



UNIVERSIDAD DE CUENCA
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ecohidrología

“Impactos de las plantaciones de pino y pastoreo sobre las propiedades hidrofísicas y SOM de los suelos alto Andinos del sur del Ecuador”

Trabajo de titulación previa a la obtención del Título de Magister en Ecohidrología

Autor:

Ing. Agr. Franklin Geovanny Marín Molina
C.I. 0105802375

Director:

Ing. Patricio Javier Crespo Sánchez, PhD
C.I. 0102572773

Cuenca – Ecuador
2018

Resumen

En América del Sur, los ecosistemas alto Andinos como el bosque montano alto y el páramo proveen importantes servicios ecosistémicos, que están relacionados con las propiedades de los suelos caracterizados por su regulación y almacenamiento de agua. Sin embargo, sus suelos han sido intervenidos por el establecimiento de plantaciones de pino y pastoreo. En este sentido, el objetivo de este estudio es evaluar los impactos de las plantaciones de pino y pastoreo sobre las propiedades hidrofísicas y en el contenido de materia orgánica (SOM) de los suelos al sur del Ecuador (2640 a 3758 m s.n.m.). Para éste propósito, se seleccionaron 7 sitios de estudio. En cada sitio de estudio, se establecieron parcelas en áreas de cobertura natural no intervenida, plantaciones de pino y pastoreo. Los resultados mostraron que las plantaciones de pino y pastoreo en los ecosistemas alto andinos causan cambios (incrementos o disminuciones) principalmente en la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), capacidad de retención de agua en pF 0 a 2.52 y en el contenido de SOM, sin embargo sus impactos no pudieron ser generalizados. En el caso de los impactos de las plantaciones de pino fueron dependientes de la profundidad de muestreo, tipo de ecosistema, características de la plantación y uso anterior del suelo, mientras en el caso de pastoreo fueron dependientes de la profundidad de muestreo, y el manejo del suelo (intensidad de pastoreo y labores culturales). Estas dependencias sugieren una complejidad al evaluar los impactos, por tal razón se debe evitar hacer generalizaciones a escala regional.

Palabras Clave

Andosoles, Bosque Montano Alto, Páramo, Actividades Antrópicas, Propiedades Hidrofísicas.

Abstract

In South America, high Andean ecosystems such as high montane forests and the páramos provide important ecosystem services; they are associated with high water regulation capacity and water retention properties of the soils. However, these soils have been altered by the establishment of pine plantations and grazing. The objective of this study is to evaluate the impacts of pine plantations and grazing on the hydro-physical properties and on the soils' organic matter content (SOM) in southern Ecuador (2640 to 3758 m a.s.l.). In order to achieve this, seven study sites were selected and each one was parceled up into natural undisturbed plots, pine plantations, and grazing. All characteristics were considered at two different depths (0 - 10 cm, and 10 - 25 cm) in each plot. The results showed that the pine plantations and grazing sites in high Andean ecosystems produce changes (increments or reductions) mainly on the saturated hydraulic conductivity (K_{sat}), on the water retention capacity at pF 0 to 2.52, and on the SOM content; however, their impacts could not be generalized. The impacts of pine plantations were dependent on sampling depth, ecosystem type, plantation characteristics, and previous soil use. While the impacts of grazing are dependent on sampling depth, and soil management (grazing intensity and tilling activities). These relationships imply difficulties when evaluating impacts, and therefore, it is necessary to avoid generalizing the impacts on high Andean ecosystems at the regional scale.

Keywords

Andosols, High Montane Forests, Páramo, Anthropic Activities, Hydro-Physical Properties.

Índice

Resumen	2
Abstract.....	3
1. Introducción	11
2. Materiales y Métodos.....	15
2.1 Áreas de Estudio	15
2.2 Caracterización de las propiedades de los suelos	18
2.3 Análisis de laboratorio	19
2.4 Análisis estadístico.....	19
3. Resultados.....	21
3.1 Propiedades de los suelos en áreas de cobertura natural no intervenida	21
3.1.1 Características generales	21
3.1.2 Relaciones de la elevación con las propiedades hidrofísicas y con el contenido de SOM de los suelos	22
3.1.3 Diferencias de las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos con cobertura natural no intervenida.....	23
3.2 Caracterización de las plantaciones de pino y del pastoreo.....	27
3.3 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo las plantaciones de pino.....	29
3.4. Influencia del desarrollo de las plantaciones de pino en las propiedades hidrofísicas y en contenido de SOM del suelo	34
3.5 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo pastoreo	35
4. Discusión.....	40
4.1 Propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM de los suelos en áreas de cobertura no intervenidas.....	40



4.2 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo plantaciones de pino	42
4.2.1 Cambios a 0 – 10 cm de profundidad	43
4.2.2 Cambios a 10 – 25 cm de profundidad	46
4.3 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo pastoreo	48
4.3.1 Cambios a 0 – 10 cm de profundidad	48
4.3.2 Cambios a 10 – 25 cm de profundidad	50
5. Conclusiones	52
6. Referencias.....	53
7. Anexos	61

Índice de Figuras

Figura 1. Área de estudio y sitios de muestreo ubicados dentro de la provincia del Azuay en el sur del Ecuador. F= Bosque montano alto; Tg= Páramo.	15
Figura 2. Forestplots del cambio porcentual en las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM (incremento o disminución) del horizonte superficial de los suelos a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad debido a las plantaciones de pino en relación a las propiedades de los suelos bajo vegetación nativa en los sitios de estudio. FPi= Plantación de pino en bosque montano alto, TgPi= Plantación de pino en páramo. Los nombres de las variables se encuentran definidos en la tabla 3. De color azul representa un cambio significativo ($p<0.05$) en cada una de las variables.....	33
Figura 3. Figura 3a) Indican los coeficientes de correlación entre la diámetro altura al pecho (DAP), altura (Alt) y diámetro del dosel (CD) del árbol con las propiedades hidrofísicas y SOM. Los símbolos de color azul indican correlaciones estadísticamente significativas ($p<0.05$) y los de color negro indican correlaciones no significativas. Los nombres de las variables en la Figura 3a) se encuentran definidos en la tabla 3. En la Figura 3b) indican la relación entre la Alt del árbol con la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) a 0 – 10 cm de profundidad y la Figura 3c) Indican la relación entre la Alt con la K_{sat} a 10 – 25 cm de profundidad.	35
Figura 4. Forestplots del cambio porcentual en las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM (incremento o disminución) del horizonte superficial de los suelos a la profundidad de 0 – 10 y 10 – 25 cm debido al pastoreo en relación a las propiedades de los suelos bajo cobertura natural no intervenida en los sitios de estudio. FG= Pastoreo en bosque montano alto, TgG= Pastoreo en páramo, TgG*=Pastoreo en pajonal intervenido por quema. Los nombres de las variables se encuentran definidos en la tabla 3. De color azul representa un cambio significativo ($p<0.05$) en cada una de las variables.....	39

Índice de Tablas

Tabla 1. Características morfológicas de los horizontes superficiales de los suelos en áreas de cobertura natural no intervenida (F= Bosque montano alto; Tg= Páramo).....	22
Tabla 2. Correlaciones de Spearman entre la elevación con las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM de los suelos a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad en áreas de cobertura natural no intervenidas.....	23
Tabla 3. Valores de las medianas y entre paréntesis corresponde a los percentiles (25%-75%) de las propiedades hidrofísicas y del contenido de SOM de los suelos en áreas de cobertura natural no intervenidas (F= Bosque montano alto; Tg= Páramo).	26
Tabla 4. Descripción general y medianas de las variables dendrométricas de las plantaciones de pinos en los sitios de estudio.....	28
Tabla 5. Descripción de los sitios de pastoreo en el área de estudio.	29
Tabla 6. Valores de las medianas y entre paréntesis corresponde a los percentiles (25 %-75 %) de las propiedades hidrofísicas y del contenido de SOM de los suelos en condiciones alteradas bajo las plantaciones de pino.....	31
Tabla 7. Valores de las medianas y entre paréntesis corresponde a los percentiles (25 % - 75 %) de las propiedades hidrofísicas y del contenido de SOM de los suelos bajo pastoreo.....	37

Cláusula de Propiedad Intelectual

Franklin Geovanny Marín Molina, autor del trabajo de titulación “**Impactos de las plantaciones de pino y pastoreo sobre las propiedades hidrofísicas y SOM de los suelos alto Andinos del sur del Ecuador**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, Noviembre de 2018



Franklin Geovanny Marín Molina

C.I: 0105802375

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Franklin Geovanny Marín Molina en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Impactos de las plantaciones de pino y pastoreo sobre las propiedades hidrofísicas y SOM de los suelos alto Andinos del sur del Ecuador”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, noviembre de 2018



Franklin Geovanny Marín Molina

C.I: 0105802375

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto “Mejoramiento de las estrategias de manejo forestal en los páramos del sur del Ecuador: Una contribución a la conservación y sostenibilidad del uso de la tierra” ejecutado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC) y la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA-EP), y por la Fundación Alemana de Investigación (DFG, BR2238/14-1) a través del proyecto B3 “Improvement of forest management key strategies”. Un agradecimiento especial a Amanda Suqui, Jessica Merecí y Esteban Landy por la asistencia en las actividades de campo y laboratorio. De igual manera, agradecimiento especial a los propietarios de cada sitio de estudio por su apoyo logístico, y su contribución en la información durante las entrevistas.

1. Introducción

Los ecosistemas alto Andinos como el bosque montano y el páramo (Buytaert, Cuesta-Camacho, & Tobón, 2011) proveen servicios ecosistémicos de relevancia como la producción y regulación de agua, almacenamiento de carbono, entre otros (Célleri & Feyen, 2009, Crespo et al., 2011). De esta forma, estos ecosistemas abastecen las necesidades de agua (p.ej., agua potable, riego y generación de energía hidroeléctrica) de principales ciudades en la región tales como Quito, Cuenca, Bogotá y Lima (Célleri & Feyen, 2009).

La producción de servicios hidrológicos brindada por ecosistemas alto Andinos ha sido estrechamente relacionada con el rol que sus suelos tienen a escala de cuenca (p.ej., Correa et al., 2017; Mosquera, Lazo, Célleri, Wilcox, & Crespo, 2015; Mosquera et al., 2016). La importancia de los suelos se debe principalmente a su alto contenido de SOM (Buytaert, Celleri, Willems, Bievre, & Wyseure, 2006), baja densidad aparente (DA) ($<0.6 \text{ g cm}^{-3}$) (Poulenard, Podwojewski, & Herbillon, 2003) y alta retención de agua (Buytaert et al., 2002; Hofstede, Lips, & Jongsma, 1998; Mena & Medina, 2000). A pesar de la importancia de estos suelos en la provisión de servicios ecosistémicos, los suelos de los ecosistemas alto Andinos han sido intervenidos por actividades antrópicas desde épocas prehispánicas (Mena & Hofstede, 2006) y existe un limitado número de evaluaciones de los efectos de cambio del uso de la tierra debido a actividades antrópicas en la propiedades hidrofísicas de los suelos.

Dentro de las principales actividades que han incidido sobre la degradación de los suelos en la región Andina se encuentran la aforestación y el pastoreo (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, 2007; Harden, Hartsig, Farley, Lee, & Bremer, 2013; Knoke et al., 2014). La aforestación con especies exóticas como el pino se ha llevado acabo con el propósito de producción de madera para reducir la presión en los ecosistemas nativos (Farley and Kelly, 2004; Hofstede, 2001; Hofstede, Groenendijk, Coppus, Fehse, & Sevink, 2002;) y la captura de carbono atmosférico (Farley, Kelly, & Hofstede, 2004; Medina & Mena, 2000). En este sentido, muchas de las plantaciones de pino fueron establecidas en sitios de alto valor ecológico e

hidrológico para la población de los Andes sin un estudio previo sobre los impactos ambientales en los recursos suelo y agua.

Por otro lado, el pastoreo en los ecosistemas alto Andinos se ha llevado a cabo desde tiempos prehispánicos (siglo XV). Esta práctica se debe a la crianza de animales (bovinos, equinos y ovinos) tanto de forma intensiva como extensiva (Mena & Hofstede, 2006). En algunas ocasiones, el pastoreo se realiza directamente en los ecosistemas naturales, considerando como forraje al pajonal asociado con quemas para obtener un pasto apto para la alimentación del animal. Debido a la baja producción de forraje del pajonal, en muchas de las zonas el pastoreo se ha venido dando en pastos establecidos con especies introducidas (Buytaert, Wyseure, De Bièvre, & Deckers, 2005), en donde el ganado puede obtener un forraje más nutritivo en una menor área (Hofstede, 2001).

La intervención de los suelos por plantaciones de pino y pastoreo en los ecosistemas Andinos ha conllevado a cambios importantes en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos principalmente en el horizonte superficial (i.e. <30 cm de profundidad) (Farley et al., 2004; Hofstede et al., 2002; López, Veldkamp, & de Koning, 2005; Podwojewski, Poulenard, Zambrana, & Hofstede, 2002). Dichos cambios en la propiedades de los suelos han sido relacionados con un menor rendimiento hídrico y modificaciones en la respuesta hidrológica de las cuencas alto Andinas (Buytaert, Iñiguez, & Bièvre, 2007; Crespo et al., 2011; Ochoa et al., 2016). En el caso de pino, debido al alto consumo de agua por los árboles, los suelos tienden a secarse favoreciendo la descomposición de SOM (Farley et al., 2004; Hofstede et al., 2002) y por ende a una menor capacidad de retención de agua de los suelos (Harden et al., 2013). Además, se suma la formación de los flujos preferenciales creados por el desarrollo de raíces del árbol incrementando la K_{sat} del suelo (Greenwood & Buttle, 2012). Pese a estas investigaciones aún existen contradicciones sobre los efectos de los cambios en las propiedades de los suelos generados por las plantaciones de pino en la región. Por ejemplo, en algunos estudios se ha reportado un incremento de la SOM en los Andosoles en las plantaciones de pino (Quichimbo et al., 2012), mientras en otro estudio no se evidenció cambios en dicha propiedad (Chacón, Gagnon, & Paré,

2009). Adicionalmente, en la mayoría de estudios, no se toma en cuenta el uso anterior del suelo como un factor importante que podría influenciar en los cambios de las propiedades de los suelos debido a la plantación de pino, como se ha sido evidenciado por La Manna, Buduba, & Rostagno (2016).

En pastoreo, debido a la pérdida de cobertura vegetal ya sea por quema o por pastoreo del ganado provoca una mayor exposición de los suelos a la radiación solar conllevando al secado e incremento de la densidad aparente del suelo (DA), la pérdida de SOM del suelo (de Koning, Veldkamp, & López-Ulloa, 2003; Hofstede et al., 2002) y disminución de la retención de agua de los suelos (Daza, Hernández, & Triana, 2014; Podwojewski et al., 2002). Además, los suelos bajo pastoreo pueden verse afectados por la erosión hídrica debido a la disminución de la K_{sat} (Quichimbo et al., 2012). A pesar de ello, los impactos del pastoreo no han sido consistentes y algunos estudios muestran una disminución de la DA y un incremento de la SOM del suelo bajo pastoreo (Celik, 2005; Quichimbo et al., 2012). Tales discrepancias pueden deberse a la intensidad de pastoreo y en algunos casos el pastoreo extensivo no sería considerado como una presión en los ecosistemas alto Andinos (Buytaert, Deckers, & Wyseure, 2007), esta aseveración debe ser evaluada cuando el pastoreo extensivo se da en sitios donde se establecieron pastos mediante labores preculturales, las cuales pueden ser diferentes en cada sitio de pastoreo.

Considerando el rol de las propiedades de los suelos en los servicios ecosistemas alto Andinos y la presión que han sido sometidos por las actividades de aforestación como de pastoreo. Nuestro principal objetivo fue cuantificar los impactos de las plantaciones de pino y de pastoreo sobre las propiedades hidrofísicas, y en el contenido de SOM del horizonte superficial de los suelos en ecosistemas de bosque montano alto y páramo en la región sur del Ecuador. Para este fin fue necesario plantearnos las siguientes preguntas de investigación:

1) ¿Existen relaciones de la elevación con las propiedades de los suelos en condiciones naturales ubicadas en el ecosistema alto Andino y sus diferencias entre sitios como también profundidad de muestreo? Dicha pregunta fue con el propósito de conocer si los suelos bajo cobertura nativa son homogéneos en el área de



estudio y si es posible agrupar los sitios para poder evaluar los impactos de las plantaciones de pino y pastoreo. Dado que varios estudios desarrollados en áreas aledañas a nuestra área de estudio han evaluado los impactos de dichas actividades sin considerar la ubicación del sitio y profundidad de muestreo, obteniendo una alta variabilidad en sus resultados y conclusiones no consistentes (Chacón, Gagnon, Paré, & Proulx, 2003; Hofstede et al., 2002).

2 ¿Existen impactos de las plantaciones de pino y de pastoreo en las propiedades de los suelos de los ecosistemas alto Andinos?

A través de este estudio se contribuye con información relevante para poder mejorar sustancialmente la toma de decisiones sobre el manejo de los recursos naturales (agua y suelo) y a la generación de políticas de manejo y de conservación de los ecosistemas alto Andinos del sur del Ecuador.

