

Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia

Indicators of Physical Soil Quality of the Cereal Producing Andean Area of the Department of Nariño, Colombia

Indicadores de qualidade física do solo da zona cerealífera andina do departamento de Nariño, Colômbia

Belisario Volverás-Mambuscay,¹ Édgar Amézquita-Collazos,² José Manuel Campo-Quesada³

¹ MSc, Universidad Nacional de Colombia. Investigador máster, Corpoica. Pasto, Colombia. bvolveras@corpoica.org.co

² PhD, University of Reading. q.e.p.d. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. eamezquitac@scsuelo.org.co

³ Ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Colombia. Profesional, Corpoica. Pasto, Colombia. jcampoq@corpoica.org.co

Fecha de recepción: 19/01/2016

Fecha de aceptación: 27/04/2016

Para citar este artículo: Volverás-Mambuscay B, Amézquita-Collazos E, Campo-Quesada JM. Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 17(3):361-377

DOI: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:513

Resumen

Con el fin de determinar los cambios de algunos indicadores de calidad física en suelos en la zona cerealera fría de Nariño, Colombia, se evaluó el efecto del tiempo de uso en diferentes sistemas y pendientes. Los resultados mostraron que el aumento del tiempo de uso generó cambios negativos en algunos indicadores hídricos y volumétricos. El agua disponible disminuyó de manera proporcional a la profundidad, en un 12 % y un 33 % para suelos cultivados durante 45 y 70 años, respectivamente. El cambio a uso agrícola de rotación trigo-maíz (rt-m) durante 25 y 70 años aumentó el nivel de escorrentía en un 95 % y un 97 % respectivamente en cuanto al testigo, lo que significa que algunas propiedades

hídricas del suelo se afectan antes de los 25 años de uso intensivo. Frente al testigo, la densidad aparente del suelo con pastura se incrementó un 27,6 % y la del suelo con uso agrícola se incrementó un 10 %. Para el suelo con uso agrícola (rt-m) no hubo diferencias en densidad aparente ni densidad real, lo que sugiere que, en pocos años de uso, el suelo pierde volumen. Con excepción de la pastura, la porosidad total alcanzó valores agronómicos aceptables, con porcentajes de microporos mayores al 50 % de la porosidad total, lo que puede generar problemas de drenaje, suministro de agua y transporte de nutrientes hacia las plantas.

Palabras clave: manejo del suelo, contenido de agua en el suelo, infiltración, cereales, Nariño (Colombia)

Abstract

With the purpose of finding changes in some of the indicators of soil physical quality, in the Andean cereal growing areas of Nariño, Colombia, the effect of time of use in different systems and outstanding was evaluated. The results showed that the increase in the labour labor intensity of generated using negative changes in some of the water and volumetric indicators. Available water decreased with at the mentioned evaluation depth in 12 % and 33 % in the soil cultured cultivated for during 45 and 70 years, respectively. The change to agricultural use corn-wheat rotation (rt- m) for during 25 and 70 years increased the level of runoff

in 95 % and 97 % compared to the control, which means that some water will affects soil hydric properties before 25 years of intensive use. Compared to the control, the apparent density of the pasture and the agricultural use increased in 27.6 % and 10 %, respectively. Within the agricultural use (rt- m), were no differences in bulk density and true density were observed, suggesting that in a few years of use, the soil loses volume. The total porosity reached acceptable agronomic levels, although the level of micropores was approximately 50 %. This can lead to drainage problems, water and nutrients supply to the plant and hydraulic conductivity.

Keywords: Soil management, Soil water content, Infiltration, Cereals, Nariño (Colombia)

Resumo

Com o fim de determinar os câmbios de alguns indicadores de qualidade física em solos na zona cerealífera fria de Nariño, Colômbia, avaliou-se o efeito do tempo de uso em diferentes sistemas e pendentes. Os resultados mostraram que o aumento do tempo de uso gerou câmbios negativos em alguns indicadores hídricos e volumétricos. A água disponível diminuiu de maneira proporcional à profundidade, em um 12 % e um 33 % para solos cultivados durante 45 e 70 anos, respectivamente. O câmbio a uso agrícola rotação trigo-milho (rt-m) durante 25 e 70 anos aumentou o nível de escoamento em um 95 % e um 97 % a respeito ao controle, o que significa que algumas propriedades hídricas do

solo se afetam antes dos 25 anos de uso intensivo. Frente ao controle, a densidade aparente do solo com pastagem incrementou-se num 27,6 % e a do solo com uso agrícola se incrementou um 10 %. Para o solo com uso agrícola (rt-m) não houve diferenças em densidade aparente nem densidade real, o que sugere que, em poucos anos de uso, o solo perde volume. Com exceção da pastagem, a porosidade total alcançou valores agrônomicos aceitáveis, com percentagens de microporos maiores a 50 % da porosidade total, o que pode gerar problemas de drenagem, fornecimento de água e transporte de nutrientes para as plantas.

Palavras chave: manejo do solo, conteúdo de água no solo, infiltração, cereais, Nariño (Colômbia)

Introducción

Uno de los mayores problemas a nivel mundial para el uso de tierras y para la producción de alimentos en el trópico es la degradación de los suelos y del agua (FAO 1979, 1993, 2009; Lal 1997, 2004; Pingali et al. 2005). En Colombia, la erosión en laderas y la pérdida de estructura acompañada de compactación subsuperficial en áreas de agricultura intensiva son los procesos de degradación física de suelos que disminuyen la capacidad productiva de las tierras del país (Guerrero 1995; IGAC 1998). La erosión predomina en la región andina, donde se asienta alrededor del 75% de la población y se realiza gran parte de la actividad económica y de desarrollo de la nación (FAO 1990; Amézquita 1994; Méndez 1999). Las características físicas que más se afectan por las acciones de uso del suelo son las relacionadas con los cambios en la estructura, que disminuyen la respuesta de suelos y cultivos a la aplicación de enmiendas y fertilizantes, así como la capacidad del suelo para aceptar, retener y ceder agua a los cultivos (Ruiz 1999; Hakansson 2000; Volverás 2004, 2009; Gosai et al. 2009).

En la zona cerealera fría de Nariño, el problema principal derivado del uso de los recursos naturales es la pérdida de la capacidad productiva del suelo. Esto ocurre debido a prácticas agronómicas de baja sostenibilidad, como la labranza temprana excesiva, la eliminación de coberturas en fuertes y las prolongadas pendientes que, en la presente investigación, degradaron el 25% del área. Otras causas observadas fueron el progresivo agotamiento de nutrientes y los cambios negativos de las características físicas y biológicas (García 1990; Gómez y García 1997; Benavides et al. 2000; Volverás 2004, 2005; Fenalce 2006). La estructura económica predominante es el minifundio, que genera una alta presión sobre los recursos naturales por la agricultura y el pastoreo de los residuos de cosecha (Gómez y García 1997; Malagón 1998; Fenalce 2006; Volverás 2006).

El uso principal del suelo es trigo en monocultivo o en sencillas secuencias con maíz, que tienen una participación del 70% en la dieta diaria y aportan entre el 30% y el 70% del total de calorías. Además,

estos cultivos son la base de producción de alimentos para cerca de 12 mil pequeños productores. También se siembran pequeñas áreas de papa o cebada y sobresale un área de pastos. En este contexto y con usos intensivos del suelo por largos periodos de tiempo, los indicadores socioeconómicos y de calidad del suelo desmejoran y ponen en riesgo la seguridad alimentaria de cerca de 25.000 productores de economía campesina (Corpoica 2002, 2008; Volverás 2006; FAO 2009).

Son prácticas comunes el pastoreo y la quema de los residuos de cosecha, así como la anticipada preparación del suelo con un gran número de labores que incluye arados y rastras que lo pulverizan. Estos implementos rompen terrones y agregados, exponen la materia orgánica inaccesible al ataque de microorganismos y disminuyen la estabilidad estructural que afecta la función hídrica y volumétrica del suelo, con pérdidas para este (Volverás 2004, 2006, 2009; Raczkowski et al. 2009; Williams et al. 2009).

Debido a la magnitud global de la problemática del recurso del suelo, es necesario el diagnóstico evaluativo de la condición de este en estudios orientados a contrarrestar la degradación o mejorar la productividad. Esto se hace con el fin de determinar propiedades sensibles a cambios negativos y así poder tomar medidas de manejo para mantener las condiciones del suelo necesarias para que las raíces de las plantas no encuentren limitaciones para absorber y transportar nutrientes y agua a la parte aérea (Amézquita y Londoño 1997; Albanesi et al. 2003; Ospinar 2006; Rondón et al. 2006; Su et al. 2007; Álvarez y Steinbach 2009; Jin et al. 2009; Vieira-Cavaliere et al. 2009).

