



Propiedades físicas del suelo en el sistema de siembra en wachado en Nariño, Colombia¹

Physical soil fertility in the sowing system in *wachado* on Nariño, Colombia

Belisario Volverás-Mambuscay², José Domingo Merchancano-Rosero², José Manuel Campo-Quesada²,
Juan Fernando López-Rendón²

- ¹ Recepción: 9 de octubre, 2019. Aceptación: 30 de marzo, 2020. El trabajo formó parte del proyecto “Ajuste de prácticas culturales para manejo adecuado del sistema de siembra en guachado en la zona alto andina de Nariño” ejecutado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), y financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia.
- ² Corporación Colombiana de investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), Centro de Investigación Obonuco, Pasto Colombia. Colombia. bvolveras@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-6571-670X>), jdmrchancano@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-5798-9663>), jcampoq@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0001-9927-6629>), jflopezr@agrosavia.co (<https://orcid.org/0000-0002-7035-1880>).

Resumen

Introducción. En el sistema wachado se rota continuamente el uso del suelo con papa (uno a dos cosechas) y pastos para ganado de leche (dos a tres años); es un sistema precolombino, que solo utiliza una herramienta manual, practicado y conservado por comunidades indígenas en laderas andinas de Colombia, Perú y Ecuador. El sistema está relegado por los sistemas de mecanización intensiva en los cuales predomina la investigación, a diferencia del wachado donde esta es escasa. **Objetivo.** Evaluar el efecto de la siembra en wachado sobre el estado de algunas propiedades físicas del suelo. **Materiales y métodos.** El trabajo se desarrolló en tres localidades del departamento de Nariño, Colombia, entre enero a marzo de 2015. En cada localidad, se tomaron muestras de suelo a diferentes profundidades y se realizaron simulaciones de lluvia por triplicado para determinar indicadores volumétricos, de regulación hídrica, de estabilidad estructural y textura en lotes que estaban en pastos durante tres años. **Resultados.** Después de treinta años de uso, el suelo en wachado conservó baja densidad aparente (0,41 a 0,91 g cc⁻¹), alta porosidad total (56 % a 70 %), altos contenidos de humedad a bajas y altas succiones (75 % y 40 %). Además, se encontró una estabilidad estructural moderada (DMP mayor a 1,5), microporosidad del 60 %, baja infiltración (19 % a 33 %) y alta escorrentía (66 % a 81 %). **Conclusión.** Después de treinta años del suelo cultivado con papa bajo el sistema de wachado, los valores de los indicadores físicos de los suelos demostraron que el mínimo laboreo y la rotación papa/pastos, redujeron la degradación del suelo y regularon la condición hídrica.

Palabras claves: estabilidad estructural, erosión, infiltración, escorrentía, papa.

Abstract

Introduction. In the *wachado* system, the soil used is continuously rotated with potatoes (one or two harvests) and pasture for dairy cattle (two to three years). *Wachado* is a pre-Columbian production system that only uses a manual tool, and is practiced and conserved by indigenous communities on Andean slopes of Colombia, Peru, and Ecuador. The system is relegated by the intensive mechanization systems in which research predominates, unlike the



wachado research where it is scarce. **Objective.** To evaluate the effect of sowing in wachado on the state of some physical properties of the soil. **Materials and methods.** The work was carried out in three locations in the department of Nariño, Colombia, between January and March 2015. In each locality, soil samples were taken at different depths, and rain simulations were performed in triplicate to determine volumetric, water regulation, structural stability, and texture indicators in plots that were on pasture for three years. **Results.** After thirty years of use, the wachado soil retained a low apparent density (0.41 to 0.91 g cc⁻¹), high total porosity (56 % to 70 %), high moisture content at low, and high suctions (75 % and 40 %). In addition, moderate structural stability (DPM greater than 1.5), 60 % microporosity, low infiltration (19 % to 33 %), and high runoff (66 % to 81 %) were found. **Conclusion.** After thirty years of potato cultivation under the wachado system, the values of the physical indicators of the soils showed that the minimum tillage and the potato/grass rotation, reduced soil degradation and regulated the hydric condition.

Keywords: structural stability, erosion, infiltration, runoff, potato.

Introducción

En el escenario de los Andes, se destaca la agricultura sostenible aprendida de la civilización Inca del Perú, quienes generaron y aún practican tecnologías e importantes obras de conservación de los suelos. El sistema de siembra con surcado en wachado es de origen incaico y conservado como resultado del legado cultural indígena (Pumisacho y Sherwood, 2002; Toapanta, 2004), lo practican en la zona productora de papa de Nariño, donde se produce cerca del 40 % del tubérculo y 35 % de la leche del departamento, ya que la economía del surcado en wachado forma parte de sistemas mixtos de producción, donde los componentes principales son la papa y el ganado de leche (Ordoñez, 2007; Quispe, 2010; Kashyapa, 2013).

La alianza mundial para la conservación y la gestión de los Sistemas Ingeniosos del Patrimonio Agrícola Mundial (SIPAM) incluye el surcado en wachado entre las prácticas o saberes ancestrales de cultivo en Perú, Colombia y Ecuador, que a diferencia de la labranza mecanizada, para la siembra de papa con surcado en wachado solo se utilizan herramientas manuales y el cespedón de la pastura, para formar los surcos en la siembra de papa y otros cultivos, generando menor impacto negativo sobre los recursos suelo y agua (Koohafkan y Altieri, 2011; Campo et al., 2014).

En el año 2018, en el departamento de Nariño se cultivaron cerca de 25 278 ha de papa y se constituyó en la actividad agrícola más sobresaliente en la zona fría de los andes colombianos, con un consumo per cápita de 75 kg año⁻¹ (FEDEPAPA, 2019). En esta región del sur occidente de Colombia, para la producción de papa se practican tres tipos de labranza: a) convencional intensiva con tractor e implementos pesados, b) con implementos de tracción animal o manual intensivas y c) con surcado en wachado donde se utiliza una herramienta manual llamada pala de cute, elaborada artesanalmente en herrería, pesa aproximadamente 1 kg con un mango de madera de 1,20 m de largo y 7 cm de grosor. Estos tipos de labranza se practican en zonas ubicadas entre los 2700 a 3100 m de altitud, en suelos andisoles de baja densidad aparente, con fuertes y largas pendientes, condiciones frágiles que los hacen susceptibles a la erosión (Ordoñez, 2007). Bajo estas condiciones, la labranza mecanizada intensiva ha generado efectos negativos sobre la estabilidad estructural del suelo, rompe los terrones y agregados, expone la materia orgánica en la superficie y disminuye la población de microorganismos y macroinvertebrados del suelo; además, afecta negativamente el volumen, la capacidad para retener y ceder agua a las plantas y la respuesta de los cultivos a la fertilización (Lal, 1993; Amézquita et al., 2000).

Algunos estudios con labranza mecanizada intensiva en la zona alta andina de Nariño, reportaron pérdidas de suelo entre 80 a 100 t ha⁻¹ año⁻¹ según la pendiente, con desestabilización física al reducirse el volumen del suelo en 28 %, la infiltración en 71 % y la capacidad de aceptación de lluvias con escorrentía del 95 %, ligeros cambios en la

clase textural, disminución de contenidos Ca, Mg y de materia orgánica un 59 % (Volverás et al., 2007; Volverás y Amézquita, 2009; Volverás et al., 2016). Estas prácticas de labranza han propiciado el rezago en los conocimientos de las fortalezas y debilidades de las tecnologías que los agricultores han desarrollado, conceptualizado y mantenido en una amplia variedad de sistemas tradicionales de uso y manejo de suelos, que son eficaces para la conservación, especialmente en suelos de laderas.