2. Materiales y Métodos

2.1 Áreas de Estudio

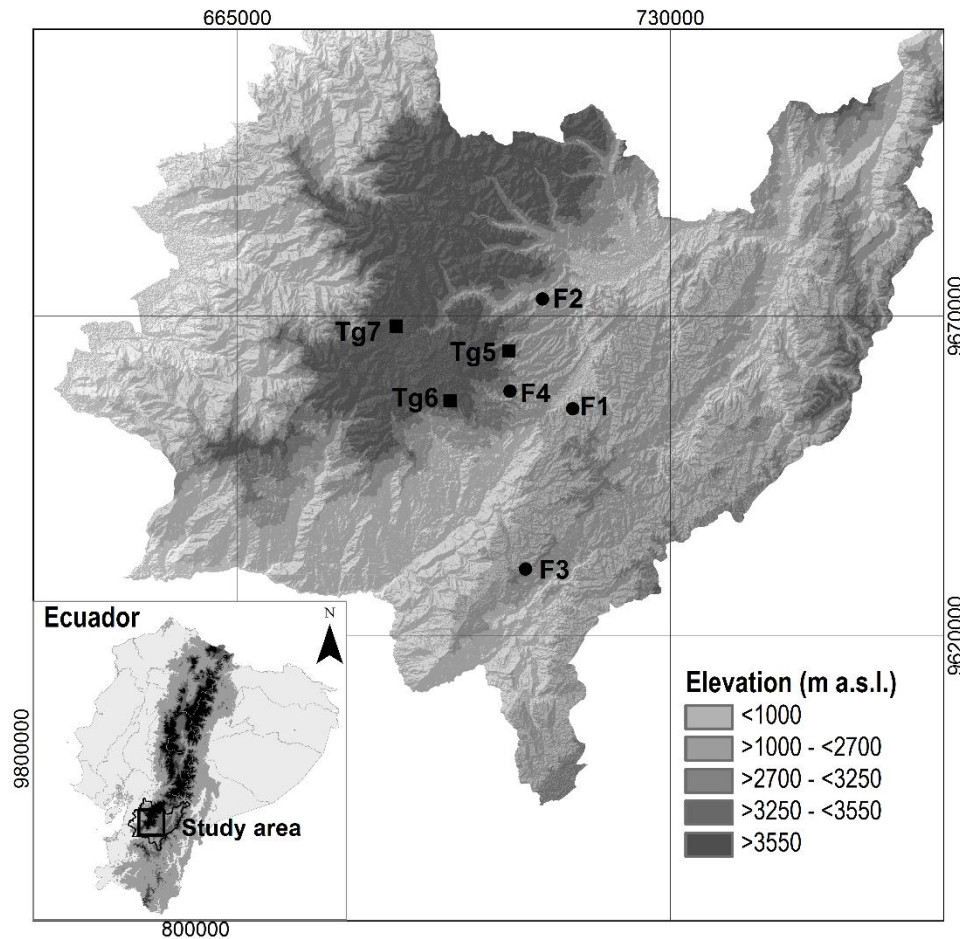


Figura 1. Área de estudio y sitios de muestreo ubicados dentro de la provincia del Azuay en el sur del Ecuador. F= Bosque montano alto; Tg= Páramo.

El área de estudio estuvo localizada en la provincia del Azuay al sur del Ecuador en un rango de elevación de 2640 a 3758 m s.n.m. (Figura 1). Dentro del área de estudio se encuentran dos ecosistemas alto Andinos que son: i) Bosque montano alto y ii) Páramo. El bosque montano alto caracterizado por una vegetación de bosque montano siempre verde con un estrato arbóreo entre 3 a 10 m de altura, con una gran variedad de arbustos y alta densidad de epífitas (Baquero et al., 2004; Bussmann, 2005). Las especies predominantes pertenecen a la familia de las Solanáceas, Melastomatáceas, Rosáceas, Ericáceas, Chlorantáceae, Mirtáceas,

Lauráceas y Podocarpáceas (Robert Hofstede et al., 1998). El páramo caracterizado por una vegetación herbácea predominante de tipo pajonal (*Calamagrostis intermedia*) y almohadilla (*Azorella pedunculata* y *Plantago rigida*) (Luteyn, 1999; Mena & Hofstede, 2006; Ramsay & Oxley, 1997).

El clima del área de estudio está influenciado por el régimen de la costa del Pacífico y las masas de aire provenientes del Atlántico (Buytaert et al. 2006; Vuille, Bradley, & Keimig, 2000). Debido a su posición geográfica, la radiación solar promedio anual es de $14.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a una elevación de 2610 m s.n.m. y de $11.35 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a 3995 m s.n.m. La temperatura promedio varía entre de 12.5 a 6 °C a una elevación entre 2600 y 4200 m s.n.m. (respectivamente) (Córdova et al., 2016). La precipitación promedio anual varía entre 900 a 1600 mm entre 2980 a 4100 m s.n.m. (Crespo et al., 2011), es de tipo bimodal con una época lluviosa en el mes de Diciembre a Enero y una menos lluviosa en los meses de Agosto a Septiembre (Padrón, Wilcox, Crespo, & Céleri, 2015). La variación de la precipitación depende de la elevación (Buytaert et al., 2006; Crespo et al., 2011) y de parámetros topográficos (Huttel, 1997; Hofstede et al., 1998). El material geológico en el sur del Ecuador corresponde principalmente a las formaciones Tarqui, Turi y Saraguro que datan del Mioceno en el periodo Neógeno. Estas formaciones están compuestas por una amplia variedad litológica de rocas andesitas, tobas de flujo de cenizas, flujos piroclásticos y rocas volcánicas (Hungerbuhler et al., 2002).

Los suelos predominantes en el área estudio son de origen volcánico denominados como Andosoles con un rango de profundidad entre 0.12 a >2 m (Buytaert et al., 2007; Poulenard et al., 2003). Estos se distinguen por su horizonte superficial Andico (Ah), el cual se caracteriza por su baja DA (W Buytaert, Sevink, De Leeuw, & Deckers, 2005), alta porosidad (Shoji et al., 1993), alta K_{sat} y su contenido de SOM puede llegar a superar el 40 % (Buytaert et al., 2007; Quichimbo et al., 2012). Debido a ello, este horizonte es de color oscuro con una alta capacidad de retención (Aucapiña & Marín, 2014; Buytaert et al., 2002) y regulación de agua (Mosquera et al., 2016). El uso de los suelos en el área de estudio se da principalmente por dos actividades antrópicas como son: i) La aforestación mediante la plantaciones de pino (*Pinus patula*) (Buytaert, Iñiguez, & De Bièvre, 2007) y ii) El pastoreo de ganado

bovino en pastos establecidos con gramíneas (*Lolium perenne*, *Pennisetum clandestinum* y *Dactylis* sp) y en algunas áreas en pajonal intervenido mediante quema (Harden et al., 2013; Quichimbo et al., 2012).

2.1 Establecimiento de los sitios de estudio

Entre 2640 a 3758 m s.n.m. se seleccionaron 7 sitios de estudio (Figura 1). Los 7 sitios estuvieron ubicados en tres rangos de elevación: i) F1 y F2 ubicados a < 3250 m s.n.m. que corresponden al ecosistema de bosque montano alto, ii) los F3, F4, y Tg5 ubicados entre >3250 a <3550 m s.n.m. correspondientes a zonas de transición entre el bosque montano alto y páramo, y iii) Tg6 y Tg7 ubicados a > 3550 m s.n.m. correspondientes a páramo. Estos sitios fueron seleccionados por tener áreas intervenidas por plantaciones de pino y pastoreo, adyacentes a áreas de cobertura natural no intervenida, con condiciones topográficas y edáficas similares. Fueron consideradas áreas de cobertura natural no intervenida en ecosistemas bosque montano alto (F) a áreas de bosque nativo con especies de crecimiento inclinado acompañado con una alta densidad de epifitas y de musgo; y con una acumulación de hojarasca en el suelo (Baquero et al., 2004). Mientras en el páramo (Tg) se consideró a áreas con pajonal de altura > 50 cm y sin la presencia de plantas indicadores de intervención antrópica como *Lachemilla orbiculata* (Hofstede et al., 1998). Además, mediante entrevistas a los propietarios de los terrenos y visitas en campo se recolectó información de las áreas de las plantaciones de pino y de pastoreo. Por plantación de pino se registró el uso anterior del suelo, manejo y edad de la plantación; y pendiente del terreno. En caso de pastoreo se registró el uso anterior del suelo, labores preculturales y culturales, pendiente del terreno, edad de los pastos, especie de los pastos y carga animal reportada en unidad bovina adulta por hectárea (UBA Ha⁻¹).

Por sitio de estudio se establecieron parcelas en cobertura natural no intervenida, plantación de pino y pastoreo. El número de parcelas fueron 6. La dimensión de cada parcela fue de 24 x 24 m. No fue posible establecer parcelas de pastoreo en F4 por no tener condiciones topográficas similares a la de cobertura natural no intervenida. De cada parcela establecida se registró su ubicación (coordenadas

geográficas y elevación) y pendiente. Además, por cada parcela de pino se determinó la densidad de la parcela es decir el número de árboles por área de la parcela (SD), y de cada árbol se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura (Alt) y el diámetro del dosel (CD). Dichas mediciones fueron realizadas mediante una cinta métrica y un hipsómetro.

2.2 Caracterización de las propiedades de los suelos

La caracterización de las propiedades de los suelos se realizó en dos fases. La primera fase correspondió a la descripción de los perfiles de suelos en las parcelas con cobertura natural no intervenida. En dicha descripción se consideró principalmente el horizonte superficial, cuyas propiedades descritas fueron su espesor, el número de raíces dm^{-2} , estructura y textura al tacto. La descripción fue basada en la guía de la FAO (2006). Durante esta fase, se extrajo una muestra alterada (0.5 kg) de cada horizonte superficial descrito para su análisis físico-químico. Una segunda fase fue llevada a cabo para identificar las diferencias entre sitios con cobertura natural no intervenida y evaluar los impactos de las plantaciones de pino, y de pastoreo sobre las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM. Para ello se consideró las profundidades de 0 – 10 y 10 – 25 cm, las cuáles correspondieron a la zona de mayor densidad de raíces e influencia de las actividades de laboreo en la zona de estudio. En cada parcela de cobertura natural no intervenida y de pastoreo se tomaron aleatoriamente 2 muestras inalteradas en anillos de 100 cm^3 y 1 muestra alterada de 0.5 kg por profundidad. En el caso de las parcelas de pinos, el muestreo se realizó a una distancia de 75 cm y 150 cm desde el tronco del árbol. El árbol seleccionado fue al azar, esto se realizó en 3 árboles por parcela.

En campo, mediante el método de pozo invertido (Oosterbaan & Nijland, 1994) se caracterizó la K_{sat} en todos los puntos que fueron seleccionados para el muestreo en la segunda fase, considerando las mismas profundidades y distancias (en caso de pino).

2.3 Análisis de laboratorio

Las muestras provenientes de la primera fase fueron secadas en el laboratorio a temperatura ambiente ($< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y tamizadas a 2 mm. De dichas muestras se caracterizó el color, pH, y el contenido de SOM. El color de suelo se determinó en húmedo a través de la Tabla de Munsell. El pH se analizó con un potenciómetro con una relación 1:2.5 suelo:agua destilada (FAO/ISRIC, 2002). El contenido de SOM se determinó mediante ignición a 410°C por 16 h (Guo & Gifford, 2002).

Las muestras inalteradas provenientes de la segunda fase se determinó la DA y la capacidad de retención de agua en pF 0 (punto de saturación), pF 0.5, pF 1.5 y pF 2.52 (capacidad de campo), mientras de las muestras alteradas previamente secadas en laboratorio ($< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) y tamizadas a 2 mm se determinó la capacidad de retención de agua en pF 3.4 y pF 4.2 (punto de marchitez); y el contenido de SOM. La DA fue determinada a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas (FAO, 2006). La capacidad de retención de agua en pF 0 se determinó mediante gravimetría luego que las muestras hayan sido saturadas. La capacidad de retención de agua en pF 0.5 y 1.5 fue determinada mediante el uso de cajas de arena (Topp & Zebchuk, 1979), en pF 2.52, 3.4 y 4.2 se utilizaron ollas de presión (FAO/ISRIC, 2002). Los contenidos gravimétricos fueron transformados a contenidos volumétricos. El agua gravitacional y el agua disponible para la planta fue calculado a través de la diferencia entre los contenidos en pF 0 – pF 2.52 y pF 2.52 – pF 4.2, respectivamente. El contenido de SOM fue determinado mediante el mismo método de la primera fase.

2.4 Análisis estadístico

La descripción de las características de las plantaciones y de pastoreo, como también para las propiedades de los suelos en los tres usos del suelo se estimó la mediana y cuartiles (25 % y 75 %), esto fue debido a la falta de normalidad en la mayoría de los datos (test de Shapiro - Wilk, $p < 0.05$).

Para responder a la primera pregunta de investigación sobre ¿Existen relaciones de la elevación con las propiedades de los suelos en condiciones naturales ubicadas en el ecosistema alto Andino y sus diferencias entre sitios como también profundidad de muestreo? Primeramente se realizó un análisis de correlación de Spearman ($p < 0.05$)

entre la elevación con las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad de los suelos bajo cobertura natural no intervenida. Posteriormente se realizaron comparaciones de la propiedades de los suelos a una misma profundidad entre los 7 sitios de estudio mediante el test no paramétrico de Kruskal - Wallis (Kruskal & Wallis, 1952)($p < 0.05$), en caso de identificar diferencias significativas se ejecutó el test de post hoc de Nemenyi (Nemenyi, 1962) ($p < 0.05$) para las comparaciones múltiples por pares. Finalmente, para evaluar las diferencias de las propiedades entre 0 – 10 cm vs 10 – 25 cm de profundidad en cada sitio, se ejecutó el test de U de Mann – Whitney (Mann & Whitney, 1947) ($p < 0.05$).

Para dar respuesta a la segunda pregunta sobre ¿Existen impactos de las plantaciones de pino y de pastoreo en las propiedades de los suelos de los ecosistemas alto Andinos? Para las plantaciones de pino se efectuaron comparaciones entre cobertura natural no intervenida vs plantación de pino. Dichas comparaciones se realizó por sitio de estudio y por profundidad. Previo a las comparaciones de pino, en cada plantación de pino se realizaron comparaciones de las propiedades entre dos distancias del tronco del árbol (i.e. 75 cm vs 150 cm), de no mostrar diferencias significativas estas fueron agrupadas, de igual forma se realizaron comparaciones entre las profundidades de muestreo (0 – 10 cm y 10 – 25 cm). Todas estas comparaciones se efectuaron mediante el test de U de Mann – Whitney ($p < 0.05$). Para una mejor interpretación de los impactos de las plantaciones se analizó la relación de desarrollo de las plantaciones de pino sobre las propiedades de los suelos, el cual fue mediante análisis de correlación de Spearman y regresión lineal ($p < 0.05$). Tales análisis se realizó entre variables de desarrollo del árbol con las propiedades hidrofísicas y con el contenido de SOM tanto a 0 – 10 cm y 10 – 25 cm de profundidad. Las variables que no presentaron normalidad previó al análisis de regresión lineal fueron transformadas a una distribución normal mediante Box-Cox (Sakia, 1992).

Para los impactos de pastoreo a 0 – 10 y 10 - 25 cm de profundidad se realizaron comparaciones entre la cobertura natural no intervenida vs pastoreo por sitio de estudio a una misma profundidad de muestreo. Además en cada sitio de pastoreo se

realizó comparaciones entre las dos profundidades de muestreo. Dichas comparaciones fueron mediante el test de U de Mann – Whitney ($p < 0.05$).

Finalmente, para identificar y visualizar de mejor manera los impactos de las plantaciones de pino y pastoreo se realizaron gráficos de forestplot. Los gráficos fueron en base a las diferencias de las medianas entre las plantaciones de pino (X_{Trat}) vs cobertura natural no intervenida (X_{cn}) (Martín et al., 2016), de igual forma se realizó para pastoreo (X_{Trat}). Dichas diferencias fueron transformadas a porcentaje como se describe en la siguiente formula:

$$\text{Efectos (\%)} = \left[\frac{X_{\text{Trat}} - X_{\text{cn}}}{X_{\text{cn}}} \right] * 100 \quad (\text{Martín et al., 2016}). \quad \textbf{Ecuación 1}$$

El porcentaje positivo representa un incremento en la propiedad a causa de las plantaciones de pino o pastoreo, mientras un porcentaje negativo representa una disminución.

Todos los análisis estadísticos fueron llevados a cabo en el programa R versión 3.3.2 (R Development Core Team, 2016).

3. Resultados

3.1 Propiedades de los suelos en áreas de cobertura natural no intervenida

3.1.1 Características generales

Los suelos bajo cobertura nativa no intervenida fueron caracterizados como Andosoles (>80 %) en la mayoría de los sitios de estudio (F2 – Tg7) a excepción del F1 en dónde fueron caracterizados como Cambisoles. Los suelos con mayor profundidad correspondieron a los sitios del ecosistema de bosque montano alto (0.73 - >2.28 m), mientras los suelos de menor profundidad fueron en páramo (0.46 – 1.67 m).

El horizonte superficial de los Andosoles (Ah) varió entre 20 a 106 cm de espesor, siendo de mayor espesor en bosque montano alto entre 34 a 106 cm en relación al

páramo dónde no superó los 55 cm (Tabla 1). La densidad de raíces en este horizonte fue menor en los sitios de bosque montano alto (10 – 64 raíces dm^{-2}) que en páramo (30 – 200 raíces por dm^{-2}). En los dos ecosistemas, el horizonte Ah se caracterizó por un color negro (10YR 1.7/1 a 7.5YR 1.7/1), con un alto contenido de SOM (11.38 – 42.29 %), con un pH ligeramente ácido a muy ácido (4.89 – 6.32) y su estructura entre bloque a granular (Tabla 1). La textura correspondió a franca a franca arcillosa en los sitios de bosque montano alto y franca a franca limosa en páramo. Por otro lado, los Cambisoles en bosque montano alto estuvieron cubiertos por bosque montano siempre verde, su horizonte superficial (A) se caracterizó por un espesor entre 30 a 50 cm, baja densidad de raíces (8 – 33 raíces dm^{-2}), color parduzco (7.5YR 3/2-10YR 2/2), un menor contenido de SOM (4.58 - 5.64 %) y un pH ácido (4.58 - 5.64). Su textura fue intermedia a fina y con una estructura de tipo bloque a granular (Tabla 1).

Tabla 1. Características morfológicas de los horizontes superficiales de los suelos en áreas de cobertura natural no intervenida (F= Bosque montano alto; Tg= Páramo).

Rango de elevación (m s.n.m.)	Código del sitio	Tipo de horizonte ^a	Espesor del horizonte (cm)	# de raíces dm^{-2}	pH	SOM ^b (%)	Estructura ^c	Textura ^d
<3250	F1	A	36 -50	11-33	4.58-5.64	7.09-14.75	B-Gr	FAc-FAcAr
	F2	Ah	34-106	30-200	4.89-5.72	17.08-39.63	B-Gr	F
>3250 - <3550	F3	Ah	44-82	10-40	5.05-5.23	13.53-16.11	Gr-B	F-FAc
	F4	Ah	50-57	32-64	5.06-5.19	19.58-29.85	Gr-M	FAc
	Tg5	Ah	38-45	50-100	5.69-6.32	20.98-37.50	Gr-B	FL-F
>3550	Tg6	Ah	28-55.5	84->200	5.00-5.49	40.15-42.49	Gr	FAc-FL
	Tg7	Ah	20-38	30-110	5.08-5.82	11.38 -23.71	Gr-M	F-FL

^a A = Horizonte Mólico, Ah = Horizonte Andico.

^b SOM = Contenido de materia orgánica del suelo.

^c Gr = Granular; M = Migajón; B = Bloque.

^d F = Franco, FL = Franco Limoso, FAcL = Franco Arcillo Limoso, FAc = Franco Arcilloso, FAcAr = Franco Arcillo Arenoso, Ac= Arcilloso.