En Nariño, a pesar de las tendencias macroeconómicas de la globalización y del adelgazamiento de las políticas para este sector, los cereales de clima frío representan una importante actividad, especialmente, para productores minifundistas de la zona alta andina. Por esta razón se hace necesario garantizar la productividad de los suelos a largo plazo, para lo cual se requiere la evaluación de la condición de estos a fin de determinar atributos y limitantes que permitan

tomar medidas restaurativas para su mejoramiento y la disminución del impacto de uso de los recursos naturales. En este sentido, el objetivo general de este estudio fue determinar los cambios de algunas propiedades del suelo, medidas a través de indicadores físicos en la zona cerealera fría de Nariño, con diferentes usos, por largos periodos de tiempo.

Materiales y métodos

Las evaluaciones de campo se realizaron en el año 2006, en la zona cerealera fría del departamento de Nariño, región andina al sur de Colombia, municipio de Contadero (75° 14' O; 0,5° 10' N), ubicado a 2.710 msnm. Esta zona presenta un clima frío seco, con un 81 % de humedad relativa, 12,5 °C de temperatura media anual y 880 mm de precipitación media anual (García y Pantoja 1998; Corpoica 2002).

Para obtener una cobertura ajustada al tiempo y al tipo de uso del suelo, antes de las evaluaciones de campo se realizó una encuesta mediante la cual se encontró que el tiempo de uso variaba entre 25 y 90 años, para una pendiente predominante de un 25 %. La encuesta permitió definir los siguientes tratamientos uso/tiempo/pendiente:

1. Suelo no intervenido por 25 años: 25 % de pendiente (testigo)
2. Uso en pastura de kikuyo por 25 años: 25 % de pendiente
3. Uso agrícola de rotación trigo-maíz (rt-m) por 25 años: 12 % de pendiente
4. Uso agrícola (rt-m) por 25 años: 25 % de pendiente
5. Uso agrícola (rt-m) por 45 años: 12 % de pendiente
6. Uso agrícola (rt-m) por 45 años: 25 % de pendiente
7. Uso agrícola (rt-m) por 70 años: 12 % de pendiente
8. Uso agrícola (rt-m) por 70 años: 25 % de pendiente

Como el estudio mide el efecto acumulativo del uso del suelo por largos periodos de tiempo, en el mes de junio de 2006 se realizaron simulaciones de lluvia en la superficie del suelo para determinar

infiltración, escorrentía, producción de sedimentos y muestreo de suelo de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm de profundidad. Esto se hizo con el objetivo de determinar la distribución y estabilidad de agregados, densidad aparente, distribución de tamaño de partículas, densidad real, curvas de retención de humedad, porosidad total, distribución de tamaño de poros y contenido de materia orgánica.

Las evaluaciones se realizaron en 24 fincas, correspondientes a ocho tratamientos por tres repeticiones con diseño de bloques al azar. Para la lluvia simulada se utilizó el simulador de lluvia portátil CIAT (Cobo 1998) y la metodología de campo propuesta por Torres (2000) y por Campo (2004). Con base en la precipitación local, se utilizó una intensidad de 120 mm/h y, por simulación, se aplicaron 9.336 cm³, correspondientes a una lámina total promedio de 74,3 mm. En el sitio de la simulación, antes y después de la prueba, se tomó una muestra del suelo para determinar la ganancia de humedad de este (Campo 2004).

Para el análisis del comportamiento de la infiltración, escorrentía y pérdida de suelo en función del tiempo, se hicieron gráficos que se ajustaron a regresión lineal por corresponder al comportamiento inicial de estos procesos. Cada gráfica fue de la forma $Y = b + mx$, donde b es el intercepto de la recta con el eje Y , y m es la pendiente de la recta, lo que permite la comparación entre tratamientos: al aumentar o disminuir m , aumenta o disminuye la tasa de cambio de la variable evaluada.

Para las curvas de retención de humedad, las muestras se equilibraron a succiones de 0,75 y 100 cm de columnas de agua en la mesa de tensión, y a presiones de 0,3, 1,0 y 15 bares en las ollas y platos de presión. Además, con el paquete estadístico SAS, versión 8.0, se realizó un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0,05$), para determinar el efecto de los tratamientos sobre los cambios de las propiedades físicas evaluadas.

Resultados y discusión

Contenido de humedad y agua disponible

La determinación de la curva de retención de agua por suelo tiene una gran importancia agrícola. Las curvas permiten estimar la cantidad de agua que un suelo puede almacenar dentro de límites dados de succión —es decir, la cantidad de agua de fácil aprovechamiento (succión baja) y de difícil aprovechamiento (succión alta) por las plantas— y permiten también obtener el comportamiento de la porosidad del suelo (Su et al. 2007). El cambio de la intensidad de uso del suelo tuvo un efecto negativo sobre el contenido de humedad. Las curvas de retención de humedad (figura 1) mostraron que el suelo con pastura presentó el menor contenido de humedad frente al testigo y frente al suelo de uso agrícola (rt-m), debido a la reducción de la porosidad

total por efecto de las altas cargas y los altos periodos de ocupación de la pastura —que es el manejo tradicional frecuente de las pasturas en el país— (Preciado 1997; Amézquita y Orozco 2000).

De 0 a 20 cm de profundidad a bajas tasas de succión, el suelo con pastura y el suelo de uso agrícola (rt-m), durante 70 años, a 12 % de pendiente, presentaron el menor contenido de humedad. En la misma capa de suelo, a altas tasas de succión (15 bares), el contenido de humedad del suelo de uso agrícola, durante 25, 45 y 70 años, respecto al testigo, disminuyó un 12 %, un 16 % y un 24 %, respectivamente. Con relación a la continuidad de la humedad, al profundizar hasta 40 cm, a bajas tasas de succión, el contenido de esta disminuyó en el uso agrícola con un 25 % de pendiente. Dicha disminución fue de 5 %, 7 % y 9 % para el suelo cultivado durante 25, 45 y 70 años, respectivamente (figura 1).

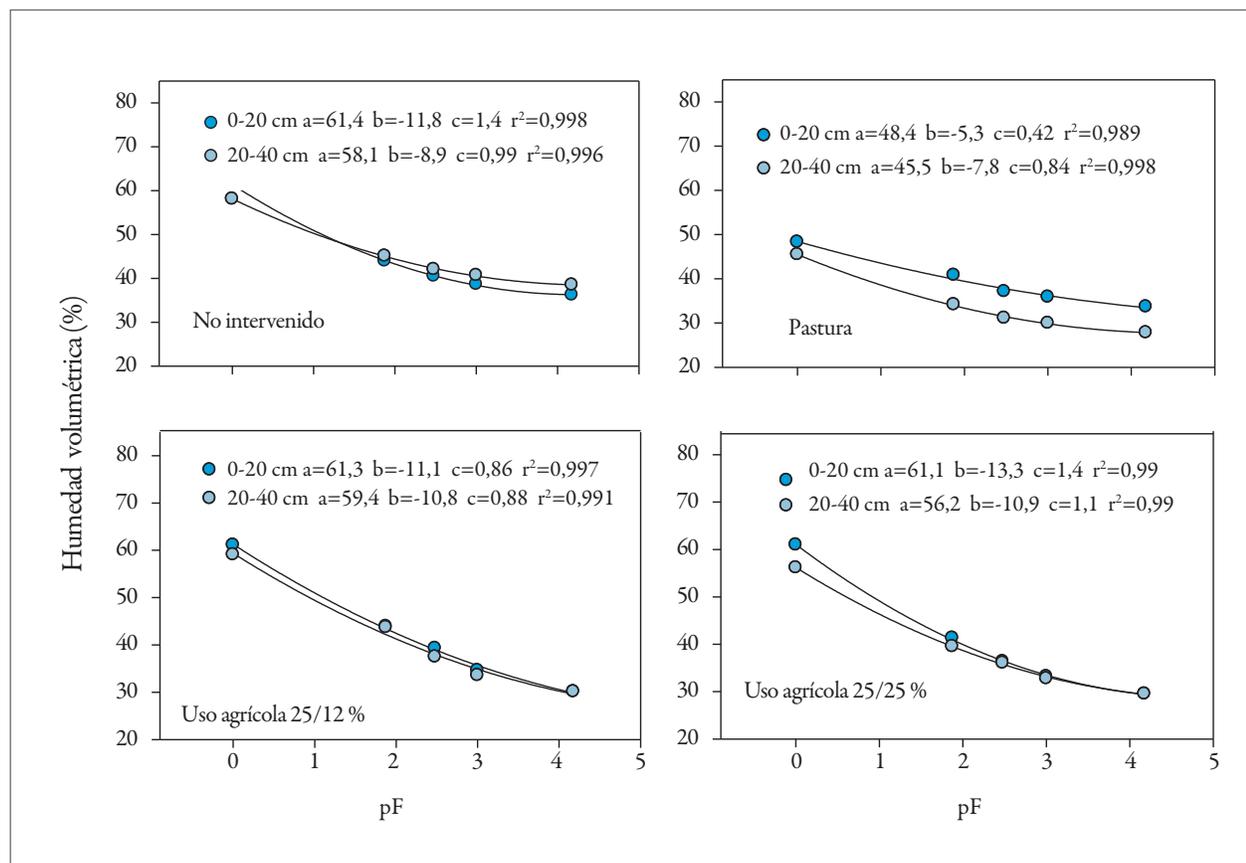


Figura 1. Curvas de retención de humedad para los tratamientos de uso del suelo ajustadas por la ecuación inversa cuadrática $Y = 1/(a + bX + cX^2)$. Zona triguera de Nariño.