En lo literal *wachu* (quechua) es un término agrícola que significa surco o camellón, ensurcado, camellonado o sementera cultivada en surcos con distancias entre 1,0 y 1,2 m (Laime, 2007; Rozas, 2007); es un sistema de uso del suelo en laderas que rota papa u otro tubérculo andino, con pastos para el ganado de leche; se realizan uno o dos ciclos de papa, se pasa a pastura por tres a cinco años y se vuelve a papa, donde su fortaleza radica en el mínimo laboreo del suelo en siembra y en que se conserva el cespedón de la pastura para la siembra de la papa. Después de la cosecha de los tubérculos, ingresan los bovinos que consumen los residuos de cosecha y las malezas, luego para pasar a pastos, con la pala de cute, aflojan el suelo y, en el caso de Nariño, esparcen mezclas de semillas de leguminosas forrajeras y gramíneas (Denevan, 1995; Ordoñez, 2007; Kashyapa, 2013).

En Nariño, el uso del suelo con wachado disminuyó la compactación en capas superficiales para la segunda siembra, pero a 20 cm de profundidad se incrementó la compactación, humedad y densidad aparente (Bastidas, 2003). En Ecuador, Pumisacho y Sherwood (2002) encontraron que, aunque los surcos se construyen en sentido de la pendiente, las raíces de la pastura que crecen en los costados del camellón reducen la erosión del suelo por escorrentía.

Estudios diagnósticos evaluativos sobre las propiedades del suelo bajo sistema de wachado en Nariño, durante veinticinco años, reportaron para densidad aparente valores entre 0,65 a 0,47 g cc⁻¹; porosidad total de 72 %, macro porosidad de 32 %, mesoporos de 10,45 % y microporos de 46,73 %. Asimismo, encontraron que el 78,6 % de los agregados estables correspondieron a 2,0 mm, y la retención de humedad fluctuó entre 71,19 % a 0 bares (capacidad de campo) y 42,47 % a 15 bares (punto de marchitez permanente). Después de veinticinco años de uso con papa y pastura, los valores de estos indicadores representaron mejores condiciones para procesos como captación y retención de humedad para el desarrollo de raíces y aireación, atribuibles al manejo en wachado (Ordoñez, 2007).

El suelo es un sistema complejo que consta de minerales, y materia orgánica, por acción del clima se determina sus propiedades físicas, químicas y biológicas, que permiten el crecimiento de las plantas (Gárate y Bonilla, 2008). Para diagnosticar su fertilidad, generalmente, se ha considerado solo algunos indicadores químicos, pero la abundancia y riqueza de organismos del suelo y propiedades físicas como la resistencia a la penetración, aireación, retención de humedad y volumen del suelo, son necesarias para el crecimiento de raíces y entrega de agua y nutrientes, condiciones que pueden afectarse negativamente por la labranza (Amézquita, 2001).

Como el comportamiento de las propiedades químicas, biológicas y físicas del suelo dependen de varios factores, entre los que se destaca el manejo, es pertinente mencionar que los Andisoles son suelos que se han formado de cenizas u otras eyecciones volcánicas y están dominados por vidrio y materiales coloidales poco cristalinos como alófana, la imogolita y la ferrihidrita. Tienen altos contenidos de materia orgánica, alrededor de un 20 %, fracción coloidal dominada por minerales de rango corto o por complejos de aluminio-humus (USDA, 2014). La conductividad hidráulica es afectada por la textura y la estructura del suelo y es mayor en suelos altamente porosos fracturados o agregados que en suelos compactados y densos (Chirinos y Mattiazzo, 2004).

Desde el punto de vista agrícola y de la física de suelos, la labranza debe realizarse para corregir cualquier factor físico limitante para el desarrollo normal de las raíces de los cultivos. Sin embargo, la fragilidad de la estructura de los suelos en el trópico alto Colombiano y su susceptibilidad a sellamiento, compactación, adensamiento y erosión, cuando se someten a sistemas de labranza intensivos, los hace muy susceptibles a degradación (Amézquita, 1999); de ahí la importancia del conocimiento de las propiedades y procesos físicos del suelo, para facilitar la interpretación de muchos de los procesos fisicoquímicos y biológicos que suceden en la relación suelo/planta y que influyen en la productividad y sostenibilidad de la agricultura.

Procesos como la infiltración, almacenamiento de agua aprovechable, profundidad de enraizamiento y propiedades físicas como estabilidad de agregados, porosidad y aireación, son básicos para el suministro y absorción de nutrimentos y agua por los cultivos, y para monitorear y determinar la calidad física del suelo. Para la absorción eficaz de agua, se requiere que el suelo permita la entrada del agua, que la retenga y la entregue a las plantas, para lo cual es necesario la penetración y crecimiento constante de las raíces (Orozco, 1991; Sánchez y Aguirreolea, 2008; Amézquita, 2013).

Para la absorción de nutrimentos, se requiere que estos estén en contacto con las raíces y se realiza básicamente por tres procesos: a) interceptación que ocurre en los macroporos, donde además se infiltra y mueve el agua de lluvia y de riego, y circula el aire que lleva oxígeno a las raíces para su crecimiento; b) flujo de masa en los mesoporos, donde se almacena el agua aprovechable o la solución nutritiva del suelo; y c) difusión en los microporos donde se encuentran en forma reducida elementos como Fe y Mn, forma en que son absorbidos por las raíces (Orozco, 1991; Amézquita, 2013).

La evaluación e interpretación de las propiedades del suelo es indispensable para tomar medidas preventivas, restaurativas y de mejoramiento, para evitar su degradación. El impacto del uso del suelo debe evaluarse mediante valores críticos de las características físicas, químicas y biológicas que definen su calidad (García et al., 2012). Con base en la importancia social y agroecológica del wachado en las laderas andinas de Nariño, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la siembra en wachado sobre el estado de algunas propiedades físicas del suelo, como contribución al escaso acervo científico y de información técnica sobre el wachado, como forma ancestral.

Materiales y métodos

Localización

El trabajo se realizó en la región andina de Nariño, Colombia, subregión nudo de los Pastos, eco región sabana y montaña, en la zona de vida bosque húmedo Montano (Holdridge, 1987), entre enero y marzo de 2015; en tres municipios (Pupiales, Potosí y Pasto), y en tres veredas donde ancestralmente se practica el wachado o *wachu* rozado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Se seleccionaron tres fincas con treinta años de uso del sistema wachado cuya ubicación se detalla en el Cuadro 1. Son suelos muy ácidos (pH 4,5 a 5,0) con contenidos de materia orgánica entre 8,50 % a 20,83 % y de media a alta fertilidad.

Cuadro 1. Ubicación de los experimentos para evaluar propiedades físicas del suelo en el sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril) en las localidades de Nariño, Colombia. 2015.

Table 1. Location of the experiments to evaluate physical properties of the soil in the wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex) in the localities of Nariño, Colombia. 2015.

| Municipio | Localidad | Altitud (msnm) | Coordenadas | Materia orgánica (%) | Tipo de suelo ¹ |
|-----------|-------------|----------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|
| Pasto | Rio Bobo | 3069 | N 01° 06' 36,7" W 77° 17' 57,4" | 22,3 | Typic Fulvudands |
| Potosí | Villa Nueva | 3000 | N 00° 48' 38,8" W 77° 30' 54,01" | 20,96 | Typic Hapludands |
| Pupiales | Imbula | 3131 | N 00° 57' 20,4" W 77° 37' 10,7" | 14 | Pachic Melanudands |

¹ Recuperado de IGAC (2004) / Retrieved from ICAG (2004).

Pormenores metodológicos e indicadores evaluados

El trabajo se desarrolló en Nariño solo en la zona donde se practica el wachado y no se practica otro tipo de labranza; como el diagnóstico y el conocimiento de propiedades claves que definen la calidad del suelo son condiciones necesarias para mantener la productividad, se evaluaron algunas propiedades físicas que se consideran indicadoras y susceptibles a cambio por acciones antrópicas y que están estrechamente relacionados con los aspectos edafológicos de crecimiento de las plantas (Amézquita, 2013); con base en lo anterior, en la parte alta, media y baja de cada finca, que estaba en pastura desde tres años atrás (Figura 1A), se realizaron simulaciones de lluvia a 110 mm h^{-1} con base en la metodología de Cobo (1998) y Campo (2004), y se tomaron muestras por triplicado a diferentes profundidades (0-10, 10-20 y 20-30 cm).