3.1.2 Relaciones de la elevación con las propiedades hidrofísicas y con el contenido de SOM de los suelos

La elevación de los sitios se correlacionó significativamente con las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM (Tabla 2). Las correlaciones más fuertes fueron

encontradas a 0 – 10 cm de profundidad, la elevación principalmente mostró una correlación negativa con la K_{sat} ($r = -0.74$, $p < 0.05$), una correlación positiva con la capacidad de retención de agua en pF 0 a pF 2.52 ($r = 0.66 - 0.71$, $p < 0.05$), y AW ($r = 0.73$, $p < 0.05$). A 10 - 25 cm de profundidad, las correlaciones obtenidas fueron más débiles que a 0 – 10 cm de profundidad, siendo la K_{sat} la propiedad que mostró una mayor correlación con la elevación ($r = -0.66$, $p < 0.05$) (Tabla 2).

Tabla 2. Correlaciones de Spearman entre la elevación con las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM de los suelos a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad en áreas de cobertura natural no intervenidas.

Propiedad	Elevación
K_{sat} 1 (cm h^{-1})	-0.74*
DA 1 (g cm^{-3})	-0.29*
0pF 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.68*
0.5pF 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.66*
1.5pF 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.71*
2.52pF 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.70*
3.4pF 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.08
4.2pF 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.04
GW 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	-0.27*
AG 1 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.73*
SOM 1 (%)	0.32*
K_{sat} 2 (cm h^{-1})	-0.66*
DA 2 (g cm^{-3})	-0.15
0pF 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.34*
0.5pF 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.33*
1.5pF 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.28*
2.52pF 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.23
3.4pF 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	-0.19
4.2pF 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	-0.11
GW 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.11
AW 2 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0.37*
SOM 2(%)	0.2

K_{sat} = Conductividad hidráulica saturada, DA= Densidad aparente; 0 – 4.2 pF= Capacidad de retención en p 0 a pF 4.2; GW= Agua gravitacional; AW= Agua Disponible; SOM= Contenido de materia orgánica de suelo; 1= profundidad de 0 – 10 cm; 2= profundidad de 10 – 25 cm, *= correlaciones significativas ($p < 0.05$).

3.1.3 Diferencias de las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos con cobertura natural no intervenida

Los resultados del test de Kruskal – Wallis ($p < 0.05$) mostraron diferencias significativas entre las propiedades de los sitios de estudio en cada una de las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos analizados (Tabla 3). A 0 -10 cm de profundidad, las diferencias significativas según test de post hoc

de Nemenyi ($p < 0.05$) se dieron entre sitios de diferente ecosistema, principalmente en la K_{sat} , capacidad de retención de agua entre pF 0 a pF 2.52, GW y AW. La K_{sat} en F1 y F3 en bosque montano alto se caracterizaron por tener los valores más altos (12.91 y 17.30 cm h^{-1} , respectivamente) y se diferenciaron significativamente de Tg6 y Tg7 en páramo por su una baja K_{sat} (1.38 y 1.92 cm h^{-1} , respectivamente) (Tabla 3). La capacidad de retención de agua entre pF 0 a pF 2.52 resultó ser menor en F1, F2 y F3 con contenidos de agua no mayor a 0.73 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en pF 0 y 0.52 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en pF 2.52, y se diferenciaron significativamente de Tg6 por su mayor capacidad de retención de agua con un contenido de 0.85 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en pF 0 y 0.66 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ en pF 2.52. El contenido de GW en F2 y F3 fueron los más altos (0.21 y 0.24 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente) y los cuales se diferenciaron significativamente de Tg5 por su menor contenido (0.11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). El contenido de AW en F1 y F2 fueron los más bajos con valores 0.08 y 0.11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ a diferencia de mayor en Tg7 caracterizado por presentar el contenido más alto (0.25 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). En cuanto a la DA, capacidad de retención de agua en pF 3.4 y pF 4.2; y en el contenido de SOM, las diferencias significativas se dieron independientemente del tipo de ecosistema (Tabla 3). Por ejemplo, la capacidad de retención de agua en pF 3.4 y pF 4.2 en Tg6 fue significativamente mayor que en Tg7 pese a estar ubicados en páramo.

A 10 – 25 cm de profundidad, las diferencias entre sitios de estudio fueron menores (Tabla 3). Las diferencias significativas entre sitios de diferente ecosistema se dieron en la K_{sat} , GW y AW (Tabla 3). Los sitios de bosque montano alto presentaron una mayor K_{sat} a diferencias de los sitios de páramo (Tabla 3), las diferencias significativas se observaron en F1 (K_{sat} de 2.98 cm h^{-1}) frente Tg5, Tg6 y Tg7 caracterizados por una menor K_{sat} ($< 0.46 \text{ cm h}^{-1}$). El mayor volumen de GW correspondió a F3 (0.24 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) difiriendo significativamente de Tg5 por su menor volumen de GW (0.11 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). El AW de F1 (0.06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y F3 (0.06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) fueron significativamente menores en relación a los valores Tg5 y Tg6 (0.20 y 0.21 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente). De forma similar a 0 – 10 cm de profundidad, la DA, capacidad de retención de agua en pF 0 a pF 3.4, y SOM de los sitios mostraron diferencias significativas independiente del tipo de ecosistema (Tabla 3). En



contraste, la capacidad de retención de agua en pF 4.2 no mostró diferencias significativas entre los diferentes sitios de estudio.



Tabla 3. Valores de las medianas y entre paréntesis corresponde a los percentiles (25%-75%) de las propiedades hidrofísicas y del contenido de SOM de los suelos en áreas de cobertura natural no intervenidas (F= Bosque montano alto; Tg= Páramo).

Elevación	<3250 m s.n.m.			>3250 - <3550 m s.n.m.		>3550 m s.n.m.	
Propiedades	F1	F2	F3	F4	Tg5	Tg6	Tg7
K _{sat} 1 (cm h ⁻¹)	12.91(9.34-20.55)Aa	4.92(3.34-7.10)Aab	17.30(12.70-19.18)Aa	7.26(5.62-13.08)Aab	3.33(2.47-4.12)Aab	1.38(1.29-1.49)Ab	1.92(1.65-2.82)Ab
DA 1 (g cm ⁻³)	0.97(0.95-1.00)Ba	0.38(0.34-0.55)Ab	0.72(0.67-0.78)Bab	0.67(0.56-0.78)Aab	0.51(0.43-0.64)Aab	0.32(0.29-0.36)Bb	0.60(0.59-0.63)Bab
0pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.65(0.63-0.66)Ab	0.71(0.67-0.73)Ab	0.70(0.68-0.71)Ab	0.72(0.67-0.76)Aab	0.75(0.70-0.79)Aab	0.87(0.85-0.90)Aa	0.73(0.72-0.75)Aab
0.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.64(0.58-0.66)Ab	0.69(0.66-0.72)Ab	0.69(0.67-0.70)Aab	0.70(0.67-0.76)Aab	0.75(0.70-0.79)Aab	0.85(0.83-0.89)Aa	0.72(0.71-0.73)Aab
1.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.54(0.52-0.56)Ab	0.60(0.57-0.64)Ab	0.60(0.57-0.61)Ab	0.65(0.59-0.71)Aab	0.73(0.68-0.77)Aa	0.81(0.77-0.85)Aa	0.66(0.64-0.69)Aab
2.52pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.47(0.46-0.49)Ab	0.49(0.46-0.52)Ab	0.46(0.45-0.47)Ab	0.60(0.50-0.62)Aab	0.64(0.60-0.66)Aa	0.69(0.66-0.72)Aa	0.58(0.55-0.59)Aab
3.4pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.46(0.43-0.46)Aab	0.40(0.39-0.43)Bab	0.37(0.36-0.38)Ab	0.49(0.48-0.53)Aa	0.47(0.46-0.48)Aab	0.55(0.48-0.57)Aa	0.35(0.30-0.39)Ab
4.2pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.40(0.34-0.44)Aab	0.36(0.34-0.40)Bab	0.33(0.32-0.35)Ab	0.47(0.43-0.48)Aa	0.42(0.40-0.45)Aab	0.48(0.46-0.55)Aa	0.33(0.26-0.35)Ab
GW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.17(0.13-0.18)Aab	0.21(0.18-0.25)Aa	0.24(0.23-0.27)Aa	0.14(0.13-0.18)Aab	0.11(0.11-0.12)Ab	0.18(0.18-0.19)Aab	0.17(0.14-0.18)Aab
AW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.08(0.04-0.13)Ab	0.11(0.08-0.15)Ab	0.12(0.11-0.14)Aab	0.14(0.07-0.15)Aab	0.20(0.17-0.25)Aab	0.21(0.16-0.25)Aab	0.25(0.22-0.30)Aa
SOM 1 (%)	10.16(8.24-11.57)Ab	33.69(31.06-37.66)Aa	15.36(13.92-17.38)Aab	25.83(20.64-31.61)Aab	20.57(16.75-29.93)Aab	41.15(29.49-47.22)Aa	15.47(14.95-18.44)Aab
K _{sat} 2 (cm h ⁻¹)	2.98(1.93-4.62)Ba	1.59(0.92-2.07)Bab	1.84(1.80-2.62)Bab	1.44(1.20-2.46)Bab	0.17(0.15-0.18)Bc	0.30(0.29-0.31)Bbc	0.37(0.34-0.46)Bbc
DA 2 (g cm ⁻³)	1.18(1.06-1.25)Aa	0.50(0.41-0.58)Ab	0.92(0.91-0.96)Aa	0.72(0.68-0.80)Aab	0.56(0.51-0.78)Aab	0.43(0.35-0.44)Ab	0.88(0.77-0.94)Aa
0pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.60(0.57-0.62)Bb	0.68(0.64-0.70)Aab	0.62(0.60-0.62)Bb	0.70(0.67-0.73)Aab	0.74(0.69-0.77)Aa	0.82(0.81-0.84)Ba	0.63(0.60-0.67)Ab
0.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.58(0.56-0.60)Ab	0.67(0.63-0.69)Aab	0.61(0.59-0.61)Bb	0.70(0.66-0.73)Aab	0.73(0.68-0.76)Aa	0.82(0.81-0.84)Aa	0.61(0.58-0.64)Bb
1.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.54(0.49-0.57)Ab	0.59(0.57-0.64)Aab	0.52(0.51-0.53)Bb	0.64(0.62-0.67)Aab	0.71(0.65-0.74)Aa	0.78(0.77-0.81)Aa	0.53(0.51-0.59)Bb
2.52pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.49(0.46-0.54)Aab	0.52(0.50-0.57)Aab	0.41(0.39-0.43)Bb	0.57(0.56-0.64)Aab	0.63(0.58-0.66)Aa	0.67(0.66-0.68)Aa	0.46(0.41-0.50)Bb
3.4pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.45(0.44-0.49)Aab	0.47(0.44-0.51)Aab	0.40(0.37-0.40)Aab	0.54(0.48-0.56)Aa	0.48(0.46-0.52)Aab	0.51(0.31-0.57)Aab	0.38(0.34-0.43)Ab
4.2pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.41(0.35-0.42)Aa	0.41(0.40-0.46)Aa	0.35(0.33-0.37)Aa	0.46(0.43-0.53)Aa	0.43(0.38-0.47)Aa	0.48(0.26-0.51)Aa	0.36(0.31-0.39)Aa
GW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.12(0.06-0.16)Aab	0.14(0.11-0.17)Bab	0.20(0.18-0.22)Ba	0.10(0.08-0.17)Aab	0.11(0.10-0.12)Ab	0.15(0.13-0.16)Bab	0.17(0.14-0.20)Aab
AW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.06(0.06-0.08)Ab	0.11(0.08-0.15)Aab	0.06(0.04-0.09)Bb	0.10(0.06-0.14)Aab	0.20(0.16-0.22)Aa	0.21(0.13-0.42)Aa	0.09(0.07-0.13)Bab
SOM 2 (%)	8.00(6.14-8.36)Ab	28.73(26.64-31.39)Ba	13.19(11.35-14.39)Aab	18.98(18.30-22.45)Aab	19.02(11.45-22.50)Aab	36.65(25.19-43.98)Aa	8.83(8.22-10.93)Bb

4. F= Bosque montano alto; Tg= Pajonal en páramo; K_{sat}= Conductividad hidráulica saturada, DA= Densidad aparente; 0 – 4.2 pF= Capacidad de retención en pF 0 a pF 4.2; GW= Agua gravitacional; AW= Agua Disponible; SOM= Contenido de materia orgánica del suelo; 1= profundidad de 0 – 10 cm; 2= profundidad de 10 – 25 cm. Las letras que acompañan a cada valor de la propiedad representan los resultados de las comparaciones estadísticas. Por propiedad: i) Diferentes letras mayúsculas representa las diferencias significativas (p<0.05) entre las dos profundidades en cada sitio de estudio (i.e., 0 – 10 cm versus 10 – 25 cm), ii) Diferentes letras minúsculas representa diferencias significativas (p<0.05) entre sitios a una misma profundidad, iii) Combinación de letras minúsculas representan grupos intermedios entre dos rangos. El orden de denotación de la letra se utilizó de mayor a menor valor.

Por otra parte, en cada sitio de estudio las propiedades como la K_{sat} , capacidad de retención de agua en pF 0 a pF 2.52, GW, AW y SOM a 0 – 10 cm de profundidad presentaron valores más altos a diferencia de 10 – 25 cm de profundidad, a excepción de la DA que incrementó (Tabla 3). Según el test de U de Mann – Whitney ($p < 0.05$), la K_{sat} se diferenció significativamente entre las dos profundidades en cada sitio de estudio (Tabla 3). De igual manera, la DA incrementó significativamente en la segunda profundidad en F1, F3, Tg6 y Tg7. La capacidad de retención de agua en pF 0 fue mayor a 0 – 10 cm de profundidad, y tendió a disminuir significativamente a 10 – 25 cm de profundidad en los sitios F1, F3, Tg6 (Tabla 3).

3.2 Caracterización de las plantaciones de pino y del pastoreo

El establecimiento y el manejo de las plantaciones de pino fueron particulares en la mayoría de los sitios. Las características generales de las plantaciones de pino en el área de estudio se presentan en la Tabla 4. Las plantaciones F1Pi, F2Pi y Tg6Pi fueron establecidas en sitios cuyo uso anterior del suelo fue cobertura nativa. La pendiente del terreno de estos tres sitios fueron 43, 20 y 22 %, respectivamente. Las plantaciones en F3Pi, F4Pi, Tg5Pi, y Tg7Pi fueron establecidas en sitios con usos anteriores de pastoreo extensivo por más de 5 años con una carga animal < 1 UBA Ha^{-1} . Estas plantaciones presentaron pendientes del terreno de 12, 16, 34 y 20 % (respectivamente). La edad de la mayoría de las plantaciones varió entre 16 - 19 años de edad, con excepción de F1Pi y Tg5Pi las cuales presentaron una mayor edad (20 – 29 años). La SD de las plantaciones varió entre 30 – 49 árboles en 576 m^2 . Las plantaciones F1Pi, Tg6Pi y Tg7Pi fueron de menor SD (30 – 34 árboles en 576 m^2), las plantaciones F2Pi, F3Pi, F4Pi y Tg5Pi tuvieron un mayor SD (40 – 49 árboles en 576 m^2) (Tabla 4). El desarrollo de los árboles fue mayor en F1Pi, F2Pi, F3Pi y F4Pi con un DAP > 18 cm, una Alt > 9 m y un CD ≥ 5 m. El desarrollo fue menor para las plantaciones Tg5Pi, Tg6Pi, y Tg7Pi con un DAP < 18 cm, una Alt < 8.5 m y un CD < 5 m. En general el manejo de las plantaciones fue deficiente debido a los altos costos. Las plantaciones F1Pi, F2Pi, Tg5Pi y Tg7Pi no tuvieron ningún tipo de manejo, mientras que F3Pi, F4Pi y Tg6Pi tuvieron una poda en toda la plantación.

Tabla 4. Descripción general y medianas de las variables dendrométricas de las plantaciones de pinos en los sitios de estudio.

Rango de elevación (m s.n.m.)	Código	Elevación (m s.n.m.)	Uso anterior del suelo	Pend (%)	Edad (Años)	SD (# de árboles/parcela)	DAP (cm)	Alt (m)	CD (m)	Manejo de la plantación
<3250	F1Pi	2770	Bosque nativo	43	29	34	25.6	19.4	5.1	Ningún
	F2Pi	3260	Bosque nativo	20	18	40	20.2	11.3	5.2	Ningún
>3250 - <3550	F3Pi	3359	Pajonal bajo pastoreo de equinos	12	17	49	18.4	8.8	5.15	Poda
	F4Pi	3408	Pajonal bajo pastoreo de bovinos	16	16	41	23.1	9.2	5	Poda
	Tg5Pi	3485	Suelos bajo pastoreo extensivo de bovinos en pajonal quemado	34	21	47	16.8	8.3	3.88	Ningún
	Tg6Pi	3692	Pajonal nativo	22	19	33	8.75	4.45	1.58	Poda
>3550	Tg7Pi	3724	Suelo compactado y erosionado por pastoreo de bovinos en pajonal quemado	20	17.5	30	11.99	5	2.99	Ningún

FPI= Plantación de pino en bosque montano alto, TgPi= Plantación de pino en páramo, 1= Sitio 1, Pend= Pendiente, SD= número de árboles por parcela de 576 m², DAP= Diámetro a la altura del pecho del árbol, Alt= Altura del árbol, CD= Diámetro del dosel del árbol.

El pastoreo en el área de estudio se da principalmente por la crianza de ganado bovino. Las descripciones generales de la actividad de pastoreo por sitio se muestran en la Tabla 5. Por lo general, el pastoreo en el área ocurrió en sitios establecidos con pastos introducidos (G) (F1G, F2G, F3G, Tg6G, y Tg7G). En Tg5G* el pastoreo se desarrolló bajo cobertura nativa de tipo pajonal (G*). En todos los casos, el uso anterior del suelo fue vegetación nativa. Las labores preculturales y culturales de manejo fueron distintas en cada uno de los sitios (Tabla 5). El tiempo de establecimiento de los pastos fue mayor a 10 años en F1G y F2G, a diferencias de F3G, Tg6G y Tg7G que fue menor (entre 3 a 7 años). En Tg5G*, el tiempo de renovación del pajonal fue < 3 años mediante quema. En los sitios Tg5G*, Tg6G y Tg7G el pastoreo fue extensivo con una carga animal entre 0.5 - < 0.2 UBA Ha⁻¹, mientras en F1G, F2G y F3G que se caracterizaron como pastoreo intensivo debido a la carga animal entre 1 - 2 UBA Ha⁻¹.