Fuente: Elaboración propia

(Continúa)

(Continuación figura 1)

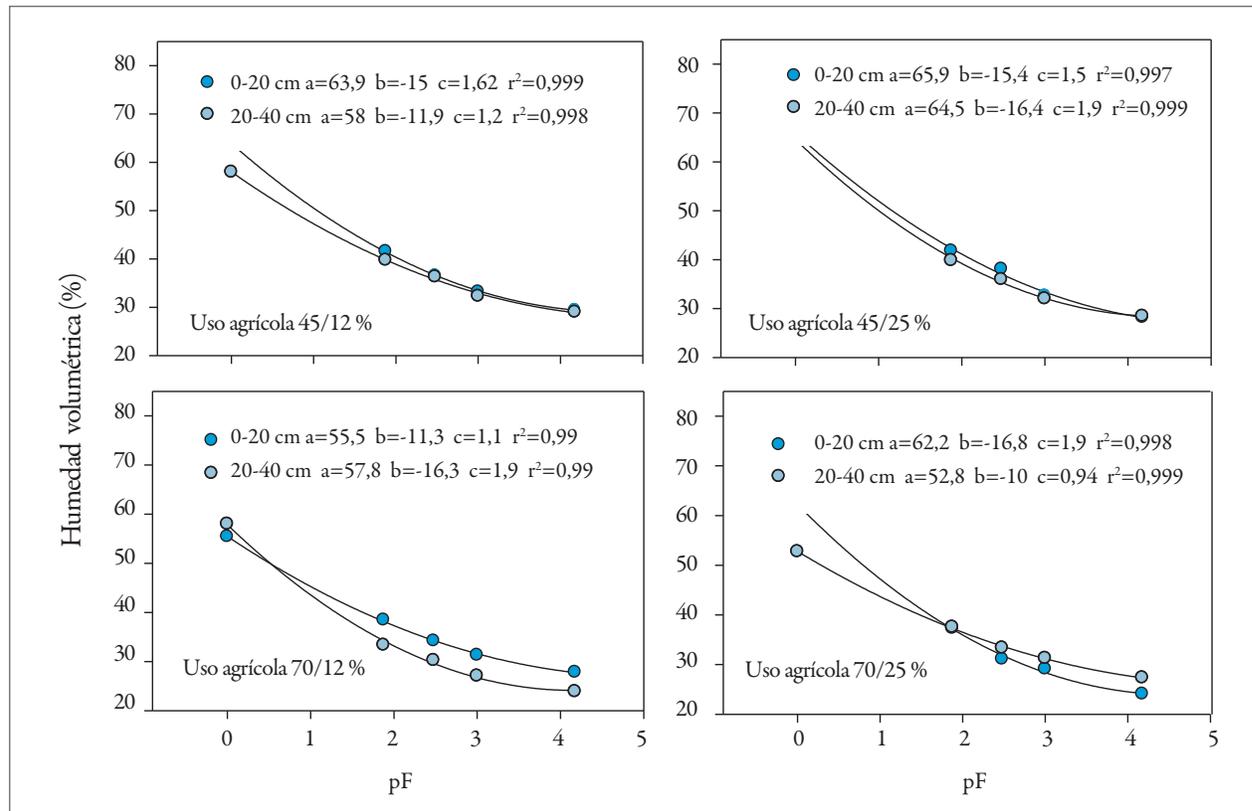


Figura 1. Curvas de retención de humedad para los tratamientos de uso del suelo ajustadas por la ecuación inversa cuadrática $Y = 1/(a + bX + cX^2)$. Zona triguera de Nariño.

Fuente: Elaboración propia

El grado de inclinación del terreno también tuvo efecto sobre el contenido de humedad. En las dos capas de suelo con altas tasas de succión, en uso agrícola durante 45 y 70 años, la humedad disminuyó un 10 % y un 14 % al pasar del 12 % al 25 % de pendiente. El manejo del suelo con altos niveles de labranza por varios años, en largas y fuertes pendientes, generó pérdida de materia orgánica (tabla 2) y de arcilla (figura 6), lo cual influyó en la capacidad del suelo para retener agua.

En los primeros 20 cm de profundidad, la disponibilidad de agua para las plantas en el suelo de uso agrícola fue un 49 % y un 28 % mayor a la disponibilidad para el suelo con pastura y para el testigo. En la capa de 20 a 40 cm de profundidad, el contenido de agua aprovechable presentó la misma tendencia, con un mejor comportamiento para el uso agrícola. La labranza y la incorporación constante del material

orgánico de las raíces y la parte aérea de gramíneas (como trigo y maíz) en el uso agrícola pueden contribuir a mejorar las condiciones para el almacenamiento de agua en el perfil (Orozco 1991; Preciado 1997; Amézquita et al. 1998; Galvis 2005).

Pérdida de agua por escorrentía

En el trópico se presentan serios problemas de escorrentía y erosión por el uso inadecuado de implementos de labranza. En efecto, en la zona cerealera fría de Nariño, el aflojamiento del suelo y la eliminación de coberturas al inicio de la temporada de lluvias generan terrones y agregados prácticamente sueltos que son susceptibles al desmoronamiento y al arrastre por agua de escorrentía. Esto determinó diferencias significativas ($p < 0,05$) en la lámina total de escorrentía, que aumentó gradualmente con el nivel de intervención del suelo (tabla 1).

En el suelo de uso agrícola cultivado durante 25 y 70 años, el nivel de escorrentía aumentó un 95 % y un 97 % respectivamente frente al testigo. La escorrentía del suelo cultivado durante 70 años fue un 22,5 % y un 29 % superior a la del suelo cultivado durante 25 años, con un 12 % y un 25 % de pendiente respectivamente. Aunque estadísticamente no hubo diferencia ($p > 0,05$), la tendencia general mostró que la escorrentía se incrementó al aumentar la

pendiente del terreno. En el suelo cultivado durante 25, 45 y 70 años, el nivel de escorrentía fue, en su orden, un 6 %, un 10,5 % y un 12,5 % superior al 25 % de la pendiente. El incremento en los niveles de escorrentía en los suelos más intervenidos demostró el impacto de las prácticas agronómicas actuales, las cuales están relacionadas con la degradación de algunas propiedades físicas determinantes en el proceso de retención de humedad (tablas 1 y 2).

Tabla 1. Efecto del tipo e intensidad de uso del suelo sobre la escorrentía, infiltración y pérdida de este, con lluvia simulada de 120 mm/h, en la zona andina de Nariño, Colombia

Tratamiento	Lámina total infiltrada (mm)	Lámina total de escorrentía (mm)	Suelo perdido total (g/m ²)	Profundidad de arada (m)
Testigo	60.945 a	1.095 c	0,763 d	0,000 c
Pastura	53.957 ba	6.047 c	3.640 d	0,000 c
rt-m 25/12 %	34.780 bc	26.685 b	30.410 bc	0,244 ba
rt-m 25/25 %	34.138 bc	28.335 b	56.118 a	0,211 b
rt-m 45/12 %	33.865 bc	28.920 b	32.392 bc	0,200 b
rt-m 45/25 %	29.992 bc	32.343 ba	40.638 ba	0,200 b
rt-m 70/12 %	26.070 c	34.458 a	17.732 dc	0,266 a
rt-m 70/25 %	21.013 c	39.277 a	32.388 bc	0,288 a

Los promedios con la misma letra no son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$); rt-m = uso agrícola rotación trigo maíz
Fuente: Elaboración propia

El cambio de uso del suelo afectó la dinámica de la lámina de escorrentía acumulada en función del tiempo (figura 2). Los suelos con menor intervención, como el testigo y la pastura, presentaron la menor tasa de escorrentía. Para el uso rt-m, la tasa de escorrentía aumentó un 28 %, al pasar de 25 a 70 años de uso, con un 25 % de pendiente. En el suelo cultivado durante 25, 45 y 70 años, la tasa de escorrentía se incrementó un 6 %, un 11 % y un 8 %,

al pasar de 12 % a 25 % de pendiente. Generalmente, los agricultores sobrepastorean sus lotes y queman los tamos de trigo y de cañas de maíz después de la cosecha, con el argumento de que dichos residuos no permiten una buena labranza para el ciclo siguiente. Esta práctica, más la labranza, pulveriza el suelo y favorece los procesos de escorrentía potenciados por las fuertes y prolongadas pendientes (Volverás 2006).