Figura 1. Rotación papa/pastos en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenaria (quechua), base de un complejo agrosilvo pastoril) (A). Pala de cute (herramienta manual elaborada artesanalmente en herrería, pesa aproximadamente 1 kg con un mango de madera, de 1.20 m de largo y 7 cm de grosor) (B). Surco para la siembra de papa (C). cespedón del pasto sobre el cual se siembra la papa (D). Nariño, Colombia. 2015.

Figure 1. Potato/grazing land rotation in wachado (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimal tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex) (A). Pala de cute (hand tool handcrafted in a smithy, weighs about 1 kg with a wooden handle, 1.20 m long and 7 cm thick) (B). Furrow for potato sowing (C). Grass lawn on which the potato is sown (D). Nariño, Colombia. 2015.

Dependiendo de la susceptibilidad de la propiedad del suelo al impacto de la labranza se evaluaron las siguientes variables.

Densidad aparente: se obtuvo por el método del núcleo o cilindro (Forsythe, 1980), para lo cual se tomaron muestras sin disturbar en anillos de 5 cm de alto por 5 cm de diámetro en las capas de suelo de 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad.

Densidad real: se utilizó el método del picnómetro para su obtención, las muestras se tomaron en la capa de suelo de 0-30 cm de profundidad.

Porosidad total (%): se determinó por la fórmula 1, a 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad (Forsythe, 1980).

$$\eta = \left(1 - \frac{d_a}{d_r}\right) \times 100 \quad \text{Fórmula 1}$$

Donde:

η = porosidad total (%).

D_a = densidad aparente g cc⁻¹.

D_r = densidad real g cc⁻¹.

Distribución de tamaño de poros: se adquirió a través del método de la mesa de tensión y ollas de presión, a 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad (Jaramillo, 2002).

Textura: la distribución de tamaño de partículas se determinó por el método de Bouyoucos, para lo cual se tomaron muestras disturbadas en la capa de 0-30 cm de profundidad (Forsythe, 1980).

Estabilidad de agregados: se realizó por el método de Yoder (tamizado en húmedo), en muestras disturbadas en la capa de 0-30 cm de profundidad (Yoder, 1936).

Conductividad hidráulica saturada: se obtuvo al adquirir muestras de suelo a las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, en anillos de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro, mediante la metodología de Forsythe (1980).

Curvas de retención de humedad: para su obtención, se tomaron muestras disturbadas a 0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad, 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 y 15 bares en las ollas y platos de presión.

Escorrentía, infiltración y susceptibilidad del suelo a la erosión: estas pruebas se realizaron en campo con el mini simulador de lluvias (Cobo, 1998), calibrado a una intensidad de 110 mm h⁻¹, aplicando la metodología de Campo (2004). Para la susceptibilidad del suelo a la erosión por el impacto de la gota de lluvia y posterior arrastre, se midió la cantidad de sólidos en suspensión en el agua de escorrentía. Como la combinación de la labranza mecanizada intensiva (uso del tractor, dos pases de ardo de disco, dos pases de rastrillo y uno de cincel) y la lluvia son factores de los más erosivos en laderas, se realizaron simulaciones de lluvia en algunas áreas fuera de la zona wachado.

Como el propósito del trabajo fue medir las propiedades físicas y cada una representó el efecto acumulativo de los años de uso, se realizó análisis de la información con medidas de tendencia central y dispersión y se elaboraron las gráficas respectivas por localidad.

Resultados

Densidad del suelo

En Pasto, la densidad aparente en las tres profundidades estuvo entre 0,41 y 0,61 g cc⁻¹; en Pupiales y Potosí, la densidad aparente no cambió con la profundidad y estuvo entre 0,81 y 0,91 g cc⁻¹ (Figura 2). La densidad real en la capa de 0-10 cm en las tres localidades estuvo entre 1,8 y 2,1 g cc⁻¹ (Figura 3).

Porosidad total y tamaño de poros

En Pasto, la porosidad total disminuyó con la profundidad y varió entre 64 % y 76 %, con predominio de los microporos que alcanzaron hasta el 48 %, es decir cerca del 70 % de la porosidad total. En Pupiales, la porosidad total no cambió con la profundidad y fue del 58 % con predominio de los microporos que alcanzaron 44 % en los primeros 10 cm, es decir 75 % de la porosidad total (Figura 4).

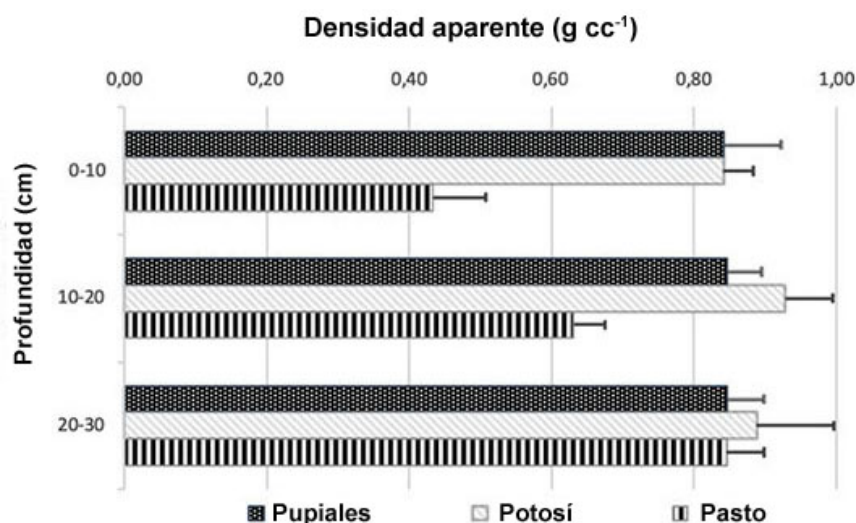


Figura 2. Comportamiento de la densidad aparente (g cc^{-1}) a diferentes profundidades en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto), con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 2. Behavior of the apparent density (g cc^{-1}) at different soil depths in three locations (Pupiales, Potosí, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex), department of Nariño, Colombia. 2015.

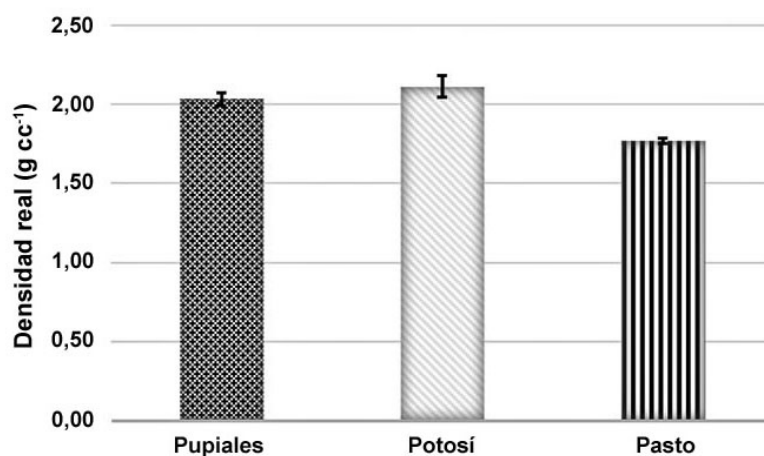


Figura 3. Comportamiento de la densidad real (g cc^{-1}) en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto) con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 3. Behavior of the real density (g cc^{-1}) in soils of three localities (Pupiales, Potosí, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex). Department of Nariño, Colombia. 2015.