Tabla 5. Descripción de los sitios de pastoreo en el área de estudio.

Rango de elevación (m s.n.m.)	Código	Elevación (m s.n.m.)	Uso anterior	Labores preculturales y culturales	Edad de los pastos	Pasto	Carga animal (UBA Ha ⁻¹)
<3250	F1G	2836	Bosque nativo	Preparación mediante arado, encalado, fertilización orgánica.	>10	<i>Pennisetum clandestinum</i>	1
	F2G	3211	Bosque nativo	Preparación mediante arado, fertilización orgánica e inorgánica y riego, rotación de los pastos	>10	<i>Dactylis</i> sp., <i>Trifolium</i> sp. y <i>Lolium</i> sp.	2
>3250 - <3550	F3G	3330	Bosque nativo	Tala y quema del bosque, la preparación del suelo fue mediante arado de discos	3	<i>Dactylis</i> sp. y <i>Pennisetum clandestinum</i>	1
	Tg5G*	3477	Pajonal	Quema de pajonal	<3	<i>Calamagrostis intermedia</i>	<0.2
>3550	Tg6G	3628	Pajonal	Limpieza de la cobertura vegetal, preparación de terreno mediante arado y fertilización con gallinaza	5	<i>Lolium</i> sp.	0.5
	Tg7G	3755	Pajonal	Preparación del terreno mediante rastra, incorporación del material vegetal en el suelo.	7	<i>Lolium</i> sp. y <i>Dactylis</i> sp.	0.4

FG= Pastoreo en bosque montano alto, TgG= Pastoreo en páramo, TgG*=Pastoreo en pajonal intervenido por quema, UBA Ha⁻¹= Unidad bovina adulta por ha y por año.

3.3 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo las plantaciones de pino

Las propiedades entre 0 – 10 vs 10 – 25 cm de profundidad en cada una de las plantaciones de pino presentaron diferencias significativas según el test de U de Mann – Whitney ($p < 0.05$) (Tabla 6). Por lo tanto, los impactos de las plantaciones de pino fueron evaluados a ambas profundidades. Por otra parte, no se evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) de las propiedades entre las distancias de muestreo a 75 y 150 cm de los árboles en cada una de las plantaciones de pino (Anexo 1). Esto sugiere que el muestreo pudo haberse realizado en cualquiera de estas dos distancias. Por ello, los valores de las propiedades entre 75 y 150 cm de distancia fueron agrupadas por profundidad en cada plantación de pino para evaluar los impactos las plantaciones de pino.

Las comparaciones de las propiedades de las plantaciones de pino frente a las coberturas naturales no intervenidas revelaron cambios significativos en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad (Tabla 6). Se observaron mayores cambios a 0 – 10 cm de profundidad (Tabla 6). A 0 – 10 cm de profundidad, la K_{sat} disminuyó significativamente en las



plantaciones F1Pi y F3Pi (61.72 y 79.06 %, respectivamente) las cuales estuvieron ubicadas en el ecosistema bosque montano alto. En las plantaciones ubicadas en el páramo, la K_{sat} incrementó significativamente en dos de las tres plantaciones (Tg5Pi y Tg6Pi) con un incremento del 25.23 y 59.22 %, respectivamente (Tabla 6 y Figura 2a). La DA no mostró cambios significativos en la mayoría de los sitios con excepción de F3Pi que incrementó significativamente en un 18.42 % (Figura 2b).



Tabla 6. Valores de las medianas y entre paréntesis corresponde a los percentiles (25 %-75 %) de las propiedades hidrofísicas y del contenido de SOM de los suelos en condiciones alteradas bajo las plantaciones de pino.

Elevación	<3250 m s.n.m.			>3250 - <3550 m s.n.m.		>3550 m s.n.m.	
Propiedades	F1Pi	F2Pi	F3Pi	F4Pi	Tg5Pi	Tg6Pi	Tg7Pi
K _{sat} 1 (cm h ⁻¹)	4.94(4.32-6.41)A↓	4.52(3.25-6.22)A	3.62(2.99-4.30)A↓	6.59(4.45-9.06)A	4.17(3.38-6.53)A↑	2.19(1.92-2.55)A↑	2.46(1.85-3.14)A
DA 1 (g cm ⁻³)	0.99(0.91-1.07)B	0.44(0.42-0.50) A	0.86(0.81-0.91)B↑	0.55(0.50-0.66)A	0.52(0.45-0.67)B	0.32(0.29-0.37)B	0.62(0.55-0.71)B
0pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.61(0.58-0.64)A↓	0.75(0.73-0.78) A ↑	0.63(0.61-0.67)A↓	0.75(0.70-0.77)A	0.77(0.73-0.79)A	0.85(0.83-0.86)A↓	0.71(0.68-0.73)A↓
0.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.59(0.56-0.62)A↓	0.73(0.71-0.75) A ↑	0.62(0.60-0.66)A↓	0.72(0.69-0.75)A	0.76(0.72-0.79)A	0.83(0.82-0.83)A↓	0.70(0.67-0.72)A↓
1.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.50(0.48-0.52)A↓	0.61(0.58-0.64)B	0.50(0.48-0.53)A↓	0.63(0.59-0.64)B	0.71(0.66-0.75)A	0.76(0.74-0.78)A↓	0.65(0.61-0.69)A
2.52pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.41(0.39-0.43)A↓	0.52(0.49-0.55)B↑	0.41(0.39-0.42)A↓	0.55(0.52-0.56)B	0.62(0.58-0.66)A	0.61(0.59-0.63)B↓	0.52(0.49-0.57)A↓
3.4pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.37(0.35-0.39)A↓	0.43(0.38-0.46)B	0.37(0.35-0.38)A	0.43(0.41-0.46)B↓	0.46(0.43-0.49)A	0.42(0.40-0.44)B↓	0.47(0.43-0.50)A↑
4.2pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.33(0.29-0.35)A↓	0.39(0.35-0.43)A	0.33(0.30-0.35)A	0.37(0.35-0.39)B↓	0.42(0.40-0.45)A	0.40(0.36-0.41)B↓	0.43(0.38-0.47)A↑
GW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.21(0.17-0.23)A	0.22(0.19-0.26)A	0.25(0.22-0.26)A	0.20(0.15-0.25)A↑	0.13(0.11-0.16)A↑	0.24(0.21-0.26)B↑	0.17(0.14-0.21)A
AW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.08(0.05-0.11)A	0.13(0.10-0.18)A	0.07(0.05-0.08)A↓	0.16(0.14-0.20)A	0.20(0.16-0.23)A	0.23(0.19-0.24)A	0.10(0.07-0.13)A↓
SOM 1 (%)	5.29(4.36-5.34)A↓	23.92(23.44-29.71)A↓	10.91(8.32-12.84)A↓	27.57(25.59-29.06)A	24.98(16.62-28.94)A	34.70(31.33-35.16)A	20.87(19.64-27.82)A↑
K _{sat} 2 (cm h ⁻¹)	5.50(4.12-6.82)A↑	2.07(1.58-2.82)B↑	0.87(0.76-0.98)B↓	1.60(1.04-2.25)B	0.70(0.38-1.14)B↑	0.29(0.16-0.38)B	0.89(0.55-1.20)B↑
DA 2 (g cm ⁻³)	1.17(1.02-1.32)A	0.46(0.43-0.51)A	1.01(0.94-1.09)A↑	0.62(0.53-0.81)A	0.58(0.49-0.72)A	0.42(0.39-0.44)A	0.71(0.62-0.85)A↓
0pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.53(0.49-0.59)B↓	0.74(0.71-0.76)A↑	0.58(0.55-0.62)B	0.73(0.66-0.75)A	0.75(0.71-0.78)A	0.81(0.80-0.83)B	0.67(0.63-0.70)B↑
0.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.52(0.47-0.56)B↓	0.71(0.69-0.74)A↑	0.58(0.55-0.61)B	0.72(0.65-0.74)A	0.75(0.71-0.77)A	0.80(0.78-0.82)B	0.67(0.62-0.69) B↑
1.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.45(0.41-0.48)B↓	0.65(0.63-0.68)A↑	0.50(0.48-0.53)A	0.68(0.62-0.70)A	0.72(0.67-0.75)A	0.77(0.75-0.79)A	0.62(0.58-0.66)A↑
2.52pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.40(0.34-0.42)A↓	0.57(0.55-0.60)A↑	0.38(0.36-0.40)B↑	0.58(0.55-0.63)B	0.64(0.58-0.67)A	0.66(0.64-0.67)A↑	0.49(0.45-0.52)B
3.4pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.37(0.33-0.40)A↓	0.47(0.44-0.50)A	0.36(0.35-0.39)A↓	0.49(0.46-0.52)B	0.47(0.45-0.49)A	0.46(0.44-0.48)A	0.45(0.42-0.48)B↑
4.2pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.33(0.29-0.34)A↓	0.41(0.38-0.44)A	0.33(0.30-0.35)A	0.40(0.38-0.43)A↓	0.42(0.38-0.45)A	0.42(0.40-0.44)A	0.41(0.37-0.44)A↑
GW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.15(0.13-0.18)B	0.17(0.15-0.19)B	0.21(0.17-0.23)B	0.13(0.11-0.15)B	0.11(0.10-0.12)B	0.16(0.15-0.17)A	0.18(0.15-0.20)A
AW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.07(0.04-0.08)A	0.16(0.12-0.21)A↑	0.05(0.03-0.07)B	0.18(0.15-0.22)A↑	0.21(0.17-0.25)A	0.24(0.21-0.27)A	0.07(0.04-0.11)B
SOM 2 (%)	3.56(3.32-4.95)B↓	26.05(25.84-26.71)A↓	10.09(9.06-10.52)A↓	17.82(15.73-22.15)B	21.05(13.42-23.64)B	29.41(26.82-38.63)A	15.68(11.34-21.40)B↑

FPI= Plantación de pino en bosque montano alto, TgPi= Plantación de pino en páramo. Los nombres de las variables se encuentran definidos en la Tabla 3. Las letras que acompañan a cada valor de la propiedad representan los resultados de las comparaciones estadísticas. Por propiedad, diferentes letras mayúsculas representa las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre profundidad en cada sitio de estudio. El orden de denotación de la letra se utilizó de mayor a menor valor. ↓ o ↑ = Disminución o incremento significativo (valor $p < 0.05$) al comparar la plantación nativa vs la cobertura natural no intervenida.

A 0 – 10 cm de profundidad, la capacidad de retención de agua en pF 0 de F1Pi, F3Pi, Tg6Pi y Tg7Pi disminuyó significativamente con un cambio entre un 2.53 – 11.10 %, mientras en F2Pi hubo un incremento significativo del 6.30 % (Figura 2c). La tendencia de los cambios en la capacidad de retención de agua en pF 0.5 a 2.52 (Anexo 2 y Figura 2d) fueron similares a los de pF 0 en la mayoría de las plantaciones donde se observaron cambios significativos. La capacidad de retención en pF 3.4 (Anexo 2) y pF 4.2 (Figura 2e) disminuyó significativamente entre 12.21 – 27.52 % en los sitios de F1Pi, F4Pi, y Tg6Pi, a diferencia de Tg7Pi donde incrementó significativamente entre un 15.54 – 44.31 %. El GW en F4Pi, Tg5Pi y Tg6Pi incrementó significativamente (13.15 – 39.37 %) (Anexo 2). El AW disminuyó significativamente en F3Pi y Tg7Pi, tales reducciones fueron del 42.50 y 57.64 %, respectivamente (Anexo 2). El contenido de SOM en F1Pi, F2Pi y F3Pi disminuyó significativamente entre un 28.97, 29.00 y 47.90 %, respectivamente (Figura 2f).

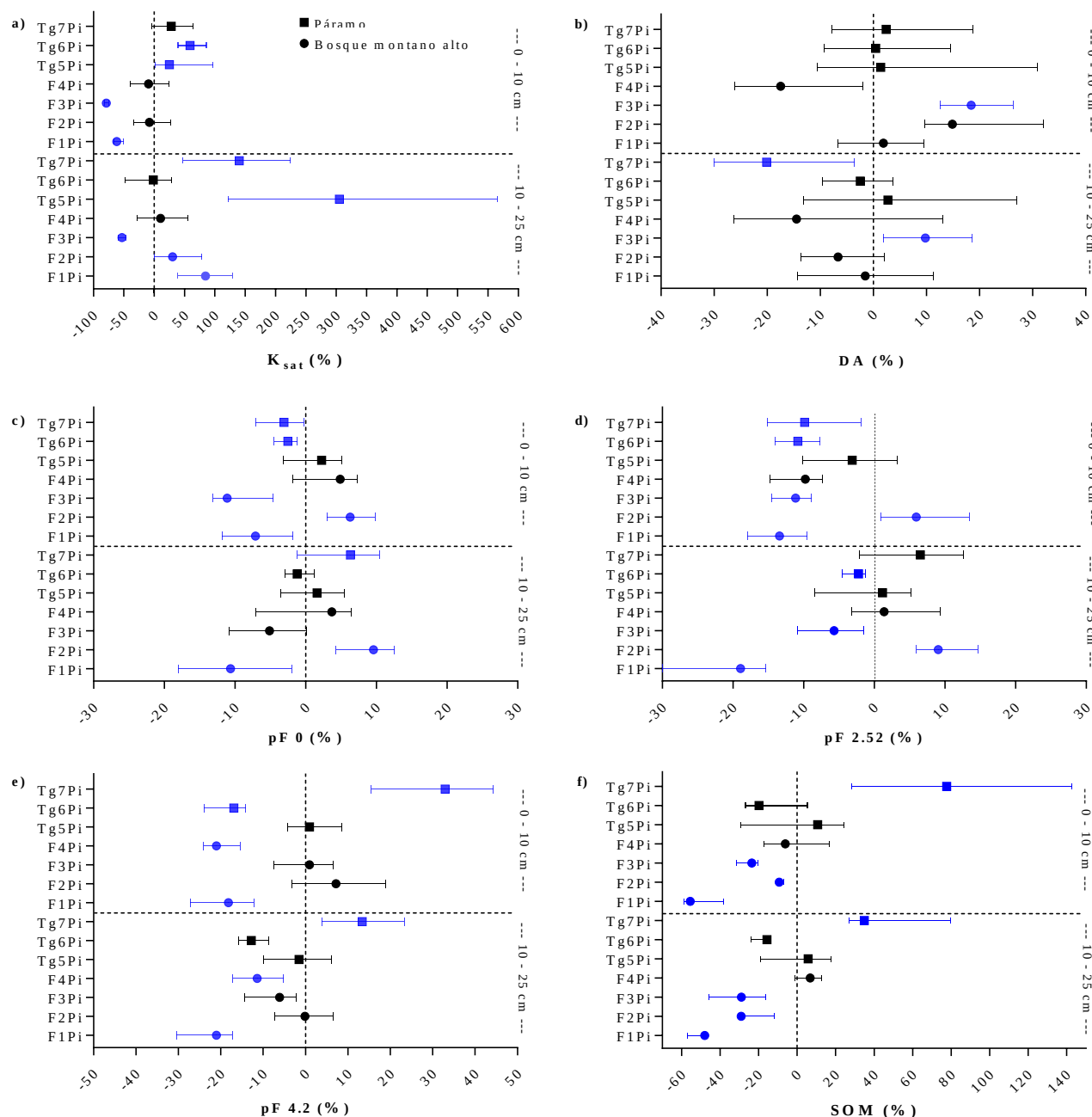


Figura 2. Forestplots del cambio porcentual en las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM (incremento o disminución) del horizonte superficial de los suelos a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad debido a las plantaciones de pino en relación a las propiedades de los suelos bajo vegetación nativa en los sitios de estudio. FPi= Plantación de pino en bosque montano alto, TgPi= Plantación de pino en páramo. Los nombres de las variables se encuentran definidos en la Tabla 3. De color azul representa un cambio significativo ($p < 0.05$) en cada una de las variables.

A 10 – 25 cm de profundidad, la K_{sat} en F1Pi, F2Pi, Tg5Pi y Tg6Pi incrementó significativamente en 84.64, 30.28, 305.24 y 140 %, respectivamente, mientras que F3Pi la K_{sat} disminuyó significativamente en un 52.98 % (Figura 2a). La DA en F3Pi incrementó significativamente en 9.81 % al contrario de Tg7Pi donde presentó una disminución significativa de 2.47 % (Figura 2b). La capacidad de retención de agua en pF_0 en F1Pi disminuyó significativamente en un 10.62 %, a diferencia de F2Pi y Tg7Pi donde existió un

incremento significativo de la capacidad de retención de agua en un 9.60 y 6.32 %, respectivamente (Figura 2c). Resultados similares se obtuvieron para la capacidad de retención de agua en pF 0.5 a pF 1.5 (Anexo 2). En pF 2.52, la capacidad de retención de agua en F1Pi, F3Pi y Tg6Pi disminuyó significativamente en un 18.92 %, 5.68 y 2.2 % (respectivamente), no obstante en F2Pi se evidenció un incremento del 9.06 % (Tabla 6 y Figura 2d). La capacidad de retención en pF 3.4 (Anexo 2) y pF 4.2 en F1Pi y F4Pi (Figura 2e) disminuyeron significativamente entre un 2.62 – 30.35 %, a diferencia de Tg7Pi donde incrementó en 3.90 – 25.56 %. El GW no mostró cambios significativos en ningún de las plantaciones (Tabla 6). El AW en las plantaciones F2Pi y F4Pi mostró un incremento significativo del 51.55 y 79 % (respectivamente). El contenido de SOM en F1Pi, F2Pi y F3Pi disminuyó significativamente en un 55.50, 9.32 y 23.50 % (respectivamente), a diferencia de Tg7Pi donde hubo un incremento significativo del 77.62 % (Figura 2f).

3.4. Influencia del desarrollo de las plantaciones de pino en las propiedades hidrofísicas y en contenido de SOM del suelo

En la Figura 3a se muestran las correlaciones de Spearman de las variables del desarrollo de los árboles de las plantaciones de pino con las propiedades hidrofísicas y con el contenido de SOM de los suelos a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad. Las propiedades en su mayoría estuvieron significativamente correlacionadas con DAP, Alt y CD de los árboles (Figura 3a). La K_{sat} a 0 – 10 cm y 10 – 25 cm profundidad presentaron las correlaciones más fuertes con las variables de desarrollo de los árboles ($r = >0.65$, $p < 0.05$). En las Figura 3b y 3c se presenta la relación entre la K_{sat} con la Alt del árbol tanto a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad, respectivamente. Estas variables estuvieron positivamente correlacionadas ($r = 0.69$ – 0.71 , $p < 0.05$), es decir con el incremento de la Alt de los árboles se da un incremento en la K_{sat} . De la misma forma, la DA en las dos profundidades también estuvo correlacionada positivamente con las variables de desarrollo ($r = >0.31$, $p < 0.05$). Es decir, a mayor crecimiento de los árboles se da un incremento significativo de DA del suelo. Por otro lado, la capacidad de retención de agua y los contenidos de SOM se correlacionaron negativamente con las variables de desarrollo de los árboles ($r = >0.31$, $p < 0.05$) (Figura 3a). Es decir la capacidad de retención de agua y el contenido de SOM tanto a 0 – 10 cm como 10 – 25 cm de profundidad disminuyen significativamente con el desarrollo de los árboles.