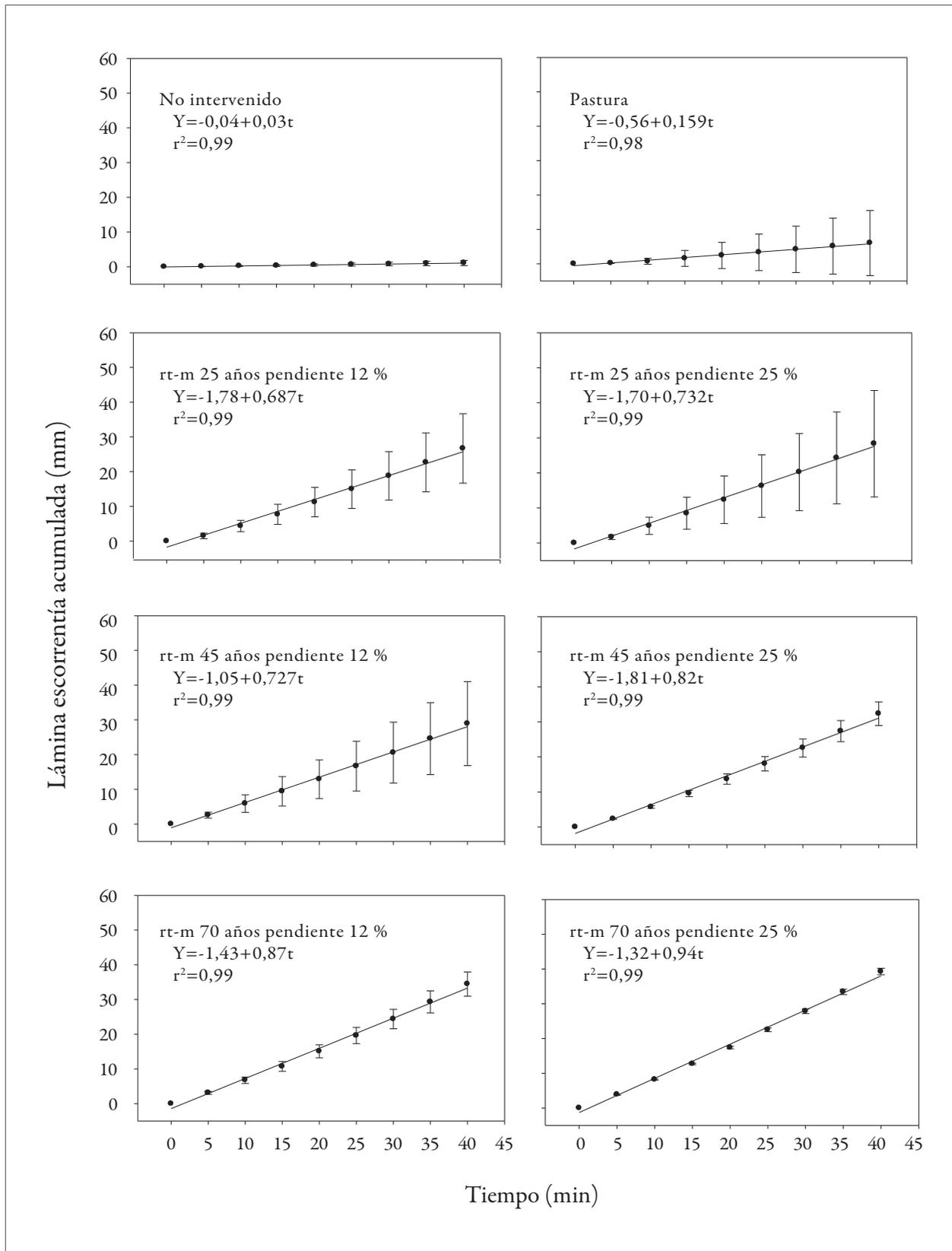


Figura 2. Dinámica de la lámina de escorrentía acumulada para lluvia simulada de 120 mm/h en función del tiempo de aplicación.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Efecto del tipo e intensidad de uso del suelo sobre algunas propiedades de este en la zona andina de Nariño, Colombia

Usos	MO (%)	Densidad real (g/cm ³)	Clase textural	Distribución del tamaño de partículas (%)			Densidad aparente (g/cm ³)	Estabilidad DMP
				Arena	Limo	Arcilla		
Testigo	6,78 bac	2,19 a	Far	41,09 b	25,83 bc	33,08 a	0,97 cb	2.855 a
Pastura	4,97 bc	2,46 b	Far	41,38 b	29,35 ba	29,26 a	1,34 a	2.733 ba
rt-m 25/12 %	5,20 bc	2,42 ba	F	49,78 a	29,04 bac	21,17 b	1,06 cb	2.188 bac
rt-m 25/25 %	6,72 bac	2,40 ba	F	46,88 ba	29,15 bac	23,97 b	1,05 cb	2.266 bac
rt-m 45/12 %	7,77 ba	2,34 bc	FarA	47,03 ba	31,04 a	21,92 b	1,03 cb	2.688 ba
rt-m 45/25 %	8,67 a	2,28 dc	FarA	50,82 a	29,24 bac	19,40 b	0,88 c	2.011 bc
rt-m 70/12 %	5,42 bc	2,42 ba	FarA	52,24 a	24,61 c	23,15 b	1,08 b	2.733 ba
rt-m 70/25 %	4,52 c	2,41 ba	FarA	51,31 a	25,37 bc	23,87 b	1,12 b	1.800 c

Las medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p < 0,05$); rt-m = uso agrícola con rotación trigo-maíz.

MO = materia orgánica; DMP = diámetro medio ponderado

Fuente: Elaboración propia

Infiltración del agua

El tipo de uso del suelo generó un efecto negativo significativo ($p < 0,05$) sobre la lámina total infiltrada, la cual disminuyó conforme se aumentó el nivel de intervención del primero. Con respecto al testigo, la infiltración del suelo cultivado durante 25, 45 y 70 años disminuyó un 44 %, un 48 % y un 61 %, respectivamente. Para el uso rt-m del suelo, la infiltración disminuyó con el tiempo, de tal manera que en los intervalos de 25 a 45 años y de 45 a 70 años, la lámina total infiltrada bajó un 12 % y un 30 %, respectivamente. Aunque estadísticamente el grado de inclinación del terreno no generó un efecto significativo ($p > 0,05$), la lámina total infiltrada disminuyó con el aumento de la pendiente; en

suelo cultivado durante 45 y 70 años, la infiltración disminuyó 11,5 % y 19 %, respectivamente, al pasar de un 12 % a un 25 % de pendiente (tabla 1).

El tipo de uso del suelo afectó la dinámica de la lámina de infiltración acumulada en función del tiempo (figura 3). El testigo presentó la mayor tasa de cambio, que disminuyó un 53 % al pasar a pastura. En suelo cultivado durante 25, 45 y 70 años, la disminución fue de 45 %, 51 % y 66 %, respectivamente. Para el uso agrícola rt-m, el grado de intervención del suelo y la pendiente del terreno afectaron la tasa de infiltración. El cambio de 12 % a 25 % de pendiente disminuyó la tasa de infiltración un 12 % y un 19 % en el suelo cultivado durante 45 y 70 años, respectivamente.