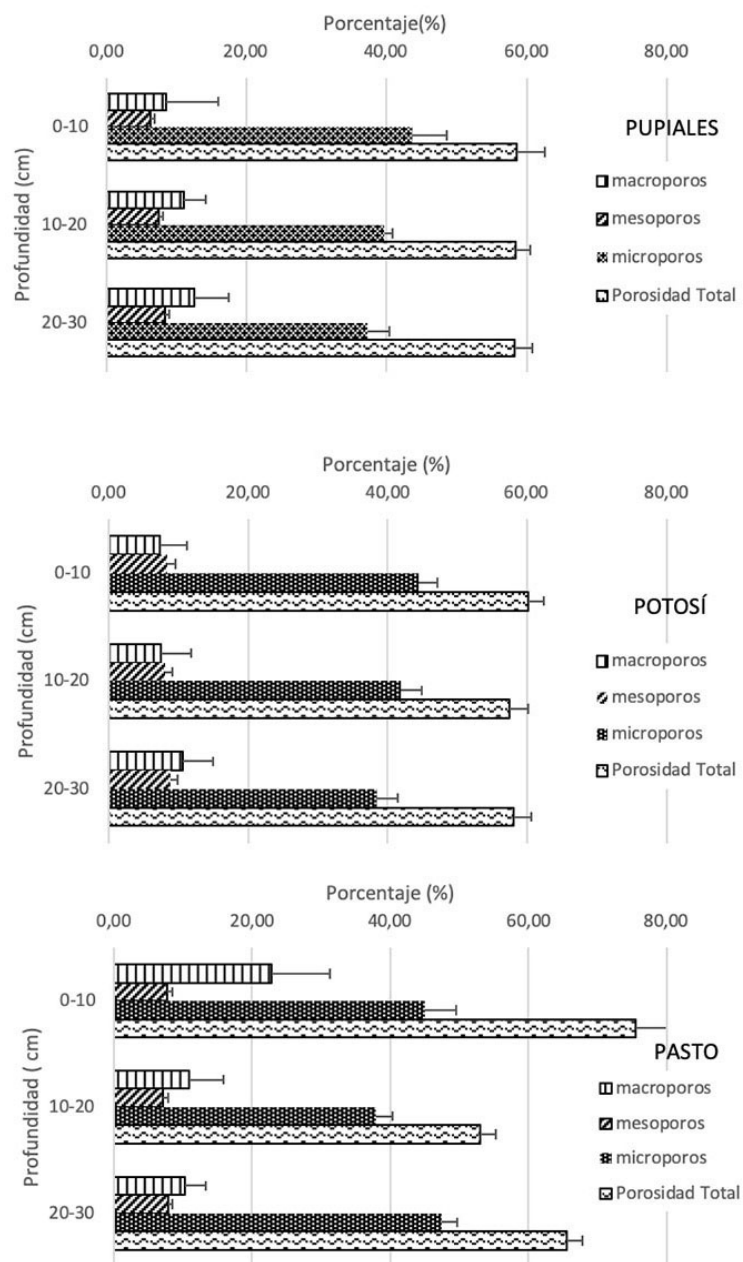


Figura 4. Distribución del tamaño de poros (%) a diferentes profundidades en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto) con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 4. Pore size distribution (%) at different soil depths of three locations (Pupiales, Potosi, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex). Department of Nariño, Colombia. 2015.

En Potosí no hubo cambio significativo de la porosidad total con la profundidad y estuvo entre 56 % y 60 %, donde también predominaron los microporos que alcanzaron 75 % de la porosidad total. En la distribución del tamaño de poros por profundidad para las tres localidades, de manera general, se encontró que, de la porosidad total, en promedio, los microporos representaron cerca del 69 %, los macroporos 19 % y mesoporos 12 %.

Distribución del tamaño de partículas

La distribución por tamaño de partículas (Figura 5) en la capa de 0-10cm de profundidad mostró dominio de la fracción arena en las tres localidades con 56 %, 53 % y 54 % para Pupiales, Potosí y Pasto respectivamente; la fracción arcilla fue similar en las localidades de Potosí y Pupiales (9 %) y en Pasto fue del 6 %, de tal manera que la clase textural para las tres localidades fue franco arenoso.

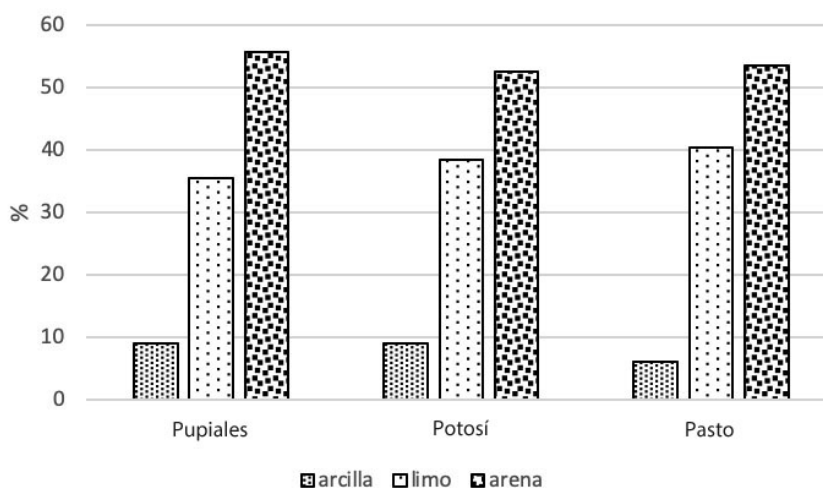


Figura 5. Distribución del tamaño de partículas (%) en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto), con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 5. Particle size distribution (%) in soils of three localities (Pupiales, Potosí, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex), department of Nariño, Colombia. 2015.

Estabilidad de agregados

La distribución de agregados estables al agua (Figura 6), para las tres localidades, mostró que en la localidad de Pasto se presentó el porcentaje más elevado de agregados estables, mayores a 1 mm con 63 %, y en las localidades Potosí y Pupiales el porcentaje fue 52 % y 47 %, respectivamente.

El índice diámetro medio ponderado (DMP) para las tres localidades (Figura 7), mostró que el suelo de la localidad de Pasto presentó una estabilidad moderada y las otras dos una estabilidad ligeramente estable, lo cual está relacionado con el alto porcentaje de agregados menores a 2 mm, que proporcionan menor estabilidad al suelo.

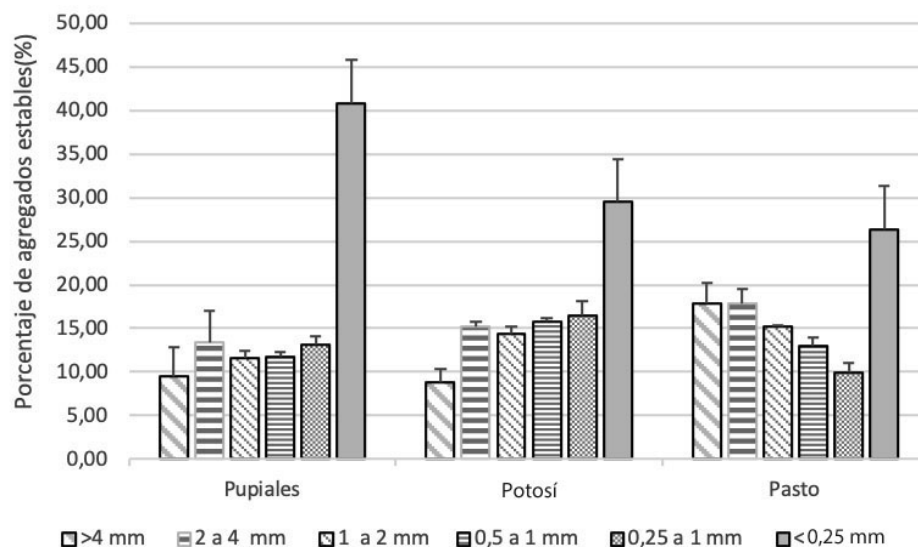


Figura 6. Distribución por tamaño de agregados (mm) estables al agua en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto), con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 6. Distribution of water-stable aggregates (mm) by size in soils of three localities (Pupiales, Potosi, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex), Department of Nariño, Colombia. 2015.

