studied taking into account the size and shape of pores. Results show higher soil porosity in forest and grassland surfaces (0.6 and 0.43 m³/m³, respectively), with significant macro-porosity (irregular-shaped pores larger than 2 mm²) associated with pine-oak humus and grass roots, and reduced porosity in bare soil (0.32 m³/m³), with significant micro-porosity (round-shaped pores) due to compaction and soil degradation. This work shows soil porosity features related to current land use in the Nazas River upper watershed.

Keywords: soil porosity, image analysis, soil compaction, watershed management.

Dirección institucional de los autores

Dr. José Luis González Barrios

Dr. Guillermo González Cervantes

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas
y Pecuarias

Km. 6.5 Canal Sacramento, Zona Industrial

35071 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO

Teléfono: +52 (871) 1590 105

Fax: +52 (871) 1590 104

gonzalez.barrios@inifap.gob.mx

gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx

M.C. Eduardo Chávez Ramírez

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera

Km. 6.5 margen derecha Canal Sacramento

35140 Gómez Palacio, Durango, MÉXICO

Teléfono: +52 (871) 1590 105

Fax: +52 (871) 1590 104

chavez.eduardo@inifap.gob.mx

eduardo_chavez17@hotmail.com