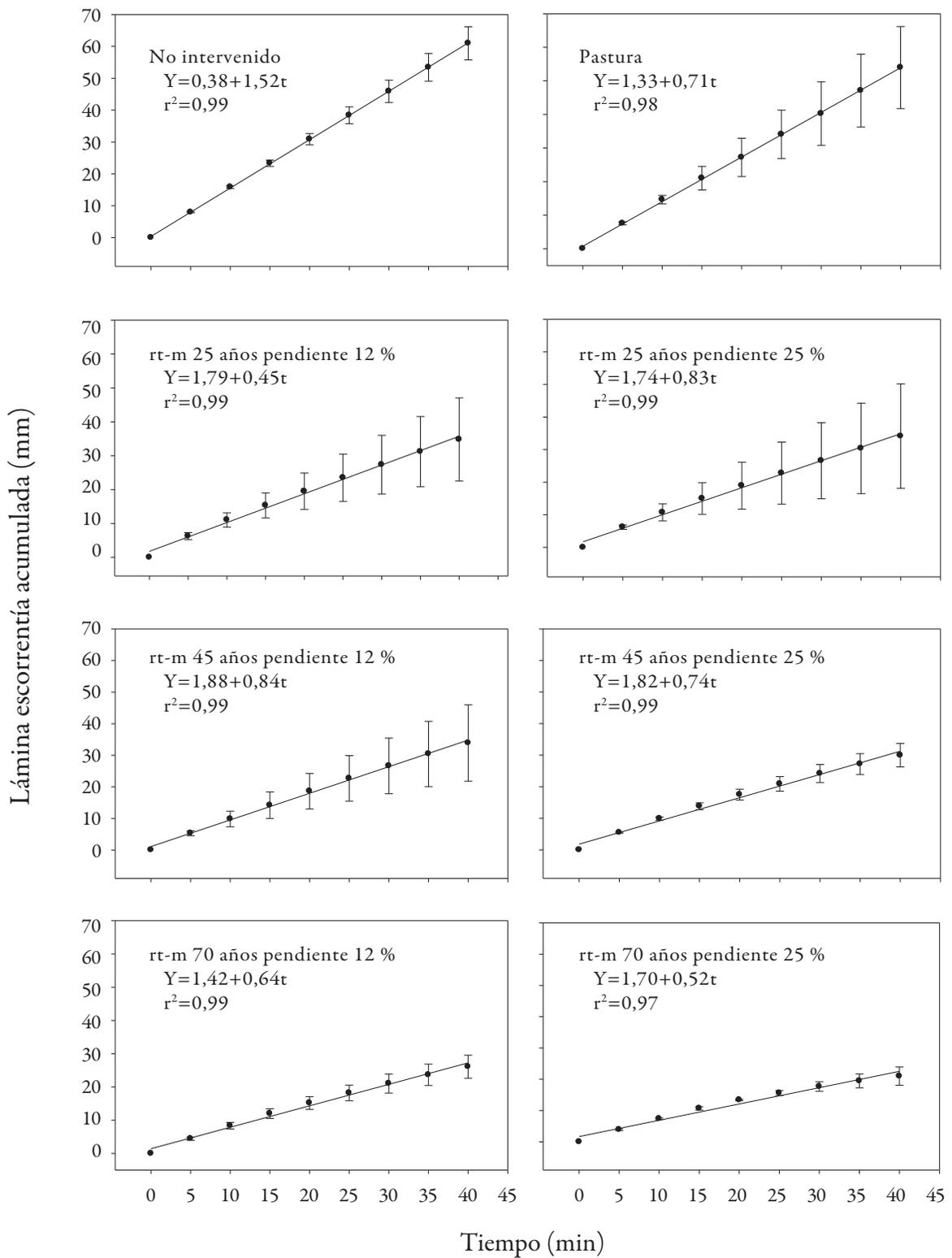


Figura 3. Dinámica de la lámina infiltrada acumulada para lluvia simulada de 120 mm/h en función del tiempo de aplicación.

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de la infiltración coincide con los resultados reportados por varios autores en estudios sobre el impacto del uso del suelo en ecosistemas tropicales. En dichos estudios hubo disminución de la capacidad de retención de agua con el aumento del tiempo de uso y del gradiente de inclinación del terreno (Amézquita y Orozco 2000; Sustaita-Rivera et al. 2000; Campo 2004; Galvis 2005; Montenegro 2005).

La capacidad del suelo para permitir la entrada de agua lluvia depende de la presencia de agregados superficiales estables, de la cobertura o de la rugosidad superficial del terreno, factores que propician la infiltración. El exceso de labranza conduce al sellamiento y encostramiento superficial, procesos que disminuyen el almacenamiento de agua. Esto quedó reflejado en la disminución de la tasa de infiltración del suelo cultivado durante 25 años (disminución de un 70,4% respecto al testigo) y demostró la fragilidad del suelo con el uso actual en las condiciones de laderas andinas de Nariño (figura 3).

La figura 4 muestra que el uso intensivo del suelo de ladera afectó negativamente los procesos hídricos

y contribuyó a la disminución de la capacidad productiva de este. De la lámina total aplicada, el testigo y la pastura infiltraron un 98,3% y un 94%. En el suelo cultivado durante 25, 45 y 70 años solo se infiltró, en su orden, un 56%, un 48% y un 35% de la lámina de agua aplicada.

La relación entre escorrentía y suelo erosionado correspondió a la comúnmente encontrada en agroecosistemas con uso intensivo. Las mayores pérdidas de suelo correspondieron a las mayores láminas de escorrentía hasta los 45 años de uso agrícola. Después, aunque la escorrentía aumentó con el tiempo de uso, la pérdida de suelo disminuyó, como consecuencia de la degradación de algunas propiedades de este generadas por la pérdida de material fino, el aumento de material grueso y la formación de duros terrones que hicieron que el suelo fuera menos susceptible al arrastre (Páez y Plá 1992). La diferencia entre humedad inicial y final (figura 4) mostró que el cambio a un uso más intensivo afectó la ganancia de agua. El cambio a pastura y a uso agrícola disminuyó en un 50% y un 73%, respectivamente, la ganancia de agua después de la simulación.

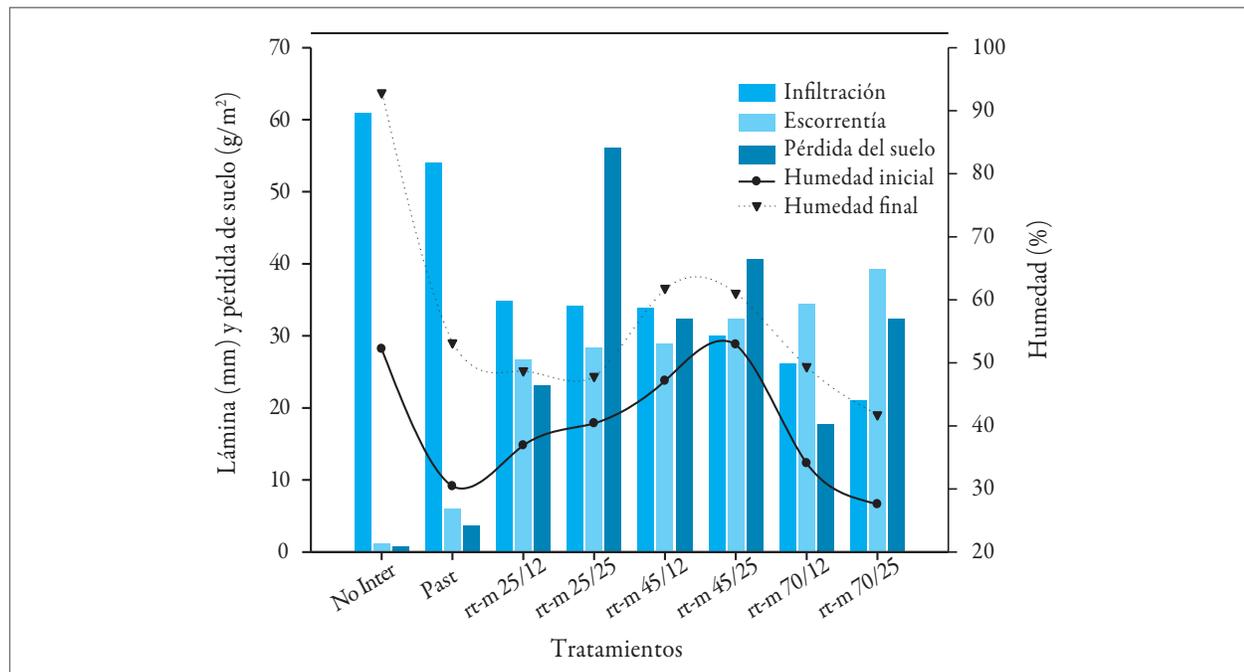


Figura 4. Pérdida de suelo total (g/m^2) y láminas de infiltración y escorrentía totales (mm) por tratamiento para lluvia simulada de 120 mm/h.

Fuente: Elaboración propia

Densidad aparente y densidad real

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre los tratamientos para densidad aparente y densidad real. La densidad aparente osciló entre 0,88 g/cm³ para el uso rt-m y 1,34 g/cm³ para el uso en pastura (ambos usos durante 45 años, con un 25 % de pendiente). Estos valores están directamente relacionados con los niveles de materia orgánica y con alta carga animal (tabla 2), y duplican la densidad aparente característica de los suelos de la región andina de Nariño, que varía entre 0,4 y 0,8 g/cm³ (Volverás 2005; Volverás et al. 2007).