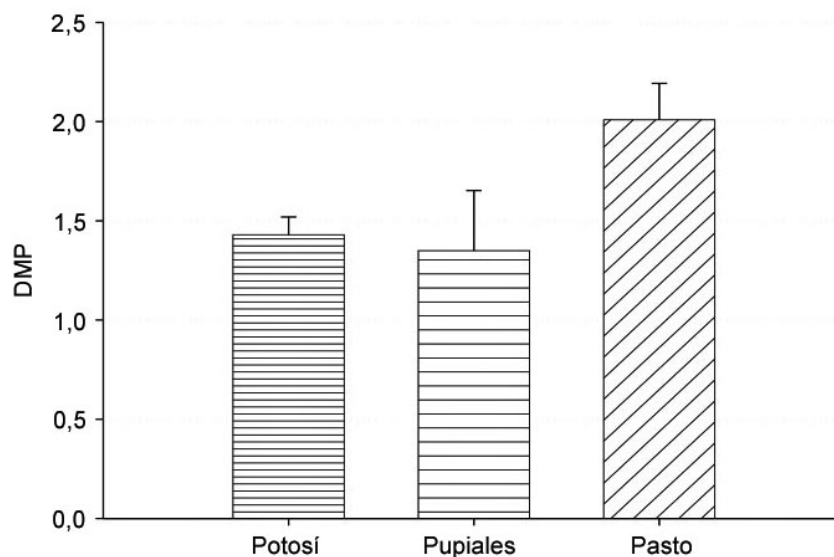


Figura 7. Diámetro medio ponderado (DMP) para estabilidad de agregados al agua en suelos de tres localidades con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 7. Weighted mean diameter (WMD) for water-stable aggregates in soils of three localities (Pupiales, Potosí, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex). Department of Nariño, Colombia. 2015.

Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica saturada en las tres localidades para las tres profundidades, se clasificó entre rápida y muy rápida, lo cual puede estar asociado con la textura franca arenosa y con el mínimo laboreo y la rotación con gramíneas (Figura 8).

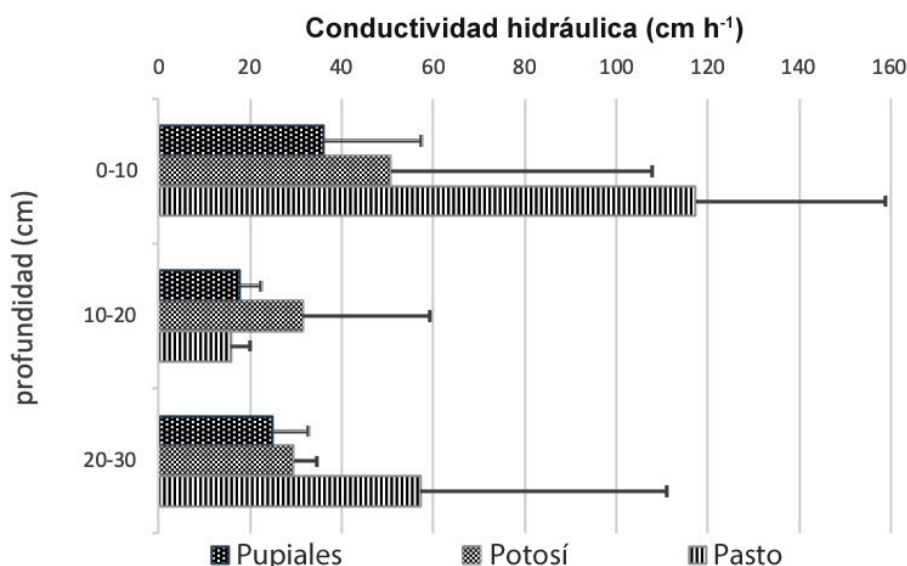


Figura 8. Conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}) a diferentes profundidades en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto), con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenar (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril). Departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 8. Saturated hydraulic conductivity (cm h^{-1}) at different depths in soils of three localities (Pupiales, Potosi, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex). Department of Nariño, Colombia. 2015.

Contenido de humedad

Las curvas de retención de humedad (Figura 9) mostraron que en los primeros 30 cm de profundidad, a bajas y altas succiones, la localidad de Pasto presentó el mayor contenido de humedad que fluctuó entre 75 % y 43 %, Pupiales y Potosí con un comportamiento similar, presentaron un contenido de humedad menor, que fluctuó entre 60 % y 37 %.

Escorrentía, infiltración y susceptibilidad a la erosión

De la lámina total de agua aplicada en las simulaciones, se infiltró 19 %, 26 % y 33 % para Potosí, Pupiales y Pasto, respectivamente; los niveles de escorrentía en las tres localidades fueron altos y fluctuaron entre 66 % y 81 % de la lámina total aplicada (Figura 10). La susceptibilidad del suelo a la erosión con base en la cantidad de sólidos en suspensión, mostró que la localidad con mayor susceptibilidad a la erosión fue Pupiales ($1,07 \text{ t ha}^{-1}$), seguido por Potosí ($0,26 \text{ t ha}^{-1}$) y Pasto ($0,049 \text{ t ha}^{-1}$) (Figura 10).

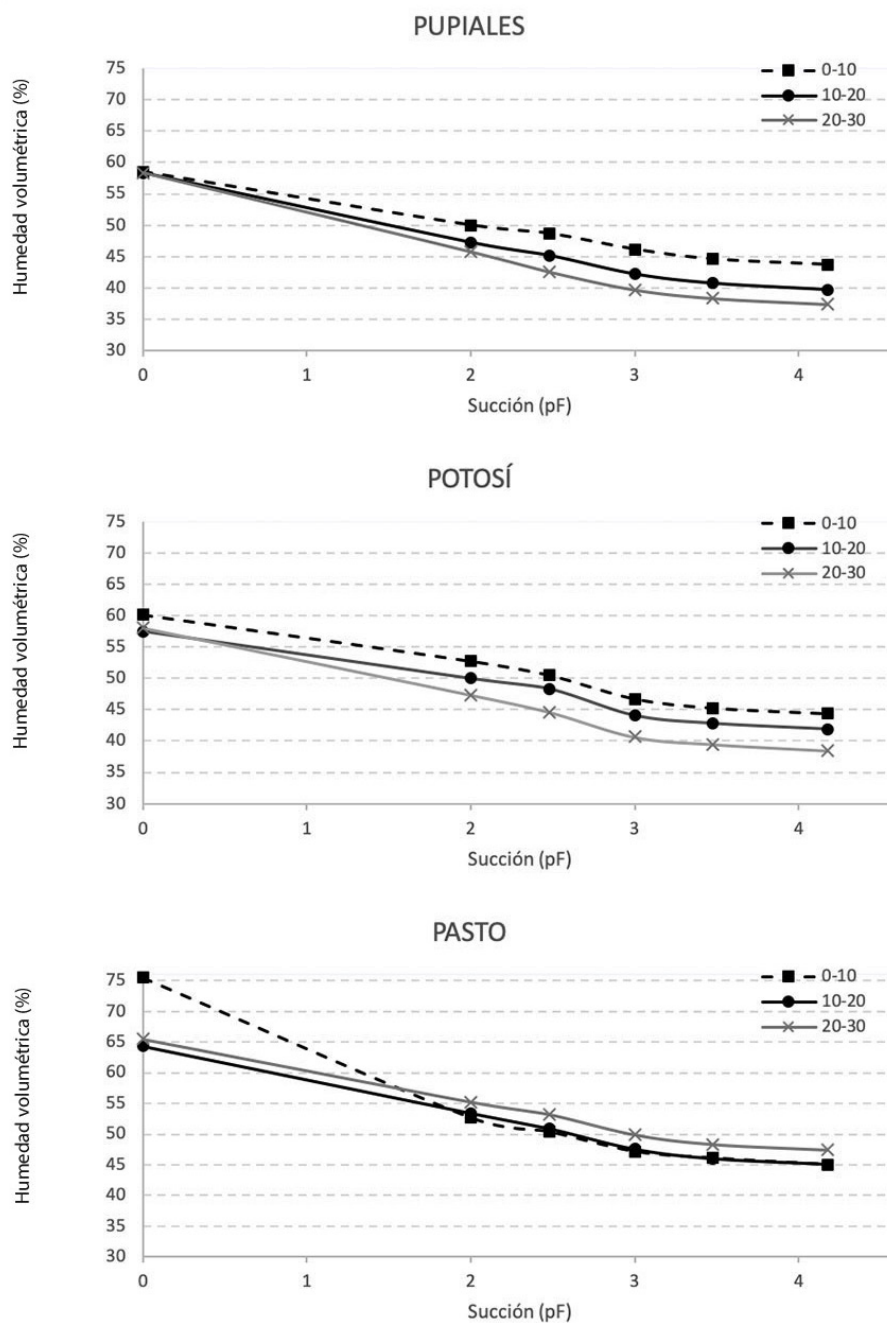


Figura 9. Curvas de retención de humedad a diferentes tasas de succión (pF) y profundidades en suelos de tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto) con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenarío (quechua), base de un complejo agrosilvopastoral), departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 9. Moisture retention curves at different suction rates (pF) and depths in soils of three localities (Pupiales, Potosi, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellón, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex), department of Nariño, Colombia. 2015.