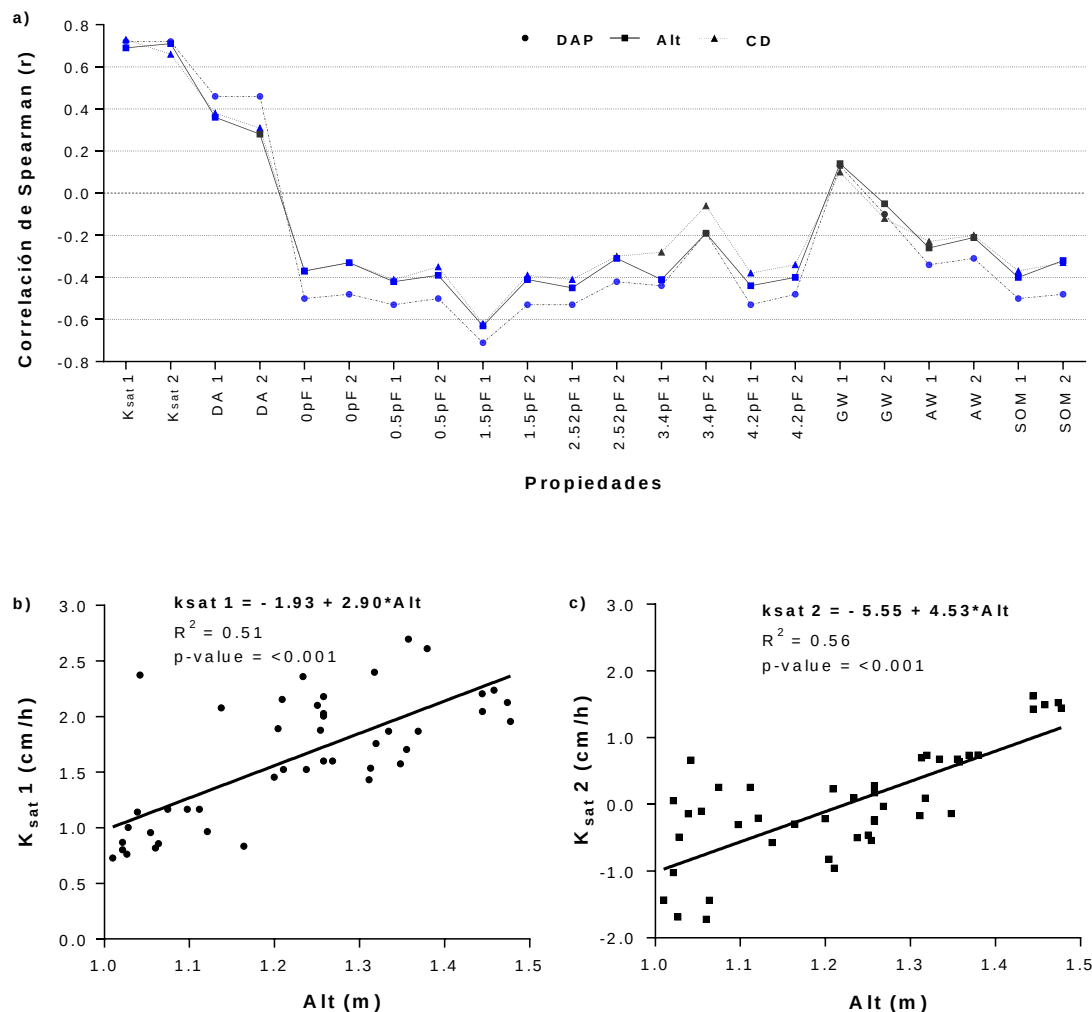


Figura 3. Figura 3a) Indican los coeficientes de correlación entre la diámetro altura al pecho (DAP), altura (Alt) y diámetro del dosel (CD) del árbol con las propiedades hidrofísicas y SOM. Los símbolos de color azul indican correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) y los de color negro indican correlaciones no significativas. Los nombres de las variables en la Figura 3a) se encuentran definidos en la Tabla 3. En la Figura 3b) indican la relación entre la Alt del árbol con la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) a 0 – 10 cm de profundidad y la Figura 3c) Indican la relación entre la Alt con la K_{sat} a 10 – 25 cm de profundidad.

3.5 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo pastoreo

El test de U de Mann – Whitney ($p < 0.05$) evidenció cambios significativos en las propiedades hidrofísicas de los suelos por pastoreo, dándose principalmente en la K_{sat} y la capacidad de retención de agua (Tabla 7). Mayor fue el número de sitios con cambios significativos en la profundidad de 0 – 10 cm que a 10 – 25 cm (Tabla 7 y Figura 4).

A la profundidad de 0 – 10 cm, la K_{sat} en F1G y Tg5G* disminuyó significativamente en un 68.87 y 75.75 %, respectivamente, mientras que en Tg6G se observó un incremento significativo del 55.19 % (Figura 4a). En cuanto a la DA en F2G y F3G hubo un incremento significativo del 64.29 y 28.25 %, respectivamente (Figura 4b). La capacidad de retención de agua en pF 0 en F3G y Tg6G disminuyó significativamente con un valor del 10.10 y 5.18 % (respectivamente), mientras que en Tg5G* incrementó significativamente en un 8.97 % (Figura 4c). Los cambios en la capacidad de retención de agua en pF 0.5 y pF 1.5 fueron similares a los de pF 0 (Anexo 3 y Figura 4c). La capacidad de retención de agua en pF 2.52 disminuyó significativamente en F3G, Tg6G y Tg7G con disminuciones porcentuales del 13.11, 8.61 y 9.77 %, respectivamente. En contraste, en F2G se observó un incremento significativo de 10.46 % (Figura 4d). La capacidad de retención en pF 3.4 incrementó significativamente en F2G, Tg5G* y Tg7G con un valor del 17.38, 6.15 y 20.46 % (respectivamente), a diferencia de F3G que disminuyó un 7.36 % (respectivamente). Los cambios en pF 4.2 fueron similares a los de pF 3.4 (Figura 4e) en los sitios con cambios significativos con excepción de F3G (Figura 4e). Los cambios en GW (Anexo 3) se dieron en Tg6G y Tg7G con un incremento de 10.59 y 36.12 %, respectivamente. El AW (Anexo 3) y el contenido de SOM (Figura 4f) no mostraron cambios significativos en la mayoría de los sitios de estudio, con excepción del contenido de SOM en F3G donde se evidenció una disminución significativa de 30.47 %.



Tabla 7. Valores de las medianas y entre paréntesis corresponde a los percentiles (25 % - 75 %) de las propiedades hidrofísicas y del contenido de SOM de los suelos bajo pastoreo.

Elevación	<3250 m s.n.m.		>3250 - <3550 m s.n.m.		>3550 m s.n.m.	
Propiedades	F1G	F2G	F3G	Tg5G*	Tg6G	Tg7G
K _{sat} 1 (cm h ⁻¹)	4.02(2.67-4.38)A↓	3.92(3.61-8.36)A	16.58(6.99-19.20)A	0.81(0.52-0.96)A↓	2.14(1.77-2.40)A↑	2.91(1.65-4.80)A
DA 1 (g cm ⁻³)	0.97(0.92-1.04)A	0.62(0.56-0.69)A↑	0.93(0.89-0.93)A↑	0.44(0.43-0.55)A	0.41(0.37-0.46)A	0.54(0.51-0.62)B
OpF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.64(0.63-0.64)A	0.72(0.69-0.75)A	0.63(0.61-0.65)A↓	0.82(0.79-0.84)A↑	0.82(0.80-0.84)A↓	0.75(0.72-0.77)A
0.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.63(0.63-0.64)A	0.71(0.69-0.74)A	0.61(0.59-0.63)A↓	0.81(0.78-0.83)A↑	0.81(0.78-0.84)A↓	0.74(0.72-0.76)A
1.5pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.55(0.54-56)A	0.65(0.64-0.70)A↑	0.50(0.47-0.55)A↓	0.79(0.74-0.80)A↑	0.76(0.71-0.77)A↓	0.70(0.67-0.70)A
2.52pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.48(0.45-0.49)A	0.54(0.48-0.58)B	0.40(0.37-0.40)A↓	0.68(0.65-0.70)A↑	0.63(0.60-0.64)A↓	0.52(0.51-0.55)A↓
3.4pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.44(0.43-0.45)A	0.47(0.45-0.53)B↑	0.35(0.33-0.35)A↓	0.50(0.44-0.60)A	0.43(0.40-0.45)A↓	0.42(0.40-0.45)A↑
4.2pF 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.40(0.37-0.43)A	0.44(0.41-0.46)A↑	0.30(0.27-0.33)A	0.42(0.41-0.55)A	0.41(0.38-0.43)A↓	0.37(0.35-0.41)A↑
GW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.16(0.15-0.19)A	0.19(0.15-0.22)A	0.24(0.20-0.28)A	0.13(0.12-0.14)A	0.20(0.19-0.20)A↑	0.23(0.18-0.25)A↑
AW 1 (cm ³ cm ⁻³)	0.06(0.05-0.10)A	0.08(0.07-0.14)A	0.09(0.07-0.11)A	0.23(0.16-0.26)A	0.21(0.19-0.22)A	0.14(0.10-0.18)A↓
SOM 1 (%)	7.94(7.14-8.72)A	20.11(18.31-33.54)A	10.68(10.19-12.00)A↓	25.98(17.67-30.03)A	36.35(30.74-46.42)A	21.79(18.14-28.58)A
K _{sat} 2 (cm h ⁻¹)	0.86(0.32-1.27)B↓	1.72(1.17-2.19)B	22.50(12.93-31.70)A↑	0.22(0.11-0.26)B	0.66(0.47-0.73)A↑	0.60(0.41-1.24)B↑
DA 2 (g cm ⁻³)	1.11(0.98-1.13)A	0.58(0.48-0.66)A	0.89(0.86-0.92)A	0.56(0.51-0.58)A	0.52(0.40-0.61)A	0.72(0.63-0.80)A↓
OpF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.59(0.56-0.60)B	0.75(0.72-0.78)A↑	0.62(0.60-0.63)A	0.77(0.76-0.79)A↑	0.78(0.76-0.82)A	0.69(0.64-0.72)B↑
0.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.59(0.56-0.59)B	0.75(0.72-0.77)A↑	0.59(0.58-0.61)A	0.77(0.76-0.78)A↑	0.77(0.75-0.81)A	0.69(0.63-0.71)B↑
1.5pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.49(0.49-0.53)B	0.70(0.63-0.73)A↑	0.46(0.45-0.50)A↓	0.75(0.74-0.76)A↑	0.72(0.71-0.78)A	0.64(0.55-0.67)B↑
2.52pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.42(0.40-0.47)A	0.62(0.53-0.66)A↑	0.37(0.35-0.40)A	0.67(0.66-0.68)A↑	0.63(0.62-0.68)A	0.48(0.43-0.53)B
3.4pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.41(0.39-0.45)A	0.53(0.49-0.60)A↑	0.34(0.34-0.37)A↓	0.49(0.47-0.52)A	0.48(0.41-0.52)A	0.39(0.33-0.42)A
4.2pF 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.38(0.38-0.40)A	0.48(0.39-0.52)A	0.31(0.30-0.32)A↓	0.45(0.41-0.47)A	0.44(0.39-0.48)A	0.37(0.31-0.39)A
GW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.15(0.14-0.19)A	0.11(0.09-0.18)B	0.25(0.22-0.28)A	0.11(0.10-0.11)B	0.14(0.13-0.17)B	0.20(0.16-0.22)A
AW 2 (cm ³ cm ⁻³)	0.04(0.04-0.06)A	0.13(0.11-0.17)A	0.06(0.05-0.09)A	0.22(0.18-0.24)A	0.20(0.16-0.22)A	0.15(0.09-0.18)A
SOM 2 (%)	6.98(5.13-7.84)A	17.66(16.85-28.56)A	10.14(9.85-11.24)A	20.71(18.85-24.95)A	27.74(20.63-40.71)A	16.08(11.24-22.40)A

FG= Pastoreo en bosque montano alto, TgG= Pastoreo en páramo, TgG*=Pastoreo en pajonal intervenido por quema. Los nombres de las variables se encuentran definidos en la Tabla 3. Las letras que acompañan a cada valor de la propiedad representan los resultados de las comparaciones estadísticas: Diferentes letras mayúsculas representa las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre profundidad en cada sitio de estudio. El orden de denotación de la letra se utilizó de mayor a menor valor. ↓ o ↑= Disminución o incremento significativo (valor $p < 0.05$) al comparar la plantación nativa vs la cobertura natural
no intervenida.



A la profundidad de 10 – 25 cm, la K_{sat} en F1G disminuyó significativamente en un 71.01 %, a diferencia de F3G, Tg6G y Tg7G donde hubo un incremento del 1120.92, 121.28 y 61.35 %, respectivamente (Figura 4a). La DA no mostró cambios significativos en todos los sitios de pastoreo a excepción de Tg7G donde disminuyó significativamente en un 18.63 % (Figura 4b). La capacidad de retención de agua en pF 0 en F2G, Tg5G* y Tg7G incrementó significativamente en 10.71, 4.67 y 9.57 %, respectivamente (Figura 4c). En estos sitios, la tendencia de los cambios en la capacidad de retención de agua en pF 0.5 y pF 1.5 fueron similares a los de pF 0 (Anexo 3). En pF 2.52, la capacidad de retención de agua en F2G y Tg5G* incrementó significativamente en 19.17 y 5.92 %, respectivamente (Figura 4d). En pF 3.4, la capacidad de retención de agua en F2G incrementó significativamente en un 12.92 %, a diferencia de F3G donde se evidenció una disminución significativa de 13.78 % (Anexo 3). En pF 4.2, la mayoría de los sitios no mostraron cambios significativos en la capacidad de retención con excepción de F3G, donde hubo una disminución significativa de 12.06 % (Figura 4e). Finalmente, el GW, AW y los contenidos de SOM no mostraron cambios significativos en todos los sitios de estudio (Tabla 7 y Figura 4f).

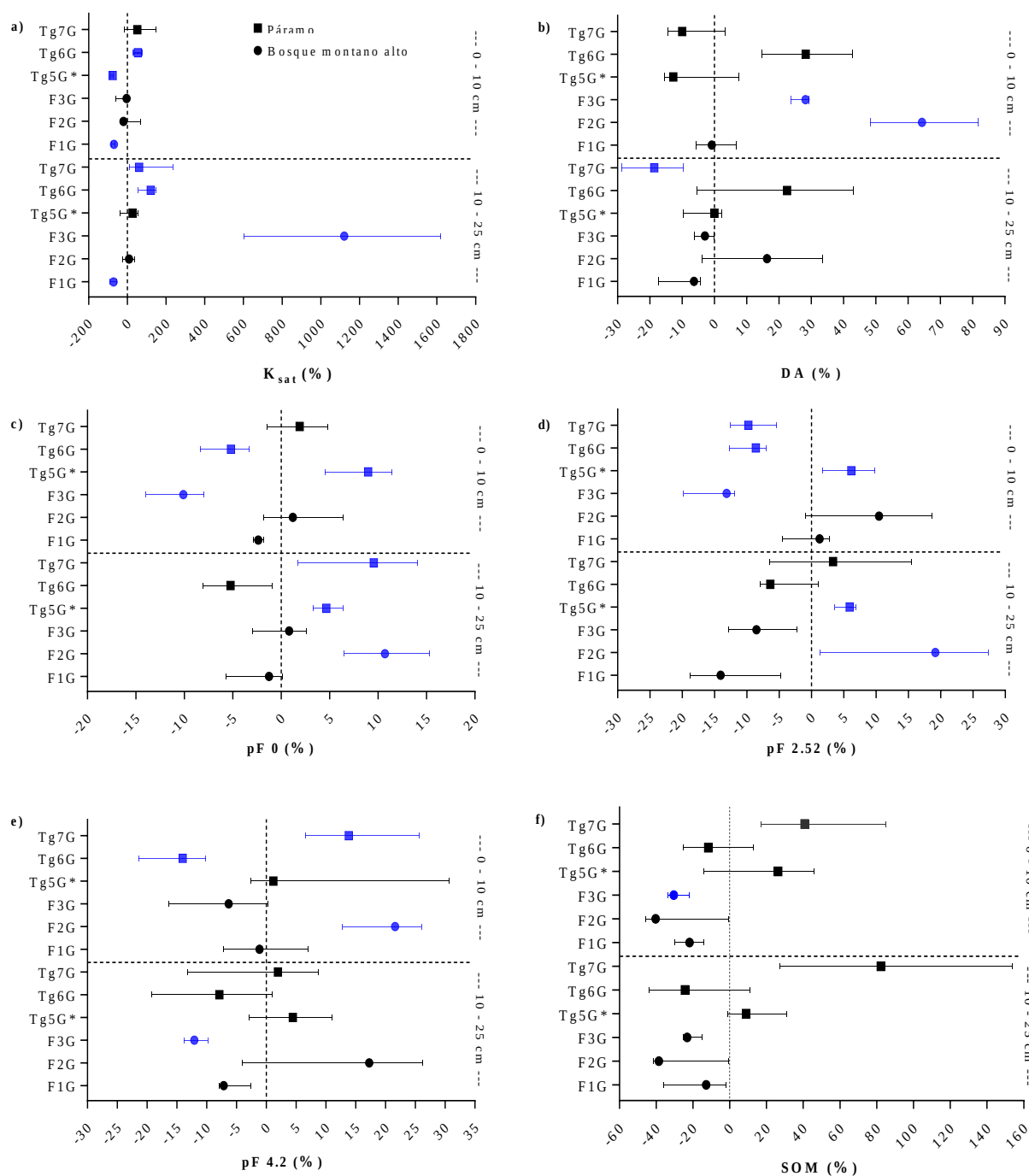


Figura 4. Forestplots del cambio porcentual en las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM (incremento o disminución) del horizonte superficial de los suelos a la profundidad de 0 – 10 y 10 – 25 cm debido al pastoreo en relación a las propiedades de los suelos bajo cobertura natural no intervenida en los sitios de estudio. FG= Pastoreo en bosque montano alto, TgG= Pastoreo en páramo, TgG*=Pastoreo en pajonal intervenido por quema. Los nombres de las variables se encuentran definidos en la Tabla 3. De color azul representa un cambio significativo ($p < 0.05$) en cada una de las variables.