Con excepción del uso rt-m durante 45 años con un 25 % de pendiente, la densidad aparente tendió

a aumentar con el tiempo de uso del suelo y con la profundidad, y estuvo por encima de 1,03 g/cm³. Estos valores son superiores a los reportados por Salamanca (2000) y Amézquita (1994) en trabajos sobre la zona andina colombiana y pueden ser el resultado de la labranza intensiva, que disminuyó la estabilidad estructural y generó la pérdida de partículas finas y de volumen del suelo, con consecuencias sobre el desarrollo radicular y sobre el suministro de agua y nutrientes (tablas 1 y 2; figura 6). El incremento de la densidad aparente por el uso continuo del suelo por lo general afecta más los poros de mayor tamaño. Esto reduce la capacidad de retención del agua en succiones bajas y puede aumentar la capacidad de retención en succiones altas (Pla 1994; Amézquita 2001; Montenegro 2005).

Tabla 3. Cambios en algunas propiedades del suelo según la profundidad, en la zona alta andina de Nariño, Colombia

Propiedad	Profundidad de 0-20 cm	Profundidad de 20-40 cm
Densidad real (g/cc)	2,44 a	2,29 b
Arenas (%)	46,23 b	48,90 a
Limos (%)	29,82 a	26,09 b
Arcilla (%)	23,95 a	25,15 a
Densidad aparente (g/cc)	1,04 b	1,10 a
Humedad volumétrica a 75 cm (%)	59,91 a	56,52 b
Porosidad total (%)	57,53 a	52,34 b
Macroporos (%)	16,36 a	13,21 b
Mesoporos (%)	11,24 a	9,78 b
Microporos (%)	29,92 a	29,35 a
pH	5,03 a	4,93 a
Carbono orgánico (%)	3,86 a	3,41 a
Materia orgánica (%)	6,63 a	5,88 a

Fuente: Elaboración propia

Los cambios de densidad aparente indican que el uso del suelo tiene un efecto acumulativo que hace que las partículas removidas y sueltas (figura 6) se reacomoden y ocupen el espacio que correspondía al agua y al aire (Gutiérrez 2000). Esto concuerda con lo reportado por Montenegro (2005) y Galvis (2005) en trabajos sobre labranza en sistemas productivos colombianos.

El suelo con pastura y el testigo presentaron la mayor y la menor densidad real respectivamente, con valores cercanos a los reportados por Su et al. (2007) y por Salamanca (2000) en agroecosistemas con diferentes tipos de labranza. La similitud de la densidad real entre los suelos con usos rt-m durante 25 años y los suelos con usos rt-m durante 70 años sugiere que antes de 25 años hay efectos del uso

sobre algunos indicadores cuando los suelos de ladera son sometidos a mecanización intensiva (tabla 2).

A diferencia de la densidad aparente, la densidad real disminuyó con la profundidad, información que contrasta con los resultados obtenidos por Orozco (1991) y por Montenegro (2005) en estudios sobre cambios de condiciones del suelo andino colombiano. En general, al comparar el testigo con los tratamientos de uso intensivo, se encontró afectación sobre la densidad real. La labranza continua y excesiva en pendiente genera pérdida de materia orgánica y de material fino en la superficie, lo que puede contribuir al aumento de la densidad real en las capas superiores del suelo en la zona triguera de Nariño (tabla 3 y figura 6).

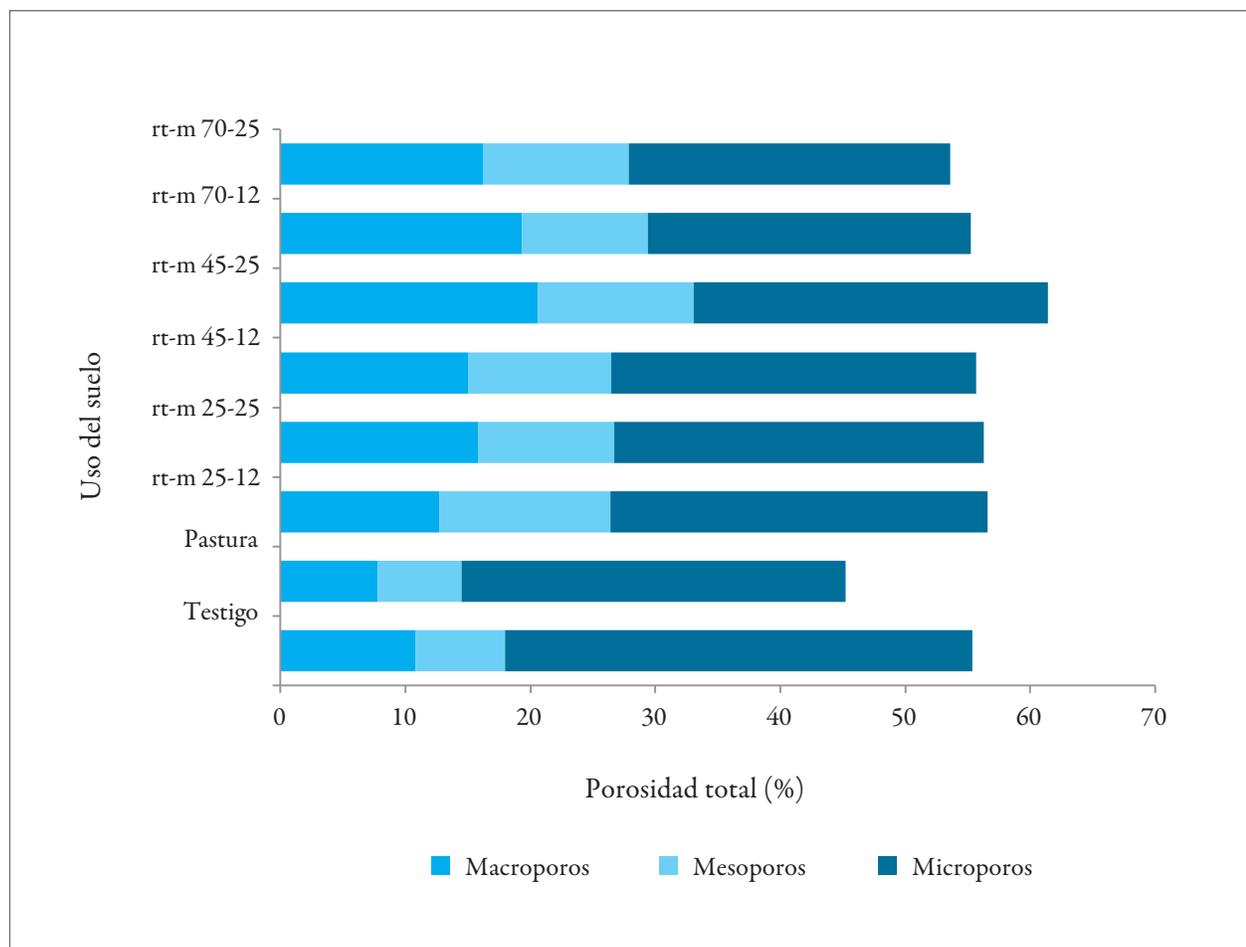


Figura 5. Cambios de porosidad total y distribución del tamaño de poros (%) según el tipo de uso del suelo, con una profundidad de 0 a 20 cm, en la zona andina de Nariño.

Fuente: Elaboración propia

Porosidad total y distribución del tamaño de poros

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre tratamientos para porosidad total, macroporos, mesoporos y microporos. La porosidad total fluctuó entre un 45,25 % para el suelo con pastura y un 61,44 % para suelo en uso agrícola de 45 años con un 25 % de pendiente (figura 5). La porosidad total del testigo y del suelo para uso agrícola estuvo por encima del 53 %, lo que puede ser favorable para el desarrollo de los cultivos (Castro y Gómez 2004). Estos resultados se explican por el manejo tradicional de la pastura con sobrepastoreo y por el efecto temporal de los implementos de labranza, que mejoran ciertas condiciones del suelo como la porosidad y la capacidad de retención de humedad. Lo anterior es similar a lo reportado por Preciado (1997), Pla (1994) y Sustaita-Rivera et al. (2000) en estudios sobre sistemas agrícolas tropicales.

La porosidad total disminuyó el 10 % en relación con la profundidad (tabla 3), lo cual puede estar relacionado con labranzas a una misma profundidad por muchos años. Este hecho concuerda, además, con lo reportado por Amézquita et al. (1998) en trabajos sobre los efectos de esta práctica en varios ecosistemas de Colombia. El movimiento y el comportamiento del agua y del aire en el suelo dependen de la distribución del tamaño de los poros (Amézquita 1994). Los daños en la estructura del suelo causan cambios en los procesos de absorción de nutrientes y de agua. La disminución del porcentaje de macroporos afecta negativamente las posibilidades de crecimiento de las raíces y, con ello, el fenómeno de interceptación de iones por parte de estas, lo cual afecta, a su vez, el ingreso de agua al suelo (Amézquita et al. 1998). Cuando se reducen los macroporos que drenan a succiones bajas, también se reduce la conductividad hídrica y se incrementa la succión de agua del suelo.