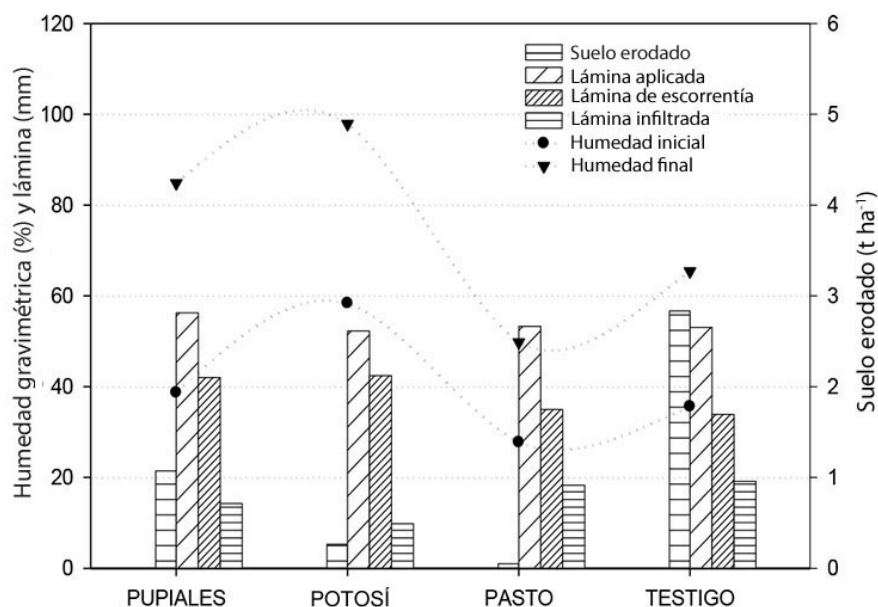


Figura 10. Comportamiento de la lámina de escorrentía, lámina infiltrada y susceptibilidad a la erosión de suelo en tres localidades (Pupiales, Potosí y Pasto) con sistema de siembra en wachado (término agrícola que significa surco, camellón, una tecnología de labranza mínima de origen milenario (quechua), base de un complejo agrosilvopastoril), departamento de Nariño, Colombia. 2015.

Figure 10. Behavior of the runoff sheet, infiltrated sheet, and the susceptibility to soil erosion in three locations (Pupiales, Potosi, and Pasto) with a wachado sowing system (agricultural term meaning furrow, camellon, a minimum tillage technology of millenary origin (quechua), base of an agrosilvo-pastoral complex), department of Nariño, Colombia. 2015.

Discusión

Los suelos Andisoles donde se realizó el trabajo presentaron alta porosidad y permeabilidad, baja densidad aparente (menor de 1 g cc^{-1}) y capacidad de retención de humedad variable que dependió del contenido de materia orgánica y del tipo de arcillas. La fracción mineral de estos suelos tuvo más control sobre las propiedades de los suelos que la fracción orgánica, se encontraron generalmente en planos escarpados, fácilmente alterables por acción antrópica (IGAC, 2004).

La densidad aparente, que tuvo una media de $0,76 \text{ g cc}^{-1}$ para las tres localidades en la capa de 0-30 cm de profundidad, fue similar a la densidad reportada por Ordoñez (2007) con promedio de $0,55 \text{ g cc}^{-1}$ en zonas productoras de papa/pasto en wachado en el municipio de Pasto, Nariño, y contrastante con los resultados obtenidos por Novillo et al. (2018), Xing et al. (2012) y Amorocho et al. (2012), en monocultivo de pasto, maíz y papa en Andisoles de Colombia y Ecuador, cuya densidad aparente fue de $1,14 \text{ g cc}^{-1}$.

La porosidad total con media de 63 % en los primeros 30 cm de profundidad en las tres localidades, fue consecuente con la densidad aparente y superior a lo reportado por Setiyo et al. (2016), Amézquita (1999), y Castro y Amézquita (1991), quienes propusieron como indicador crítico para calificar suelos estables desde el punto de vista físico, una porosidad total que oscile entre el 50 % y 55 %. El movimiento y comportamiento del agua y el aire en el suelo depende de la distribución del tamaño de poros, la cual determina la capacidad del suelo para transmitir agua y afecta la intensidad de los fenómenos interceptación, flujo de masa y difusión, por los cuales las plantas adquieren nutrientes.

En la distribución del tamaño de poros para las tres localidades en los primeros 30 cm de profundidad, se encontró que, de la porosidad total, los microporos representaron cerca del 69 %, los macroporos 19 % y mesoporos 12 %, lo cual puede ser una condición no deseable agrónomicamente y está relacionada con el dominio de microagregados en varios suelos andinos de Colombia. Es deseable una mejor proporción, debido a que el alto porcentaje de microporos genera problemas de disponibilidad de agua, los macroporos están relacionados con el agua drenable y el crecimiento de raíces y los mesoporos con el agua aprovechable (Volverás et al., 2016).

En general, los andisoles no intervenidos, desde el punto de vista físico, se caracterizaron por presentar baja densidad aparente, alta porosidad total y alta capacidad de retención de humedad; los valores encontrados en los suelos estudiados bajo la práctica de wachado, como baja densidad aparente y alta porosidad total, estuvieron relacionados con el mínimo laboreo del suelo y la utilización de una herramienta manual que generó menor impacto, conservando en el largo plazo algunas propiedades características de estos suelos sin intervención.

La clase textural franco arenoso (familia textural franca gruesa, grupo textural gruesa) para las tres localidades en los primeros 10 cm del perfil, con baja proporción de arcilla, confiere al suelo características particulares, debido a que la arena y el limo son partículas prácticamente inertes desde el punto de vista químico, mientras que las arcillas se comportan como coloides con carga eléctrica con capacidad para intercambio iónico. Los resultados contrastan con los reportados por Volverás et al. (2016), quienes encontraron valores de arcilla del 33 % y concuerdan con lo encontrado por Ordoñez (2007) en wachado, con valores de 5,5 % de arcilla y de 33 % cuando se quemó la materia orgánica del suelo.

En suelos de ladera, lo deseable agrónomicamente es que la mayoría de los agregados sean mayores a 1,0 mm para que haya resistencia al arrastre. La distribución de agregados estables al agua en las tres localidades en los primeros 30 cm de profundidad entre 47 % y 63 % fueron consecuentes con lo reportado por Ordoñez (2007), Poulénard et al. (2001) y Bernal et al. (2008) en suelos andinos cultivados con papa en Colombia y Ecuador, y contrastantes con lo reportado por Volverás y Amézquita (2009), quienes encontraron dominio de agregados estables menores a 1,0 mm en sistemas de labranza mecanizada intensiva.

El nivel de estabilidad de los suelos en wachado, se debe en gran medida a que en este sistema se utiliza una herramienta manual que, además de no invertir el suelo, no destruye los terrones ni los agregados del suelo; por otra parte, el alto contenido de materia orgánica conservada por el sistema y la acción de los exudados de las raíces de las gramíneas y leguminosas de la pastura, también contribuyen con el amarre y formación de los agregados.

La conductividad hidráulica obtenida en las tres localidades en los primeros 30 cm de profundidad, de alta a muy alta (mayor a 20 cm h⁻¹) en suelos andinos bajo papa/pastos en wachado por cerca de treinta años de uso, fue contrastante con el comportamiento de la conductividad hidráulica de suelos con diferentes sistemas de labranza. En suelos cultivados con papa con labranza mecanizada, Ati et al. (2015) encontraron valores de 6,97 cm h⁻¹; Ceballos et al. (2010) en un suelo andino de Nariño, Colombia, cultivado con papa con tratamientos de labranza mecanizada intensiva reportaron una conductividad hidráulica promedio de 1,57 cm h⁻¹.