4. Discusión

4.1 Propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM de los suelos en áreas de cobertura no intervenidas

El horizonte Ah de los Andosoles caracterizado en nuestro estudio fue determinado por su característico color negro, su alta capacidad de retención de agua y baja DA que es atribuida a sus altos contenidos de SOM (Buytaert et al., 2005; Poulenard et al., 2003). La caracterización de este horizonte evidenció una variabilidad espacial en sus propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM entre sitios de estudio.

Varios estudios han resaltado la importancia de la elevación tanto en el desarrollo de la vegetación (Homeier, Werner, Gradstein, Breckle, & Richter, 2008; Leuschner, Moser, Bertsch, Röderstein, & Hertel, 2007; Mena & Hofstede, 2006; Wilcke et al., 2008) así como en las propiedades de los suelos en ecosistemas alto Andinos (Buytaert, Deckers, & Wyseure, 2006; Quichimbo et al., 2012; Zehetner & Miller, 2006; Zehetner, Miller, & West, 2003). Esta importancia se debe a que los sitios con mayor elevación (< 3500 m s.n.m.) están asociados con climas húmedos y fríos que limitan el crecimiento del bosque montando alto (Wilcke et al., 2008) y dando lugar al desarrollo de plantas herbáceas principalmente de tipo pajonal (Baquero et al., 2004). La diferencia de vegetación de tipo leñosa vs herbácea sugiere diferencias en la K_{sat} del agua en los suelos debido a los flujos preferenciales formados por el distinto tipo y distribución de raíces de cada vegetación. Estas diferencias fueron evidentes acorde a nuestros resultados. Por ejemplo, se observó una mayor K_{sat} tanto a 0 -10 y 10 – 25 cm de profundidad en los sitios de bosque montano alto en comparación con los sitios de páramo (Tabla 3) siendo consistente con las correlaciones entre la elevación y la K_{sat} a las dos profundidades muestreadas (Tabla 2).

Del mismo modo, los climas húmedos y fríos típicos de mayores elevaciones (>3500 m s.n.m.), favorecen a la formación de los compuestos orgánico metálicos en los suelos de páramo (Poulenard et al., 2003; Zehetner & Miller, 2006). Motivo por el cual los suelos a mayores elevaciones muestran una mayor capacidad de



retención de agua en pF 0 a pF 2.52, a diferencia de los suelos de bosque montano alto que se desarrollan a menores elevaciones (Tonneijck et al., 2010). En este sentido, la correlación entre la elevación y la capacidad de retención de agua en pF 0 a pF 2.52 (Tabla 2) corroboran la influencia de la elevación sobre la capacidad de retención de agua en los primeros 10 cm de los suelos alto Andinos. Es decir, una mayor retención de agua entre pF 0 a pF 2.52 en los sitios de páramo a diferencia de los sitios de bosque montano alto (Tabla 3).

Por otra parte, los valores de K_{sat} , la capacidad de retención de agua y el contenido de SOM fueron más altos a 0 – 10 cm en comparación a 10 – 25 cm de profundidad. Esto significa que para entender la importancia de los suelos en los procesos de regulación y almacenamiento de agua en las cuencas alto Andinas, es indispensable la caracterización de las propiedades a los 10 cm, sin descartar la importancia a los 25 cm de profundidad como ha sido reportado por Correa et al. (2017) y Mosquera et al. (2016).

Algunos estudios en sitios cercanos a nuestra área de estudio han evaluado los impactos de las actividades antrópica mediante agrupaciones de los suelos por sus condiciones de cobertura natural no intervenida sin considerar su elevación y profundidad de muestreo (Chacón et al., 2009; Hofstede et al., 2002; Quichimbo et al., 2012). Por tal motivo sus conclusiones estudios no pudieron ser generalizadas. En nuestro estudio, los resultados sugieren que para evaluar los impactos de cualquier actividad antrópica es indispensable un estudio de la variabilidad espacial de los suelos en condiciones naturales o al menos evitar evaluar los impactos tomando como base sitios de muestreo ubicados en diferentes lugares. En otras palabras, los impactos de las actividades antrópicas en los suelos se debe hacer en sitios adyacentes entre ellos, lo cual garantizaría condiciones geomorfológicas y climáticas similares (Broquen, Girardin, & Frugoni, 1995).

Debido a la variabilidad espacial de los suelos, el comportamiento hidrológico de los ecosistemas alto Andinos puede ser extremadamente heterogéneo (Crespo et al., 2011; Suárez, Arcos, Moreno, Encalada, & Álvarez, 2013). Es decir, la alta variabilidad de los suelos en condiciones naturales pueden causar variabilidad en



el funcionamiento de las cuencas, y por tal motivo se debe enfatizar el interés del monitoreo de la dinámica del agua de los suelos y de las cuencas para generar políticas de manejo de estos ecosistemas.

4.2 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo plantaciones de pino

Un estudio previo en zona alto Andina ha sugerido que los cambios de las propiedades de los suelos en las plantaciones de pino podrían diferir en función de la distancia de muestreo desde el tronco del árbol dentro de las plantaciones de pino (Harden et al., 2013). Sin embargo, en todas las plantaciones dentro de nuestra área de estudio, las propiedades hidrofísicas no difirieron entre distancias de muestreo (75 y 150 cm de distancia de la base del tronco del árbol, Anexo 1). Nuestros resultados fueron consistentes con lo reportado por Wilcox, Breshears, & Turin (2003) y Ruiz, Barberá, Navarro, Albaladejo, & Castillo (2009). Wilcox et al. (2003), reportó que la K_{sat} del suelo bajo el dosel y entre el dosel de los árboles de pino no mostraron diferencias significativas, de igual manera Ruiz et al. (2009) reportó que la capacidad de retención de agua y AW en el suelo no difirieron entre 50 cm desde la base del tronco vs bajo la corona del árbol. Por otra parte, acorde a nuestros resultados las propiedades hidrofísicas y el contenido de SOM mostraron diferencias significativas entre las dos profundidades de muestreo (0 - 10 y 10 - 25 cm) en cada una de las plantaciones, concordando con los resultados de Ghimire, Bonell, Bruijnzeel, Coles, & Lubczynski (2013). Nuestros resultados sugieren que los cambios de las plantaciones en las propiedades difieren con la profundidad de muestreo y no con la distancia de muestreo desde la base del tronco del árbol en las plantaciones de pino. Por tal motivo, las conclusiones de otros estudios no pueden ser generalizadas cuando el muestreo fue realizado en una sola profundidad.

Las comparaciones de las propiedades de cada plantación con su respectiva cobertura natural adyacente (Tabla 6) revelan que la intervención de los suelos mediante las plantaciones de pino en los ecosistemas alto Andinos causan cambios principalmente en la K_{sat} , capacidad de retención de agua en pF 0 a 2.52



y en el contenido de SOM de los suelos en ambas profundidades de muestreo. Debido a estos cambios, las plantaciones de pino podrían alterar de manera directa los principales servicios como son la regulación y almacenamiento de agua (Crespo et al., 2011; Ochoa et al., 2016), y la captura de carbono de los suelos (Liao, Luo, Fang, Chen, & Li, 2012). Sin embargo, los cambios no pudieron ser generalizados, mostrando dependencias principalmente con la profundidad de muestreo, tipo de ecosistema, características de la plantación y uso anterior del suelo. Esto implica una complejidad al evaluar los impactos de las plantaciones y limita la generalización de los cambios de las propiedades de los suelos provocados por las plantaciones de pino en los ecosistemas alto Andinos.

4.2.1 Cambios a 0 – 10 cm de profundidad

Los diferentes cambios de K_{sat} son relacionados con el número, diámetro, y distribución de las raíces de la vegetación (Toohey, Boll, Brooks, & Jones, 2018). Esto se debe a que los bosques nativos poseen un mayor número de raíces superficiales a 10 cm de profundidad (Soethe, Lehmann, & Engels, 2006) y por ende se atribuye una mayor cantidad de flujos preferenciales, a diferencia de las plantaciones de pino caracterizados con un mayor desarrollo radicular en los 25 cm de profundidad (Warren, Meinzer, Brooks, & Domec, 2005). Esto sugiere que las plantaciones de pino disminuyen la K_{sat} en los primeros 10 cm del suelo en relación a los sitios de bosque nativo, lo cual fue consistente con las reducciones obtenidas en las plantaciones de pino en bosque montano alto (F1Pi y F3Pi, Figura 2a). Similares hallazgos fueron reportado por Ghimire et al.(2013) donde observó una menor K_{sat} a 10 cm de profundidad en pino vs bosque nativo. Por otra parte, el pajonal en páramo ha sido caracterizado por presentar raíces finas y muy uniformes diferenciándose a las de pinos por sus raíces leñosas y de mayor diámetro (Harden et al., 2013), por tal razón la intervención de las plantaciones de pino conlleva a un incremento de la K_{sat} , lo cual concuerda con nuestros resultados en las plantaciones de pino en páramo (Figura 2a).

En nuestro estudio, no hubo evidencias significativas del incremento de DA en la mayoría de las plantaciones de pino con excepción de F3Pi (Tabla 6 y Figura 2b).

Pese a la falta de evidencias significativas, se observó que en 6 de las 7 plantaciones de pino tendió a incrementar la DA en los 10 cm de profundidad (Tabla 6 y Figura 2b). Debido a los altos costos y a las condiciones topográficas de la plantaciones en el área de estudio, el manejo de la plantaciones fue limitado, por tal razón la tendencia de incremento de DA no fue atribuido al uso de maquinaria pesada (Cambi, Certini, Neri, & Marchi, 2015), sino más bien al secado del suelo por la evapotranspiración (Huber, Iroume, Mohr, & Frêne, 2010) y al peso de la biomasa árboles (Kozłowski, 1999), observando en nuestro estudio un mayor incremento de DA a 10 cm de profundidad con una alta SD y CD de la plantación (p. ej. F2Pi y F3Pi en bosque montano alto y Tg5Pi en páramo).

Según Farley et al. (2004), la intervención de los suelos mediante plantaciones de pino alteran la capacidad de retención de agua de los suelos relacionada principalmente por la descomposición de SOM. Según nuestro estudio, la alteración de la capacidad de retención de agua en los suelos alto Andinos por las plantaciones no son solamente dependientes de los cambios en el contenido SOM, sino además depende de la elevación, tipo de ecosistema, desarrollo de las plantaciones y uso anterior del suelo, tal como han sido reportado en otros ecosistemas (Liao et al., 2012; Martín et al., 2016; Wall & Hytönen, 2005). En nuestro estudio, la capacidad de retención de agua en pF 0 a 2.52 de los suelos bajo las plantaciones F1Pi y F3Pi en bosque montano alto y Tg6Pi en páramo con uso anterior de cobertura natural mostraron reducciones significativas entre 2.53 – 13.43 %. Las mayores reducciones porcentuales fueron atribuidas a un mayor desarrollo de las plantaciones (DAP>18 cm, Alt>8m y CD>5m) (Tabla 4) conjuntamente con una disminución de SOM e incremento de la DA (Figura 2b y 2f). Esto explicaría en parte las correlaciones obtenidas entre las variables de desarrollo del de las plantaciones con la capacidad de retención de agua (Figura 3a). En las tres plantaciones que fueron establecidas en suelos cuyo uso anterior fue pastoreo (F4Pi, Tg5Pi y Tg7Pi), los cambios de estas plantaciones de pino fueron muy variables observando incrementos o disminuciones significativas entre pF 0 a pF 2.52 (Figura 2c, 2d, 2e), pese a que el contenido de SOM tendió a incrementar (Figura 2f). Esta variación en los cambios podría deberse a una



mezcla de cambios entre el uso anterior del suelo y al crecimiento de la plantación (Ruiz et al., 2009; Wall & Hytönen, 2005), existiendo un solapamiento de los impactos (Ghimire et al., 2013) y siendo difícil de generalizarlos. Por otra parte, F2Pi fue establecida sobre bosque nativo también hubo un incremento significativo de la capacidad de retención en pF 0 a pF 2.52, a pesar de una reducción significativa de SOM. Esto indica que no siempre un incremento de la retención de agua se relaciona con SOM (Minasny & Mcbratney, 2017), y que en algunos casos los cambios pueden obedecer a la clase textural del suelo (Rawls, Pachepsky, Ritchie, Sobecki, & Bloodworth, 2003). Debido a que en F2Pi presentó un alto contenido de vidrio volcánico de fácil meteorización, lo cual daría un incremento de arcilla (Sánchez & Rubiano, 2015) incrementando la capacidad de retención de agua en el suelo.

En cualquier tipo de ecosistema, el GW para la generación de caudal y AW para el crecimiento y desarrollo de las plantas son de vital importancia para su funcionalidad hidrológica y ecológica (Huber et al., 2010). Acorde a nuestros resultados, las plantaciones mostraron un incremento significativo de GW. Este incremento sugiere que los suelos bajo plantaciones de pino pierden rápidamente la humedad del suelo luego de un evento de precipitación facilitando el secado del suelo y descomposición de SOM (Alameda, Villar, & Iriondo, 2012). Por otro lado, según Buytaert et al. (2005) el cambio del uso del suelo podría incrementar un 30 % el AW del suelo de origen volcánico, sin embargo Hofstede et al. (2002) reportó una disminución del AW como consecuencia de la aforestación con pino, sin embargo en nuestro estudio solo dos plantaciones de pino mostraron una disminución significativa (F3Pi y Tg7Pi, Anexo 2).

Varios estudios han asociado la reducción del contenido de SOM con las plantaciones de pino (Farley et al., 2004; Hofstede et al., 2002; Suárez et al., 2013) atribuyendo al desarrollo de las plantaciones. No obstante, se ha dado casos donde las plantaciones de pino han incrementado el contenido de SOM en los Andosoles como son los estudios de Quichimbo et al. (2012) y La Manna et al. (2016). La Manna et al. (2016) reportó un incremento del 30 % de SOM en las

plantaciones de pino cuyo uso anterior fue pastoreo extensivo (0.6 ovejas/ha). En nuestros resultados se observó una tendencia de disminución del contenido de SOM en las plantaciones F1Pi, F2Pi, y Tg6Pi (Figura 2f) cuyo uso anterior del suelo fue cobertura natural no intervenida aunque no todas fueron significativas (Tabla 6 y Figura 2). Debido a una mayor disminución de SOM en plantaciones caracterizadas con mayor desarrollo de árboles (p.ej. F1Pi y F2Pi), se podría decir que el desarrollo de las plantaciones de pino juega un rol importante en la descomposición de la SOM en suelos cuyo uso anterior fue cobertura natural no intervenida. Por otra parte, tres (F4Pi, Tg5Pi y Tg7Pi) de las 4 plantaciones donde el uso anterior del suelo fue pastoreo extensivo por bovinos mostraron una tendencia de un incremento (6.75, 5.71 y 34.87 %, respectivamente). Estos hallazgos indican que las plantaciones de pino podrían ayudar a la recuperación de la SOM en los primeros 10 cm del suelo en sitios intervenidos por pastoreo, aunque dependería de la elevación y de la SD de la plantación como fue el caso de F3Pi donde se observó una reducción significativa de SOM. Esta plantación se caracterizó tener una mayor SD y por su menor elevación al resto de plantaciones cuyo uso anterior fue pastoreo (Tabla 4).

4.2.2 Cambios a 10 – 25 cm de profundidad

Las plantaciones de pino incrementan significativamente la K_{sat} a 10 a 25 cm, siendo consistente con Ghimire et al. (2013). El incremento depende principalmente del desarrollo de los árboles en cada uno de los ecosistemas. Las plantaciones de pino F1Pi y F2Pi en bosque montano; y Tg5Pi y Tg7Pi en páramo por tener un mayor desarrollo en cada ecosistema pese a no recibir ningún tipo de manejo (Tabla 4), mostraron un mayor incremento significativo de la K_{sat} (Tabla 6 y Figura 2a). Mientras que la plantación de pino F3Pi presentó una reducción en la K_{sat} caracterizada por su menor desarrollo y ubicada en bosque montano alto (Tabla 4). Dicha relación fue consistente con los resultados de las correlaciones y de regresión expuestos en la Figura 3a y 3c. Además, el porcentaje de incremento de la K_{sat} dependió del tipo de ecosistema, apreciando un mayor incremento en las plantaciones de páramo (>100 %) a diferencia de bosque montano alto (<100 %).



La DA a 10 – 25 cm de profundidad no fue afectada en la mayoría de las plantaciones (Tabla 6 y Figura 2b). No obstante, la mayoría de las plantaciones mostraron una tendencia de disminución variando entre un 2 a 18 % (Figura 2b). Esta tendencia se atribuye al incremento de la porosidad generada por el sistema radicular subsuperficial del pino. Por otra parte, dos plantaciones (F3Pi y Tg5Pi) mostraron un incremento, lo cual se atribuye a la compactación por la presión de la biomasa de la plantación sobre suelo debido a su alta SD (Tabla 4), lo que se traduce a un mayor número de árboles incrementando la transpiración dando como consecuencia una contracción del suelo.

Acorde a nuestros resultados, las plantaciones de pino pueden o no generar cambios significativos en la capacidad de retención de agua a 10 – 25 cm de profundidad (Tabla 4 y Figura 2c, 2d y 2e). En las plantaciones como F1Pi, F3Pi y Tg4Pi evidenciaron una reducción en la capacidad de retención de agua en pF0 a pF 4.2 (Figura 2c, 2d y 2e), conjuntamente con una reducción de los contenidos de SOM, mientras que Tg7Pi mostró un incremento significativo de la capacidad de retención de agua en pF0 a pF 4.2, conjuntamente con un incremento en el contenido de SOM. La relación entre la retención de agua y contenido de SOM fueron consistentes con los resultados expuestos por Farley et al. (2004), Martín et al. (2016) y Wall & Hytönen (2005) donde la retención de agua en el suelo dependió del contenido de SOM en las plantaciones de pino. A pesar de los resultados expuestos anteriormente, hubo resultados no consistentes en F2Pi donde incrementó la capacidad de retención pese a una disminución del contenido de SOM. Dichas contradicciones podrían estar relacionadas con la textura del suelo (Minasny & Mcbratney, 2017), una situación similar fue reportada por Fernández et al. (2010) en regosoles.