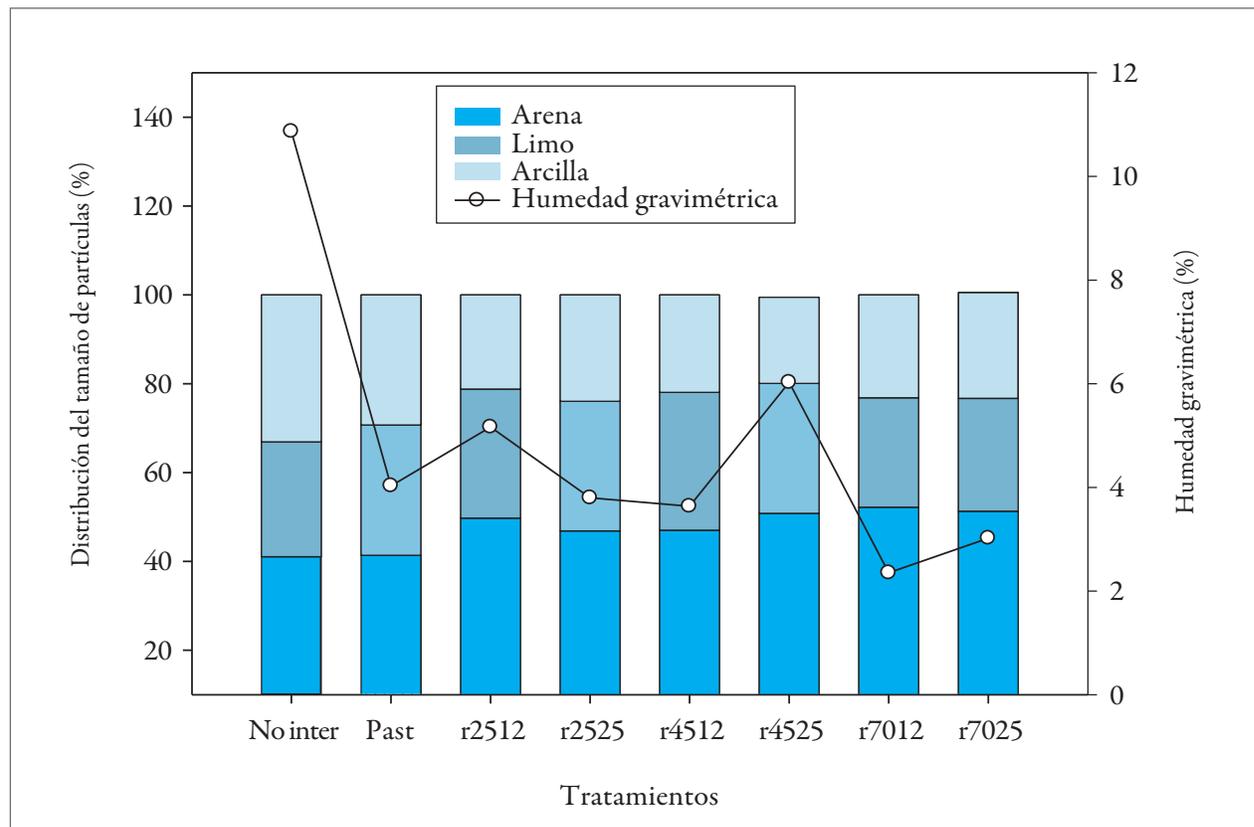


Figura 6. Cambios en la distribución del tamaño de partículas según el tipo de uso del suelo, con una profundidad de 0 a 20 cm, en la zona andina de Nariño.

Fuente: Elaboración propia

El nivel de macroporos fluctuó entre 7,76 % para la pastura y 20,61 % para rt-m (ambos con 45 años y un 25 % de pendiente). Para el uso agrícola rt-m, no hubo diferencias significativas, pero el uso agrícola aumentó los macroporos frente al testigo, comportamiento similar al reportado por Galvis (2005) y Montenegro (2005), pero contrastante respecto a los resultados de Torres (2000), Amézquita (2003) y Volverás (2005), en estudios dedicados a comparar diferentes niveles de uso del suelo (figura 5). Los mesoporos fluctuaron entre el 6,72 % para el suelo con pastura y el 13,68 % para el suelo en uso agrícola (ambos con 25 años de uso y un 12 % de pendiente). El porcentaje de mesoporos fue mayor para el uso agrícola, sin embargo, para un eficiente proceso de absorción de nutrientes y de disponibilidad de agua, deberían tener una mejor proporción. El aumento de macroporos y de mesoporos en el uso agrícola, en comparación con el testigo y la pastura, puede obedecer a condiciones favorables generadas por el sistema de raíces del cultivo de trigo y de maíz (cultivos establecidos por largos periodos de tiempo) y al efecto temporal de la labranza (Pla 1994).

La mayor proporción de microporos, la presentaron la pastura y el testigo. La figura 5 muestra que, para el suelo de uso agrícola, no hubo diferencias en los altos niveles de microporosidad y que el porcentaje de microporos, en algunos casos, alcanzó hasta el 60 % de la porosidad total. Estos resultados son similares a lo reportado por Ruiz (1999), pero contrastantes con lo reportado por Herrera (1989) en trabajos sobre el manejo de labranza en diferentes agroecosistemas andinos colombianos.

Respecto a la profundidad, se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de macroporos y mesoporos, y diferencias no significativas para el porcentaje de microporos. De 20 cm a 40 cm de profundidad, el porcentaje de macroporos y

mesoporos disminuyó un 20 % y un 13 % respectivamente, lo que se relaciona con el aumento de la densidad aparente y la disminución de la porosidad total (tabla 3 y figura 5).

Conclusiones

En la zona cerealera fría andina de Nariño, la labranza intensiva por largos periodos de tiempo generó cambios negativos importantes en los suelos, relacionados con pérdida de volumen, porosidad total y composición textural, lo cual puede conducir a problemas en el drenaje, en la transmisión de agua y en la disminución de la conductividad hídrica.

Los cambios y comportamientos de las características descritas permiten inferir que es necesario modificar y mejorar las prácticas de uso de la tierra que generan su degradación. Se requiere trabajar en la reducción del impacto del uso del suelo mediante el mejoramiento de la práctica de labranza y la generación de secuencias agrícolas que involucren especies en rotación que faciliten la acumulación de materia orgánica de mejor calidad y cantidad.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a Luis Fernando Gómez, Pedro Uribe y Susana Nivia por sus aportes en la redacción del documento.

Descargos de responsabilidad

Este artículo se realizó con el apoyo financiero de Corpoica y Fenalce. Los autores manifiestan que no existe ningún conflicto de interés que afecte los resultados presentados.