Las curvas de retención de agua permiten estimar la cantidad de agua de fácil aprovechamiento (succión baja) y la de difícil aprovechamiento (succión alta) por las plantas; el agua del suelo con una succión alta exige de las plantas un esfuerzo mayor para extraerla. Los altos contenidos de humedad a bajas y altas succiones en las tres localidades en la capa de 0-30 cm de profundidad (entre 37 % y 75 %) estuvieron relacionadas con los contenidos de materia orgánica, presencia del grueso cespedón de la pastura formado durante tres años, la baja densidad aparente y la alta porosidad, y fue consecuente con la alta conductividad hidráulica.

Con relación a la disponibilidad de agua, para las tres localidades en las tres profundidades, se encontró que el agua aprovechable fue baja (8 %), ya que gran parte de la humedad presente en el suelo se encontraba fuertemente retenida, debido al alto porcentaje de microporos. Resultados similares obtuvieron Ordoñez (2007) y Bernal et al. (2008) en suelo andinos del sur y centro de Colombia, cultivados con papa/pastos y contrastantes con los obtenidos

en agroecosistemas con papa por Setiyo et al. (2016) y Volverás et al. (2016), quienes encontraron menores contenidos de humedad tanto a bajas como altas succiones.

Para un sistema de uso del suelo como el wachado, una infiltración entre 19 % y 34 % es baja respecto a lo reportado en otros estudios con labranza mecanizada con infiltración mayor al 40 % (Volverás et al., 2007; Doring et al., 2005). Como resultado de la baja infiltración, la escorrentía en las tres localidades fue alta (entre 66 % y 81 %). Los resultados estuvieron relacionados con el componente pastura y su uso por tres años sin remover el suelo, lo cual generó una capa de hasta 20 cm de cespedón, que dificulta la entrada de agua en los primeros centímetros del perfil (Figura 1).

El comportamiento de la escorrentía e infiltración bajo las condiciones de estudio se explica, en parte, por la alta microporosidad, condición que no permite una rápida entrada de agua al perfil, en comparación con la intensidad de la lluvia aplicada (110 mm h^{-1}). En el proceso de flujo superficial, favorecido por la pendiente, se transportaron partículas de suelo desprendidas por el impacto de la lluvia que generó cantidades de suelo erodado significativas para un periodo de 30 min de lluvia simulada, pero mucho menores que el suelo con labranza mecanizada ($2,83 \text{ t ha}^{-1}$). Los resultados fueron similares a los reportados por Muñoz et al. (2010), quienes encontraron $0,93 \text{ t ha}^{-1}$ de suelo erodado en suelo andino con pastura con lluvia simulada de 100 mm h^{-1} , y a lo reportado por Volverás et al. (2007) en suelo andino bajo rotación trigo/maíz/papa con $0,6 \text{ t ha}^{-1}$; contrastantes con los resultados de Doring et al. (2005), en suelo cultivado con papa con labranza mecanizada, con lluvia simulada de 80 mm h^{-1} con 16 t ha^{-1} de suelo erodado.

El comportamiento de los indicadores físicos de suelo bajo las condiciones de estudio, con uso del suelo por más de treinta años en wachado, con valores similares a los de un suelo andino no intervenido (Volverás et al., 2007; Volverás y Amézquita, 2009), demostró el efecto en el largo plazo que tiene la rotación papa/pasto y el uso de una herramienta manual; lo anterior se reflejó en indicadores como la baja densidad aparente y la alta porosidad total, ya que la herramienta manual no destruye agregados ni expone la materia orgánica a la oxidación.

Aunque en wachado no se utiliza maquinaria ni implementos pesados, y a pesar de que la materia orgánica proporciona agregación a las arenas, soltura a las arcillas, aumenta la agregación, la porosidad y la aireación, en las tres localidades la distribución y la estabilidad de agregados no fue mejor, debido a que los suelos andisoles en su estado natural, presentan una estructura granular con dominio de agregado menores a $1,0 \text{ mm}$ (Egashira et al., 1983), y porque además, hubo predominio de partículas de arenas y limos que presentan baja cohesión como unidades estructurales y, por tanto, baja respuesta al impacto de las gotas de lluvia.

Respecto a la condición hídrica del suelo, los resultados se explican entre otros factores, por el grupo textural de los suelos, el contenido de materia orgánica, la porosidad total y el manejo y uso del suelo; los procesos como la conductividad, la infiltración y la escorrentía son afectados por la estructura, la textura, las grietas y agujeros de macrofauna y los canales que dejan las raíces. Sin embargo, la cobertura del suelo durante tres años con mezcla de trébol (*Trifolium pratense*), raygras (*Lolium* sp.), azul orchoro (*Dactylis glomerata* L.), kikuyo (*Cenchrus clandestinum*) o tretalite (*Lolium hybridum* hausskn) con alta carga animal (7-8 animales ha^{-1}) y largos periodos de ocupación, generaron una gruesa capa de cespedón apretada, que no favoreció el ingreso del agua de lluvia simulada, generando alta escorrentía y a su vez, poco arrastre de suelo, debido a que el suelo no se remueve durante la rotación con pastura.

Conclusiones

El sistema wachado con el uso de una herramienta manual y la rotación papa/pastos, mantuvieron en el largo plazo condiciones de densidad, porosidad total, de conductividad de agua y retención de humedad, agrónomicamente adecuadas, condiciones fundamentales en los procesos de enraizamiento y en el suministro de

agua y nutrientes del suelo. Como los pequeños productores dependen del suelo y del agua de lluvia para la producción de alimentos en condiciones agroecológicas de pendientes entre 20 % y 40 %, el wachado se mostró como la alternativa apropiada para minimizar los impactos negativos y la degradación de estos recursos.

La introducción del componente pastura en estos sistemas tropicales de producción, puede mantener condiciones físicas adecuadas para la absorción de nutrientes y agua, además de facilitar la acumulación de materia orgánica, aspecto esencial en la conservación y productividad del suelo.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia, quien financió con recursos públicos el macroproyecto en el que se realizó esta investigación.

Literatura citada

- Amézquita, E. 1999. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. *Palmas* 20(1):73-86.
- Amézquita, E. 2001. Las propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. En: F. Silva, editor, *Fertilidad de suelos: Diagnóstico y control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, COL. p. 137-154.
- Amézquita, E. 2013. Propiedades físicas de los suelos de los Llanos Orientales y sus requerimientos de labranza. En: E. Amézquita et al., editores, *Sistemas agropastoriles: Un enfoque integrado para el manejo sostenible de Oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*. CIAT, Cali, COL. p. 29-57.
- Amézquita, E., I. Rao, D. Molina, S. Phiri, R. Lal, and R. Thomas. 2000. Constructive an arable layer: Key issue for sustainable agriculture in tropical savanna soil. Presented at: 15th Conference of the International Soil Tillage Research Organization (ISTRO): Tillage at the Threshold of the 21st Century: Looking Ahead. Fort Worth, TX, USA. July 2-7.
- Amorocho, C., C. Sánchez, y G. Murcia. 2012. Efecto del sistema de labranza conservacionista en las propiedades de los suelos de ladera en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). *Ingeniería y Región* 9:83-92. doi:10.25054/22161325.778
- Ati, A.S., S. Ahmed, and S. Same. 2015. Effect of tillage system on some machinery and soil physical properties, growth and yield of potato *Solanum tuberosum* L. *IOSR J. Agric. Vet. Sci.* 8(4):63-65. doi:10.9790/2380-08436365
- Bastidas, S. 2003. Evaluación de alternativas metodológicas para el manejo integrado del suelo en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en la provincia del Carchi. Tesis Ing. Agropecu. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ibarra, ECU.
- Bernal, N., G. Montealegre, S.I. Ipaz, O. Chaparro, y L.M. Ramírez. 2008. Efecto de cuatro métodos de labranza sobre las propiedades físicas y la pérdida de suelo en la rotación papa-pastos en áreas de ladera en una región alto andina de Colombia. *Acta Agron.* 57(1):35-42.
- Campo, J.M. 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 mini simulador de lluvia. Tesis Ing. Agric., Universidad Nacional de Colombia, Palmira, COL.
- Campo, J.M., B. Volverás, O. Pérez, y G. Sánchez. 2014. Condición física del suelo andino bajo el sistema de siembra de papa en guachado (wachado). En: E. Ñustez, et al. editores, *Memorias XXVI Congreso de la Asociación Latinoamericana de la Papa (ALAP)*. ALAP, Bogotá, COL. p. 81.