De igual manera que a 0 – 10 cm de profundidad, los cambios de las plantaciones de pino a 10 – 25 cm de profundidad no pueden ser generalizados siendo dependientes principalmente de la elevación, tipo de ecosistema y características de la plantación.

4.3 Cambios en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM de los suelos bajo pastoreo

De forma similar a los cambios de las plantaciones en las propiedades hidrofísicas y en el contenido de SOM, nuestros resultados indican que los cambios debido al pastoreo no pueden ser generalizados ya que depende de la profundidad de muestreo, tipo de ecosistema y el manejo del suelo (intensidad de pastoreo y labores culturales del suelo).

4.3.1 Cambios a 0 – 10 cm de profundidad

Según Alarcón et al. (2010), los cambios por pastoreo no fueron evidentes estadísticamente en la K_{sat} a 0 - 10 cm de profundidad en los Andosoles. Sin embargo nuestros resultados contradicen en parte a dicho estudio debido a que 3 de los 6 sitios de estudio mostraron cambios significativos (Figura 4a y Tabla 7). En F1G y Tg5G* mostraron una reducción significativa del 70 % de la K_{sat} , mientras en Tg6G hubo un incremento significativo del 52.67 % (Figura 4a). La reducción de la K_{sat} en F1G podría deberse al cambio de geometría y la pérdida de la estabilidad de los agregados del suelo debido a la preparación y manejo del suelo (Celik, 2005) conjuntamente con el tiempo de uso del suelo en este sitio (>10 años). Mientras la reducción en Tg5G* se le atribuye a la intervención por quema en el pajonal dando como resultado un secado y un encostramiento del suelo (Poulenard et al., 2001), provocando una disminución de la K_{sat} en la parte superficial del suelo. Por otra parte, a pesar que el incremento de la K_{sat} no fue significativo en Tg7G, dicho incremento porcentual fue muy similar a Tg6G (Figura 4a). El incremento en estos sitios podrían estar relacionados con los flujos preferenciales formados entre los terrones ocasionados por el laboreo del suelo (Bodner, Scholl, Loiskandl, & Kaul, 2013) durante la preparación y siembra de los pastos (Tabla 5), sin embargo esta situación podría cambiar a través del tiempo debido al deterioro estructural del suelo.

La compactación del suelo por el pastoreo puede verse reflejada en el incremento de la DA (Azarnivand, Farajollahi, Bandak, & Pouzesh, 2011; Hernández, Alba, &



Daza, 2009). Sin embargo, este efecto solo se observó en dos sitios de estudio (F2G y F3G) (Tabla 4 y Figura 4b) el cual es atribuido a una mayor intensidad de pastoreo en estos sitios (UBA/Ha de 2 y 1, respetivamente) y por la descomposición de SOM (Figura 4e). Nuestros resultados fueron consistentes con los de Donkor et al. (2002) donde reportó una mayor compactación a una mayor intensidad de pastoreo. En páramo, el efecto de pisoteo del ganado no fue evidente en los suelos, lo cual fue consistente con los resultados de Alarcón et al. (2010) y Podwojewski et al. (2002) donde no evidenciaron una compactación en Andosoles por el pastoreo extensivo. Sus resultados y de nuestro estudio sugieren que los Andosoles por su alto contenido de SOM tendrían una mayor resiliencia ante una compactación (Dörner et al., 2009) frente a un pastoreo de baja intensidad (UBA/Ha de <0.5).

Estudios previos señalan que la capacidad de retención de agua de los Andosoles pueden o no ser afectados por la actividad de pastoreo (Alarcón et al., 2010, Podwojewski et al., 2002). Según Podwojewski et al. (2002) y acorde a nuestros resultados, la pérdida de la retención de agua depende principalmente del contenido de SOM y de mineralogía del suelo. En nuestro estudio, los contenidos de SOM no presentaron cambios significativos con excepto F3G (Tabla 7), sin embargo se evidenció tendencias importantes asociadas con el cambio en la capacidad de retención de agua en $pF_0 - pF_{4.2}$ (Tabla 7 y Figura 4c, 4d, 4e). Por ejemplo en Tg5G* y Tg7G donde mostraron un incremento del contenido de SOM por la intervención de quema de pajonal en Tg5G* y por la incorporación de la biomasa del pajonal durante la preparación del suelo en Tg7G. En estos dos sitios, el contenido de SOM incrementó en un 13 y 88 % (respectivamente) mostraron un incremento entre el 2 al 21 % en la capacidad de retención de agua en el suelo. Por el lado contrario, los sitios F1G, F3G y Tg6G con una tendencia de disminución del 17, 21 y 29 % de SOM (respectivamente) mostraron una disminución del 1 al 22 % en la capacidad de retención de agua. Estos resultados fueron consistes con Daza et al., (2014) donde reportó una disminución de la capacidad de retención de agua de suelo y fue atribuido a la pérdida de SOM. Por las relaciones explicadas podríamos asumir que la SOM del suelo juega un rol

importante en la capacidad de retención de agua y sería la principal propiedad que se debe tomar en cuenta para evaluar los impactos del pastoreo en los suelos alto Andinos considerando algunas excepciones como fue el caso de F2G. En F2G mostró un incremento de la retención de agua en pF 1.5 a pF 4.2 (Figura 4d y 4e) a pesar de la disminución del contenido de SOM. Esta particularidad se debe al cambio en la mineralogía del suelo, debido a F2G presentó un alto contenido de vidrio volcánico el cuál es de fácil meteorización dando lugar a la formación arcilla montmorillonita (Sánchez & Rubiano, 2015) caracterizada por su alta capacidad de retención de agua. Estos resultados indican que para entender de mejor manera los cambios en las propiedades hidrofísicas de los suelos es necesario evaluar la clase textural del suelo como el tipo de manejo del suelo.

4.3.2 Cambios a 10 – 25 cm de profundidad

Debido al menor número de propiedades que mostraron cambios significativos en los sitios de estudio a 10 – 25 cm que a 0 -10 cm de profundidad, sugiere que los impactos de pastoreo son menores a 10 – 25 cm de profundidad (Figura 4), por lo que concordamos con Donkor et al. (2002) que el impacto del pastoreo se da principalmente en la superficie del suelo y siendo una limitante la profundidad del suelo para el desarrollo de raíces, esto conlleva a un menor impacto en las propiedades por parte de pastoreo. Los principales cambios ocurridos a 10 – 25 cm de profundidad puede deberse principalmente a la labranza del suelo y al tipo de suelo.

A 10 – 25 cm de profundidad, los resultados muestran que el pastoreo puede incrementar o disminuir significativamente la K_{sat} (Tabla 7 y Figura 4a). El incremento de la K_{sat} fue mayor del 100 % en F3G, Tg6G y Tg7G en donde se intervino el suelo mediante labranza antes del establecimiento de pastos. El incremento fue mayor en F3G (>1000 %), esto se debe al laboreo del suelo en la cual se incorporó restos del material leñoso de tallos y ramas que no fueron eliminadas completamente durante la tala y quema del bosque. Los resultados revelan que la intervención de la labranza del suelo para el establecimiento de



pastos incrementa la K_{sat} . Sin embargo, la K_{sat} puede disminuir con el tiempo (Bodner et al., 2013). Un ejemplo claro de este caso fue F1G caracterizado por tener un tipo de pastoreo >10 años, se evidenció una reducción significativa del 71.03 % de la K_{sat} a pesar que la preparación del suelo fue mecanizada. Dicha reducción podría ser atribuida por el deterioro estructural del suelo a lo largo del tiempo (Alarcón et al., 2010) conjuntamente con un bajo contenido de SOM (6.98 %). En base a nuestros resultados podemos concluir que los cambios dados en la K_{sat} a 10 – 25 cm de profundidad se dan por la forma de labranza de los suelos para el establecimiento de pastos, el tiempo de uso del suelo dedicado al pastoreo (Bodner et al., 2013).

Por la falta de evidencia significativa de la DA a 10 – 25 cm de profundidad en la mayoría de los sitios de estudio con excepción de Tg7G, nuestros resultados sugieren que el pastoreo no causan una compactación significativa en los suelos a 10 – 25 cm de profundidad. Esto se puede deber a su alto contenido de SOM (Tabla 7). En el caso de Tg7G donde la DA disminuyó significativa en un 18.63 % (Figura 4b), esta disminución estaría relacionado con la incorporación de biomasa del pajonal durante la labranza del suelo.

A pesar que los contenidos de SOM no mostraron cambios significativos por el pastoreo, las tendencias del cambio fueron similares a los de la capacidad de retención de agua (Figura 4c – 4f) observando reducciones en la mayoría de los sitios de estudio. Esta tendencia de reducción implicaría que a lo largo del tiempo los suelos bajo pastoreo en la región Andina, podrían perder una cantidad considerable de SOM y por ende perder su capacidad de retención de agua, y según Daza et al. (2014), la insuficiente aplicación de SOM a los suelos contribuiría a la degradación de los suelos. Por otro lado, es importante resaltar las tendencias de incremento del 8.89 y 82.21 % de la SOM en Tg5G* y Tg7G (respectivamente, Figura 4f). Este incremento es atribuido a la descomposición de raíces por la quema del pajonal antes del pastoreo en caso de Tg5G* y a la incorporación de la biomasa en caso de Tg7G. Harden (2006) reportó un incremento de SOM en pajonal quemado en áreas aledañas a nuestro estudio, lo



cual es consistente con los resultados en Tg5G*. De nuestros resultados podemos resaltar que los cambios la SOM y capacidad de retención son dependientes principalmente del manejo del suelo.

5. Conclusiones

Los Andosoles son suelos predominantes en los ecosistemas alto Andinos, caracterizados por su horizonte Andico de color negro con una alta capacidad de retención de agua, y un alto contenido de SOM, sin embargo este horizonte en condiciones naturales presentaron diferencias en sus propiedades entre distintos sitios dentro los ecosistemas alto Andinos. Las principales diferencias fueron en la K_{sat} y capacidad de retención de agua de los suelos. Estas diferencias principalmente son atribuidas al tipo de ecosistema y elevación los suelos. Además, las diferencias de sus propiedades no solo se dieron entre sitios, sino además dentro de cada sitio con la profundidad muestreo, evidenciando un mayor valor de la K_{sat} , capacidad de retención de agua y del contenido de SOM a 0 – 10 cm de profundidad. Por dichas diferencias es imposible evaluar los impactos de las plantaciones de pino y de pastoreo sobre las propiedades a escala regional, y por ende toda evaluación de los impactos de las actividades antrópicas se debe realizar en sitios adyacentes, lo cual garantizaría condiciones geomorfológicas y climáticas similares.

La intervención con las plantaciones de pino en los ecosistemas alto Andinos causan cambios (incrementos o disminuciones) principalmente en la K_{sat} , capacidad de retención de agua en pF 0 a 2.52 y en el contenido de SOM a 0 a 25 cm profundidad del suelo. Tales cambios fueron dependientes con la profundidad de muestreo, tipo de ecosistema, características de la plantación y uso anterior del suelo. De igual manera, la actividad de pastoreo causa cambios (incrementos y disminuciones) principalmente en la K_{sat} y en la capacidad de retención de agua, sin embargó los cambios mostraron dependencia principalmente con las profundidades de muestreo, y el manejo del suelo (intensidad de pastoreo y



labores culturales del suelo). Debido a estas dependencias de los impactos por estas dos actividades antrópicas, existe una complejidad al evaluar sus impactos en los ecosistemas alto Andinos a escala regional.

Finalmente, debido a la mayor capacidad de retención de agua, con una moderada K_{sat} y su elevado contenido de SOM del horizonte Andico en los ecosistemas alto andinos, se debe evitar todo tipo de actividades antrópicas que afecten a sus propiedades y de esta manera asegurar su capacidad de regulación y almacenamiento de agua que son de vital importancia para la región.

6. Referencias

- Alameda, D., Villar, R., & Iriondo, J. M. (2012). Spatial pattern of soil compaction: Trees' footprint on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, 283, 128–137. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.018>
- Alarcón, C., Dörner, J., Dec, D., Balocchi, O., & López, I. (2010). Efecto de dos intensidades de pastoreo sobre las propiedades hidráulicas de un andisol (Duric Hapludand). *Agro Sur*, 38(1), 30–41.
- Aucapiña, G., & Marín, F. (2014). *Efectos de la posición fisiográfica en las propiedades hidrofísicas de los suelos de páramo de la microcuenca del río Zhurucay*. Thesis. Universidad de Cuenca. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/19991/1/Tesis.pdf>
- Azarnivand, H., Farajollahi, A., Bandak, E., & Pouzesh, H. (2011). Assessment of the Effects of Overgrazing on the Soil Physical Characteristic and Vegetation Cover Changes in Rangelands of Hosainabad in Kurdistan Province , Iran. *Journal of Rangeland Science*, 1(2), 95–102.
- Baquero, F., Sierra, R., Ordóñez, L., Tipán, M., Espinoza, L., Rivera, M., & Soria, P. (2004). *La Vegetación de los Andes del Ecuador. Memoria explicativa de los mapas de vegetación potencial y remanente de los Andes del Ecuador a escala 1:250.000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras*. (EcoCiencia). Quito.
- Bodner, G., Scholl, P., Loiskandl, W., & Kaul, H. (2013). Environmental and management influences on temporal variability of near saturated soil hydraulic properties. *Geoderma*, 204–205, 120–129. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.015>
- Broquen, P., Girardin, J., & Frugoni, M. (1995). Evaluación de algunas propiedades de suelos derivados de cenizas volcánicas asociadas con forestaciones de coníferas exóticas (SO de la provincia de Neuquén- R. Argentina). *Bosque*, 16(2), 69–79.



- Bussmann, R. (2005). Bosques andinos del sur del Ecuador, clasificación, regeneración y uso. *Revista Peruana de Biología*, 12(2), 203–216.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bievre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 413–421. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19–33. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Buytaert, W., Deckers, J., Dercon, G., De Bièvre, B., Poesen, J., & Govers, G. (2002). Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. *Soil Use and Management*, 18, 94–100. <http://doi.org/10.1079/SUM2001107>
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2005). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Buytaert, W., Deckers, J., & Wyseure, G. (2007). Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena*, 70(2), 143–154. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2006.08.003>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & Bièvre, B. De. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251(1–2), 22–30. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.035>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., & De Bièvre, B. (2007). The effects of afforestation and cultivation on water yield in the Andean páramo. *Forest Ecology and Management*, 251, 22–30.
- Buytaert, W., Sevink, J., De Leeuw, B., & Deckers, J. (2005). Clay mineralogy of the soils in the south Ecuadorian páramo region. *Geoderma*, 127(1–2), 114–129. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.021>
- Buytaert, W., Wyseure, G., De Bièvre, B., & Deckers, J. (2005). The effect of land-use changes on the hydrological behaviour of Histic Andosols in south Ecuador. *Hydrological Processes*, 19(20), 3985–3997. <http://doi.org/10.1002/hyp.5867>
- Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, 338, 124–138.



<http://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.022>

- Celik, I. (2005). Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 270–277. <http://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.001>
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009a). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29, 350–355.
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009b). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <http://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space–time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316–3327. <http://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Chacón, G., Gagnon, D., & Paré, D. (2009). Comparison of soil properties of native forests, Pinus patula plantations and adjacent pastures in the Andean highlands of southern Ecuador: land use history or recent vegetation effects? *Soil Use and Management*, 25(4), 427–433. <http://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00233.x>
- Chacón, G., Gagnon, D., Paré, D., & Proulx, D. (2003). Impacto de la deforestación, pastizales, plantaciones de eucalipto y pino en suelos de bosque montano alto, en la sierra sur del Ecuador. *Revista de Investigaciones de La Universidad Del Azuay*, (11), 35.
- Córdova, M., Céleri, R., Shellito, C. J., Orellana-Alvear, J., Abril, A., & Carrillo-Rojas, G. (2016). Near-Surface Air Temperature Lapse Rate Over Complex Terrain in the Southern Ecuadorian Andes: Implications for Temperature Mapping. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 48(4), 673–684. <http://doi.org/10.1657/AAAR0015-077>
- Correa, A., Windhorst, D., Tetzlaff, D., Crespo, P., Céleri, R., Feyen, J., & Breuer, L. (2017). Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the Andean Páramo. *Water Resources Research*, 53, 5998–6017. <http://doi.org/10.1002/2016WR020187>. Received
- Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.-G., & Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 164–174. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.021>
- Daza, M. C., Hernández, F., & Triana, F. A. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(1), 7189–7200. <http://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- de Koning, G. H. J., Veldkamp, E., & López-Ulloa, M. (2003). Quantification of



- carbon sequestration in soils following pasture to forest conversion in northwestern Ecuador. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), n/a-n/a. <http://doi.org/10.1029/2003GB002099>
- Donkor, N. T., Gedir, J. V., Hudson, R. J., Bork, E. W., Chanasyk, D. S., & Naeth, M. a. (2002). Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(1), 1–8. <http://doi.org/10.4141/S01-008>
- Dörner, J., Dec, D., Peng, X., & Horn, R. (2009). EFECTO DEL CAMBIO DE USO EN LA ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA Y LA FUNCIÓN DE LOS POROS DE UN ANDISOL (TYPIC HAPLUDAND) DEL SUR DE CHILE. *Rev. Cienc. Suelo Nutr. / J. Soil. Sci. Plant Nutr.*, 9(3), 190–209.
- FAO/ISRIC. (2002). *PROCEDURES FOR SOIL ANALYSIS*. (L. P. van Reeuwijk, Ed.) (Sixth Edit). The Netherlands.
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description* (Fourth). Rome, Italy.
- Farley, K. A., & Kelly, E. F. (2004). Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecology and Management*, 195, 271–290.
- Farley, K. A., Kelly, E. F., & Hofstede, R. G. M. (2004). Soil Organic Carbon and Water Retention after Conversion of Grasslands to Pine Plantations in the Ecuadorian Andes. *Ecosystems*, 7(7), 729–739. <http://doi.org/10.1007/s10021-004-0047-5>
- Farley, K., & Kelly, E. (2004). Effects of afforestation of a páramo grassland on soil nutrient status. *Forest Ecology and Management*, 195(3), 281–290. <http://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.015>
- Fernández, E., Rojo, L., Jiménez, M. N., Navarro, F. B., Díez, M., Martín, F., ... Aguilar, J. (2010). Afforestation improves soil fertility in south-eastern Spain. *European Journal of Forest Research*, 129(4), 707–717. <http://doi.org/10.1007/s10342-010-0376-1>
- Ghimire, C. P., Bonell, M., Bruijnzeel, L. A., Coles, N. A., & Lubczynski, M. W. (2013). Reforesting severely degraded grassland in the Lesser Himalaya of Nepal: Effects on soil hydraulic conductivity and overland flow production. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4), 2528–2545.
- Gomez, A., Powers, R. F., Singer, M. J., & Horwath, W. R. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4), 1334.
- Greenwood, W. J., & Buttle, J. M. (2012). Effects of reforestation on near-surface saturated hydraulic conductivity in a managed forest landscape, southern Ontario, Canada. *Ecohydrology*, 7(1), 45–55.
- Guo, L., & Gifford, M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 8, 345–360.