Referencias

- Albanesi A, Anriquez A, Polo-Sánchez A. 2003. Effects of the conventional agriculture in some C forms in a toposequence of the Chaco Region, Argentina. *Agriscientia*. 20:9-17.
- Álvarez A, Steinbach HS. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till Res*. 104(1):1-15.
- Amézquita E. 1994. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. En: Silva F, editor. *Fertilidad de suelos: diagnóstico y control*. Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 137-152.
- Amézquita E. 2001. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. En: *Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento*. Palmira, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 11-26.
- Amézquita E. 2003. La fertilidad física del suelo. En: *Manejo integral de la fertilidad del suelo*. Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. pp. 164-176.
- Amézquita E, Londoño H. 1997. La infiltración del agua en algunos suelos de los Llanos Orientales y sus implicaciones en uso y manejo. *Suelos Ecuatoriales*. 27:163-168.
- Amézquita E, Orozco O. 2000. Respuesta de algunos suelos volcánicos a las acciones de uso y manejo en Colombia. Ponencia presentada en: Simposio sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana; Chinchiná, Colombia.
- Amézquita E, Preciado G, Arias DM, Friesen D, Sanz JI, Thomas R. 1998. Soil physical characteristics under different land use systems and duration on the Colombian savannas. Afiche presentado en: Word Congress of Soil Science Word "Congress of Soil"; Montpellier, France.
- Benavides H, Ruiz H, Legarda L. 2000. Evaluación de algunos componentes de la fertilidad del suelo y su influencia en la dinámica nutritiva en suelos del clima medio y frío en el departamento de Nariño, Colombia. *Rev Cienc Agrícolas*. 17(1):311-327.
- Campo JM. 2004. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión hídrica, del contenido de materia orgánica y de las propiedades físicas, en un *oxic dystropept* bajo seis historias de uso en Pescador, Cauca, mediante el uso de un minisimulador de lluvia [trabajo de grado]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Castro H, Gómez M. 2004. El diagnóstico integral de la fertilidad del suelo a partir de indicadores analíticos. En: Primer Taller Nacional sobre Indicadores de Calidad del Suelo; Palmira, Colombia.
- Cobo L. 1998. Diseño construcción y evaluación de un simulador portátil de lluvia para estudios de susceptibilidad a la erosión en laderas [trabajo de grado]. [Cali]: Universidad del Valle.
- [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. 2002. Levantamiento de suelos y fisiografía. Pasto, Colombia: Corpoica.
- [Corpoica] Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria. 2008. Indicadores económicos para la producción de trigo. Informe final Proyecto Guaitara II. Pasto, Colombia: Corpoica.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 1979. A provisional methodology for soil degradation assessment. Roma, Italia: FAO.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 1990. Conservación de suelos para los pequeños agricultores en las zonas tropicales húmedas. *Boletín de Suelos*. 60. Roma, Italia: FAO.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 1993. Guidelines for land-use planning. Development Series. 1. Roma, Italia: FAO.
- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2009. Perspectivas alimentarias; [consultado 2015 nov]. <http://www.fao.org/giews/spanish/fo/index.htm#2009>.
- [Fenalce] Federación Nacional de Cultivadores de Cereales. 2006. Mejoramiento de la calidad y productividad de los trigos colombianos mediante prácticas agronómicas adecuadas. Informe técnico. Bogotá, Colombia: Fenalce.
- Galvis J. 2005. Evaluación del efecto de la intensidad de labranza en la formación del sellamiento superficial de un oxisol de sabana en los llanos orientales de Colombia [tesis de maestría]. [Palmira]: Universidad Nacional de Colombia.
- García B. 1990. Cambios de algunas características químicas de los suelos de la zona andina de Nariño a través del periodo 1964-1988. En: ICA. Informe anual de actividades. Pasto, Colombia: ICA.
- García B, Pantoja C. 1998. Fertilización del cultivo de trigo en el departamento de Nariño. En: Guerrero R, editor. *Fertilización de cultivos de clima frío*. Bogotá, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos. p. 157-178.
- Gómez A, García B. 1997. Manejo de suelos de ladera. *Boletín Técnico*. Bogotá, Colombia: Corpoica.
- Gosai K, Arunachalam A, Dutta BK. 2009 Influence of conservation tillage on soil physicochemical properties in a tropical rainfed agricultural system of northeast India. *Soil Till Res*. 105(1):63-71.
- Guerrero R. 1995. Fertilización de cultivos de clima medio. Barranquilla, Colombia: Monómeros Colombo Venezolanos. *Fertilidad de los suelos de clima medio en Colombia*; pp. 15-20.
- Gutiérrez N. 2000. Efecto del manejo del suelo sobre la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración. UNNE; [consultado 2015 nov]. www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2000/5_agrarias/a_pdf/a_020.pdf.
- Hakansson I, Lipiec J. 2000. Review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till Res*. 53(2):71-85.
- Herrera P. 1989. Efecto de la labranza sobre algunas propiedades físicas del suelo [tesis]. [Bogotá, Colombia]: Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- [IGAC] Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1998. Suelos y bosques de Colombia. 1.ª ed. Bogotá, Colombia: IGAC.
- Jin H, Qingjie W, Hongwena L, Lijinb L, Huanwena G. 2009. Effect of alternative tillage and residue cover on yield and water use efficiency in annual double cropping system in North China Plain. *Soil Till Res*. 104(1):198-205.
- Lal R. 1997. Soil quality and sustainability. In: Lal R, Blum WE, Valentine C, Stewart BA, editores. *Methods for assessment of soil degradation*. Advances in soil science. New York, EE. UU: CRC Press.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*. 123(1-2):1-22.

- Malagón D. 1998. El recurso suelo en Colombia: inventario y problemática. *Revista Acad Colomb Ci Exact.* 22(82):13-52.
- Méndez H, Tamayo A, Gómez, A, Barrera L, Muñoz R, García B. 1999. Manejo de suelos en minifundio de ladera de la región Andina mediante cultivos permanentes y transitorios en rotación establecidos en franjas a nivel. Bucaramanga, Colombia: Corpoica.
- Montenegro M. 2005. Tiempo del uso del suelo bajo monocultivo de caña panelera y su efecto sobre algunas propiedades físicas y químicas en siete veredas del municipio de Sandoná, departamento de Nariño [tesis de maestría]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Orozco O. 1991. Caracterización física y dinámica del agua bajo tres sistemas de labranza en un Andisol de la antigua serie Tibaitatá [tesis de maestría]. [Bogotá, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Ozpinar S. 2006. Effect of tillage on productivity of a winter wheat-vech rotation under dryland Mediterranean conditions. *Soil Till Res.* 89(2):258-265.
- Páez ML, Plá I. 1992. Evaluación de la eficiencia de índices de erodabilidad en suelos agrícolas en Venezuela. *Agronomía Trop.* 42(1-2): 27-40.
- Pingali P, Alinovi L, Sutton J. 2005. Food security in complex emergencies: enhancing food system resilience. *Disasters.* 29(1 Supl.):5-24.
- Pla I. 1994. Labranza, propiedades físicas y producción de maíz en los llanos occidentales. Ponencia presentada en: Taller sobre Prácticas de Labranza en los Sistemas de Producción con Maíz en los Llanos Occidentales; Araure, Venezuela.
- Preciado L. 1997. Influencia del tiempo de uso del suelo en las propiedades físicas en la productividad y sostenibilidad del cultivo de arroz en Casanare [tesis de maestría]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Rackowski CW, Reyes MR, Reddy GB, Busscher WJ, Bauer PJ. 2009. Comparison of conventional and no-tillage corn and soybean production on runoff and erosion in the southeastern US Piedmont. *J Soil Water Conserv.* 64(1):53-60.
- Rondón MA, Amézquita CE, Chávez LF, Hurtado MP, Álvarez A, Estrada RD, Hesushius M, Garzón G, Quintero C. 2006. Soil properties, carbon stocks and fluxes of greenhouse gases in Andean watersheds. Soil properties, carbon stocks and fluxes of greenhouse gases (GHG) in the Fúquene watershed (Colombia). Cali, Colombia: CIAT.
- Ruiz H. 1999. Efecto de cuatro sistemas de labranza en el mejoramiento de algunas propiedades físicas en un vertisol cultivado intensivamente en el valle geográfico del Cauca [tesis de maestría]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Salamanca C. 2000. Influencia de las características físicas del suelo y su interacción con las condiciones climáticas en el comportamiento y calidad del Desmodium en tres regiones de Colombia [trabajo de grado]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Su Z, Zhang J, Wu W, Cai D, Lv J, Jiang G, Huang J, Gao J, Hartmann R, Gabriels D, 2007. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. *Agr Water Manage.* 87(3):307-314.
- Sustaita-Rivera F, Ordaz-Chaparro V, Ortiz-Solorio C, León-González F. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia.* 34:379-386.
- Torres E. 2000. Evaluación de la susceptibilidad a la erosión y de las características asociadas (infiltración y escorrentía) de dos suelos de ladera en el departamento del Cauca mediante la ayuda de un simulador de lluvia [trabajo de grado]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Vieira-Cavaliere KM, Da Silva AP, Tormena CA, Leão TP, Dexter AR, Håkansson I. 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná Brazil. *Soil Till Res.* 103(1):158-164.
- Volverás B. 2004. Caracterización física y química de los suelos en las fincas del proyecto Guaitara, zona triguera de Nariño. Documento presentado en: Seminario "Entrega de Resultados Proyecto Guaitara I"; Pasto, Colombia.
- Volverás B. 2005. Caracterización física y química de suelos bajo ganadería intensiva en el altiplano de Túquerres. Documento presentado en: Seminario "Entrega de Avances de Resultados Proyecto Aliso"; Pasto, Colombia.
- Volverás B. 2006. Evaluación del efecto de tres sistemas de uso y manejo del suelo sobre algunas propiedades físicas en la vereda San José de Quisnamuez en la zona de reconversión del cultivo de trigo (*Triticum vulgare*) del departamento de Nariño [tesis de maestría]. [Palmira, Colombia]: Universidad Nacional de Colombia.
- Volverás B, Amézquita E, Táfur H. 2007. Efecto del tiempo de uso en las condiciones físicas del suelo andino en el departamento de Nariño, Colombia. *Acta Agron.* 56(1):29-37.
- Williams JD, Gollany HT, Siemens MC, Wuest SB, Long DS. 2009. Comparison of runoff, soil erosion, and winter wheat yields from no-till and inversion tillage production systems in northeastern Oregon. *J Soil Water Conserv.* 64(1):43-52.