- Castro, F., y C.E. Amézquita. 1991. Sistemas de labranza y producción de cultivos en suelos con limitantes físicos. *Suelos Ecuatoriales* 21(1):21-28.
- Ceballos, D., O. Hernández, y J. Vélez. 2010. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas en un andisol del departamento de Nariño. *Rev. Agron.* 27(1):40-48.
- Chirinos, I.J., y M.E Mattiazzo. 2004. Variación de la conductividad hidráulica en suelos saturados en función de la concentración de sodio presente en residuo agroindustrial. *Rev. Fac. Agron.* 21(1):1-11.
- Cobo, L. 1998. Diseño, construcción y evaluación de un mini-simulador portátil de lluvia para estudios de susceptibilidad a erosión en Laderas. Tesis Ing. Agríc., Universidad del Valle, y Universidad Nacional de Colombia, Palmira, COL.
- Denevan, W. 1995. Prehistoric agricultural methods as models for sustainability. *Adv. Plant Pathol.* 11:21-43. doi:10.1016/S0736-4539(06)80004-8
- Doring, T.F., M. Brandt, J. Heß, M.R. Finckh, and H. Saucke. 2005. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes. *Field Crops Res.* 94:238-249. doi:10.1016/j.fcr.2005.01.006
- Egashira, K., K. Kaetsu, and K. Takuma. 1983. Agrégate stability as an index of erodability of Andosols. *Soil Sci. Plant Nutr.* 29:473-481. doi:10.1080/00380768.1983.10434650
- FEDEPAPA (Federación Colombiana de productores de papa). 2019. Boletín mensual regional. Agosto de 2019. No. 3(3). FEDEPAPA, Bogotá, D.C., COL. <https://fedepapa.com/wp-content/uploads/2020/01/BOLETIN-REGIONAL-NARI%C3%91O-2019.pdf> (consultado 10 mar. 2020).
- Forsythe, W. 1980. Física de suelos. Manual de laboratorio. IICA, San José, CRI.
- Gárate, A., e I. Bonilla. 2008. Nutrición mineral y producción vegetal. En: J. Azcón, y M. Talón, Fundamentos de fisiología vegetal. 2^{da} ed. McGraw-Hill Interamericana, Madrid, ESP. p. 143-164.
- García, Y., W. Ramírez, y S. Sánchez. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 35(2):125-138.
- Holdridge, L.R. 1987. Ecología basada en zonas de vida. IICA, San José, CRI.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2004. Descripción de los suelos. En: L. Burgos et al., editores, Estudio general de suelos y zonificación de tierras: Departamento de Nariño. IGAC, Bogotá, COL. p. 61-168.
- Jaramillo, D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad nacional de Colombia, Medellín, COL.
- Kashyapa, Y. 2013. Prácticas ancestrales de crianza de agua, una guía de campo. Estrategias para adaptarnos a la escasez de agua. PNUD, BCPR, y SNGR, Reimpresión Edipcentro Cía. Ltda., Riobamba, ECU.
- Koohafkan, P., y M. Altieri. 2011. Sistemas ingeniosos del patrimonio agrícola mundial: Un legado para el futuro. FAO, Roma, ITA.
- Laime, T. 2007. Diccionario bilingüe Iskay simipi yuyayk'ancha: quechua – castellano castellano – quechua. futatraw.ourproject.org <https://futatraw.ourproject.org/descargas/DicQuechuaBolivia.pdf> (consultado 6 oct. 2019).
- Lal, R. 1993. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil Till. Res.* 27:1-8. doi:10.1016/0167-1987(93)90059-X
- Muñoz, F.A., A. Figueroa, E.H. Pérez, y E. Rengifo. 2010. Susceptibilidad a la erosión en dos agroecosistemas altoandinos del Cauca. *Rev. Invest. Univ. Quindío* 20:9-17.
- Novillo, I.D., M.D. Carrillo, J.E. Cargua, V. Nabel, K.E. Albán, y F.L. Morales. 2018. Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Temas Agrar.* 23(2):177-187. doi:10.21897/rta.v23i2.1301

- Ordoñez, E. 2007. Efecto del sistema guachado (wachay) y uso del suelo sobre algunas propiedades físicas en la microcuenca del río Bobo, departamento de Nariño. Tesis M.Sc., Universidad Nacional de Colombia, y Universidad de Nariño, Pasto, COL.
- Orozco, O. 1991. Caracterización física y dinámica del agua bajo tres sistemas de labranza en un Andisol de la antigua serie Tibaitatá. Tesis M.Sc., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, COL.
- Poulenard, J., P. Podwojewski, J.L. Janeau, and J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *CATENA* 45(3):185-207. doi:10.1016/S0341 8162(01)00148-5
- Pumisacho, M., y S. Sherwood. (ed.). 2002. El cultivo de la papa en Ecuador. INIAP-CIP, Quito, ECU.
- Quispe, M. 2010. Sistematización de buenas prácticas en el marco de la prevención y mitigación de siniestros climáticos en el sector agropecuario. Caso territorio indígena Jach'a Suyu Pakajaqi en el altiplano central y Yapuchiris en Omasuyos, altiplano norte, Bolivia. FAO, Roma, ITA.
- Rozas, J. 2007. El modo de pensar andino: Una interpretación de los rituales de Calca. Tesis M.Sc., Pontificia Universidad Católica del Perú, Cuzco, PER.
- Sánchez, M., y J. Aguirreolea. 2008. Absorción de agua por la raíz y transporte por el xilema. Balance hídrico de la planta. En: J. Azcón, y M. Talón, editores, *Fundamentos de fisiología vegetal*. 2^{da} ed. McGraw-Hill Interamericana, Madrid, ESP. p. 57-80.
- Setiyo, Y., I.B.P. Gunadnya, I.B.W. Gunam, I.D.G. Mayun, I.K.B. Susrusa, and I.G.A. Lani. 2016. Improving physical and chemical soil characteristic on potatoes (*Solanum tuberosum* L.) cultivation by implementation of Leisa system. *Agric. Sci. Procedia* 9:525-531. doi:10.1016/j.aaspro.2016.02.172
- Toapanta, G. 2004. Evaluación socioeconómica del sistema de labranza reducido wachu rozado frente a dos sistemas de labranza en el cultivo de papa, en la provincia del Carchi. Tesis Ing. Agrón., Universidad Central del Ecuador, Quito, ECU.
- USDA. 2014. Claves para la taxonomía de suelos. USDA, USA. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf (consultado 03 mar. 2020).
- Volverás, B., y E. Amézquita. 2009. Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempos de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta Agron.* 58(1):35-39.
- Volverás, B., E. Amézquita, y H. Tafurt. 2007. Efecto del tiempo de uso en las condiciones físicas del suelo Andino en el departamento de Nariño, Colombia. *Acta Agron.* 56(1):29-36.
- Volverás, B., E. Amézquita, y J.M. Campo. 2016. Indicadores de calidad física del suelo de la zona cerealera andina del departamento de Nariño, Colombia. *Cienc. Tecnol. Agropecu.* 17:361-377. doi:10.21930/rcta.vol17_num3_art:513
- Xing, Z., P. Toner, L. Chow, H.W. Rees, S. Li, and F. Meng. 2012. Effects of Hay Mulch on soil properties and potato tuber yield under irrigation and nonirrigation in New Brunswick, Canada. *J. Irrigation Drainage Eng.* 138:703-714. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000459
- Yoder, R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of erosion losses. *Agron. J.* 28:337-351. doi:10.2134/agronj1936.00021962002800050001x