- Harden, C. P. (2006). Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes. *Geomorphology*, 79(249–263).
- Harden, C. P., Hartsig, J., Farley, K. A., Lee, J., & Bremer, L. L. (2013). Effects of land-use change on water in andean páramo grassland soils. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 375–384.
- Herández, F., Alba, F., & Daza, M. (2009). Efecto de actividades agropecuarias en la capacidad de infiltración de los suelos del páramo del Sumapaz. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 8(8), 29–38.
- Hofstede, R. (2001). *El impacto de las actividades humanas sobre el páramo*. Ecuador.
- Hofstede, R. G. M. (1995). The effects of grazing and burning on soil and plant nutrient concentrations in Colombian páramo grasslands. *Plant and Soil*, 173, 111–132.
- Hofstede, R. G. M., Groenendijk, J. P., Coppus, R., Fehse, J. C., & Sevink, J. (2002). Impact of Pine Plantations on Soils and Vegetation in the Ecuadorian High Andes. *Mountain Research and Development*, 22(2), 159–167.
- Hofstede, R., Groenendijk, J., Coppus, R., Fehse, J., & Sevink, J. (2002). Impact of pine plantations on soils and vegetation in the Ecuadorian High Andes. *Mountain Research and Development*, 22(2), 159–167.
- Hofstede, R., Lips, J., & Jongsma, W. (1998). *Geografía, ecología y forestación de la sierra alta del Ecuador* (Abya-Yala). Quito, Ecuador.
- Homeier, J., Werner, F., Gradstein, S., Breckle, S., & Richter, M. (2008). Potential vegetation and floristic composition of Andean Forests in south Ecuador, with a focus on the RBSF. *Gradients in a Tropical Mountain Ecosystem of Ecuador: Ecological Studies* 198, 198(May), 87–100.
- Huber, A., Iroume, A., Mohr, C., & Frêne, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *BOSQUE*, 31(3), 219–230.
- Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D., ... Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, 57, 75–124.
- Knoke, T., Bendix, J., Pohle, P., Hamer, U., Hildebrandt, P., Roos, K., ... Beck, E. (2014). Afforestation or intense pasturing improve the ecological and economic value of abandoned tropical farmlands. *Nature Communications*, 5, 5612.
- Kozlowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596–619.
- Kruskal, W., & Wallis, W. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583–621.



- La Manna, L., Buduba, C. G., & Rostagno, C. M. (2016). Soil erodibility and quality of volcanic soils as affected by pine plantations in degraded rangelands of NW Patagonia. *European Journal of Forest Research*, 135(4), 643–655.
- Leuschner, C., Moser, G., Bertsch, C., Röderstein, M., & Hertel, D. (2007). Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology*, 8(3), 219–230.
- Liao, C., Luo, Y., Fang, C., Chen, J., & Li, B. (2012). The effects of plantation practice on soil properties based on the comparison between natural and planted forests: A meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 21, 318–327.
- López, M., Veldkamp, E., & de Koning, G. H. J. (2005). Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. *Soil Science Society of America Journal*, 69(4), 1110–1117.
- Luteyn, J. L. (1999). *Páramos: a checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical Literature*. The New York Botanical Garden Press, New York.
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), 50–60.
- Martín, F., Navarro, F., Jiménez, M., Sierra, M., Martínez, F., Romero, A., ... Fernández, E. (2016). Long-term effects of pine plantations on soil quality in southern Spain. *Land Degradation & Development*.
- Medina, G., Josse, C., & Mena, A. (2000). La forestación en los páramos. *Abya Yala*, 6, 1–76.
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 91–109.
- Mena, P., Josse, C., & Medina, G. (2000). *Los suelos del páramo*. Abya-Yala. Quito.
- Minasny, B., & Mcbratney, A. (2017). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. *European Journal of Soil Science*, 1–9.
- Mosquera, G., Célleri, R., Lazo, P., Vaché, K., Perakis, S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947.
- Mosquera, G., Lazo, P., Célleri, R., Wilcox, B., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *Catena*, 125, 120–128.
- Nemenyi, P. (1962). Distribution-free multiple comparisons. *Biometrics*, 18(2), 263.



- Ochoa, B. F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Céleri, R., Crespo, P., Villacís, M., ... Arias, S. (2016). Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30(22), 4074–4089.
- Oosterbaan, R., & Nijland, H. (1994). Determining the Saturated Hydraulic Conductivity. In *Drainage Principles and Applications* (pp. 1–38). Wageningen.
- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18, 45–55. <http://doi.org/10.1079/SUM2001100>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117, 267–281.
- Poulenard, J., Podwojewski, P., Janeau, J., & Collinet, J. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, 45, 185–207.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cardenas, I., Crespo, P., & Celleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: Páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138–153.
- R Development Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ramsay, P., & Oxley, E. (1997). The growth form composition of plant communities in the ecuadorian páramos. *Plant Ecology*, 131, 173–192.
- Rawls, W., Pachepsky, Y., Ritchie, J., Sobecki, T., & Bloodworth, H. (2003). Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116, 61–76.
- Ruiz, A., Barberá, G. G., Navarro, J. A., Albaladejo, J., & Castillo, V. M. (2009). Soil dynamics in *Pinus halepensis* reforestation: Effect of microenvironments and previous land use. *Geoderma*, 153, 353–361.
- Sakia, R. M. (1992). The Box-Cox Transformation Technique: A Review. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, 41(2), 169–178.
- Sánchez, J., & Rubiano, Y. (2015). Procesos específicos de formación de andisoles, alfisoles y ultisoles en Colombia. *Revista EIA*, 12(2), 85–97.
- Shoji, S., Nanzyo, M., & Dahlgren, R. (1993). *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization*. *Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015* (Vol. 1). London: Development in Soil Science 21.



- Soethe, N., Lehmann, J., & Engels, C. (2006). Root morphology and anchorage of six native tree species from a tropical montane forest and an elfin forest in Ecuador. *Plant and Soil*, 279, 173–185. <http://doi.org/10.1007/s11104-005-1005-5>
- Suárez, E., Arcos, E., Moreno, C., Encalada, A., & Álvarez, M. (2013). Influence of vegetation types and ground cover on soil water infiltration capacity in a high-altitude páramo ecosystem. *Avances En Ciencia e Ingenierías*, 5(1), B14–B21.
- Tonneijck, F., Jansen, B., Nierop, K., Verstraten, J., Sevink, J., & De Lange, L. (2010). Towards understanding of carbon stocks and stabilization in volcanic ash soils in natural Andean ecosystems of northern Ecuador. *European Journal of Soil Science*, 61, 392–405.
- Toohey, R. C., Boll, J., Brooks, E. S., & Jones, J. R. (2018). Effects of land use on soil properties and hydrological processes at the point, plot, and catchment scale in volcanic soils near Turrialba, Costa Rica. *Geoderma*, 315, 138–148. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.044>
- Topp, G. C., & Zebchuk, W. (1979). The determination of soil-water desorption curves for soil cores. *Canadian Journal of Soil Science*, 59(1), 19–26. <http://doi.org/10.4141/cjss79-003>
- Vuille, M., Bradley, R., & Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13, 2520–2535.
- Wall, A., & Hytönen, J. (2005). Soil fertility of afforested arable land compared to continuously forested sites. *Plant and Soil*, 275, 247–260. <http://doi.org/10.1007/s11104-005-1869-4>
- Warren, J. M., Meinzer, F. C., Brooks, J. R., & Domec, J. C. (2005). Vertical stratification of soil water storage and release dynamics in Pacific Northwest coniferous forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 39–58. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.01.004>
- Wilcke, W., Oelmann, Y., Schmitt, A., Valarezo, C., Zech, W., & Homeier, J. (2008). Soil properties and tree growth along an altitudinal transect in Ecuadorian tropical montane forest. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(2), 220–230. <http://doi.org/10.1002/jpln.200625210>
- Wilcox, B. P., Breshears, D. D., & Turin, H. J. (2003). Hydraulic conductivity in a Pinon-Juniper woodland: Influence of vegetation. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1243–1249.
- WRB., I. W. G. (2015). *World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106*. Rome.
- Zehetner, F., & Miller, W. P. (2006). Soil variations along a climatic gradient in an Andean agro-ecosystem. *Geoderma*, 137, 126–134.

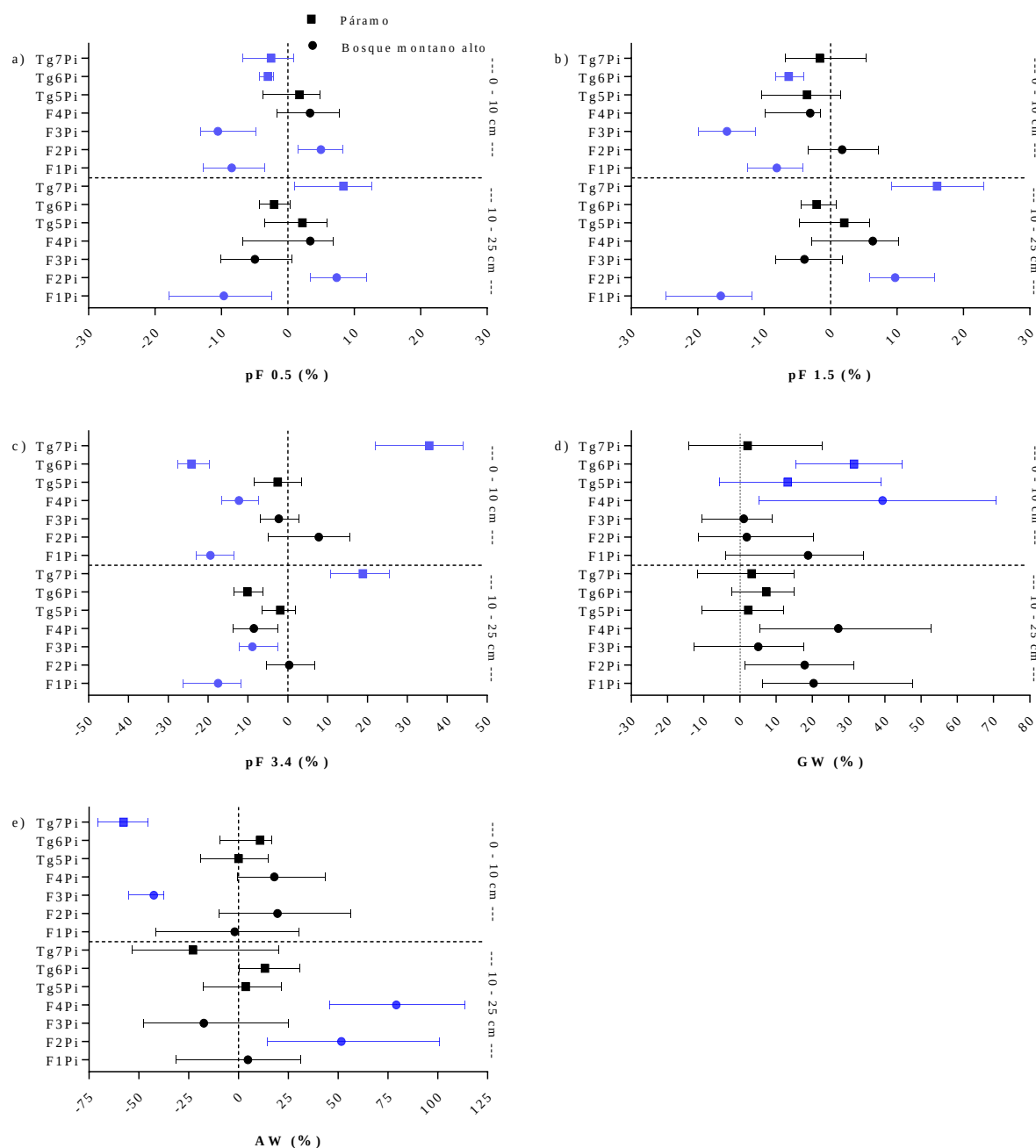
Zehetner, F., Miller, W., & West, L. (2003). Pedogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Science Society of America Journal*, 67(6), 1797–1809.

7. Anexos

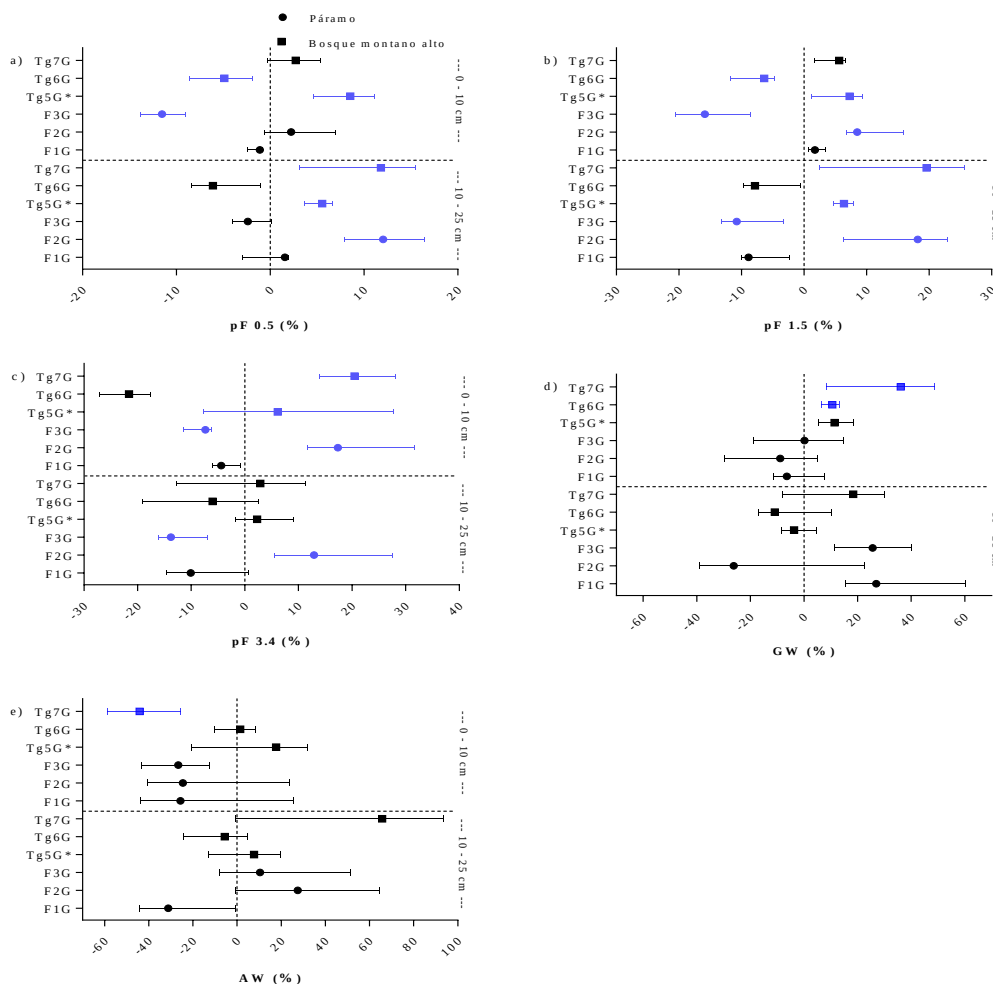
Anexo 1. Valores p de las comparaciones de las propiedades hidrofísicas entre 75 y 150 cm de distancia de muestreo en cada una de las plantaciones de pino en el área de estudio.

Elevación	<3250 m s.m.m.		>3250 - <3550 m s.m.m.			>3550 m s.m.m.	
Propiedades	F1Pi	F2Pi	F3Pi	F4Pi	Tg5Pi	Tg6Pi	Tg7Pi
K _{sat} 1	0.16	0.59	0.19	0.18	0.36	0.45	0.66
DA 1	0.62	0.82	0.92	0.76	0.92	0.79	0.91
0pF 1	0.48	0.40	0.38	0.74	0.76	0.30	0.93
0.5pF 1	0.97	0.43	0.59	0.90	0.76	0.53	0.94
1.5pF 1	0.97	0.80	0.71	0.08	0.77	0.55	0.93
2.52pF 1	0.65	0.95	0.36	0.24	0.97	0.42	0.79
3.4pF 1	0.18	0.53	0.27	0.25	0.24	0.88	0.45
4.2pF 1	0.32	0.74	0.42	0.19	0.18	0.37	0.93
GW 1	0.93	0.43	0.48	0.32	0.68	0.77	0.58
AW 1	0.80	0.71	0.20	0.81	0.52	0.59	1.00
K _{sat} 2	0.56	0.90	0.03	0.38	0.54	0.82	0.21
DA 2	0.97	0.76	0.97	0.93	0.97	0.84	0.91
0pF 2	0.98	0.74	0.60	1.00	0.97	0.76	0.89
0.5pF 2	0.92	0.66	0.51	0.92	0.90	0.82	0.84
1.5pF 2	0.90	0.58	0.74	0.88	0.92	0.95	0.78
2.52pF 2	0.66	0.34	0.68	0.79	0.80	0.87	0.94
3.4pF 2	0.88	0.03	0.19	0.69	0.68	0.77	1.00
4.2pF 2	0.60	0.14	0.93	0.25	0.76	0.12	0.58
GW 2	0.66	0.53	0.30	0.90	0.79	0.79	0.91
AW 2	0.51	0.19	0.49	0.20	0.87	0.12	0.67

Los nombres de las variables se encuentran definidos en la Tabla 3. Los valores en negrita indican que las propiedades son significativamente diferentes entre ambas profundidades ($p < 0.05$).



Anexo 2. Forestplots del cambio porcentual en las propiedades hidrofísicas del suelo a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad bajo plantaciones de pino. Capacidad de retención de agua en pF 0.5 (Figura a), pF 1.5 (Figura b), pF 3.4 (Figura c), agua gravitacional (Figura d) y agua disponible (Figura e) del horizonte superficial de los suelos. De color azul representa un cambio significativo ($p < 0.05$) en cada una de las variables. FPi= Plantación de pino en bosque montano alto, TgPi= Plantación de pino en páramo.



Anexo 3. Forestplots del cambio porcentual en las propiedades hidrofísicas del suelo a 0 – 10 y 10 – 25 cm de profundidad bajo pastoreo. Capacidad de retención de agua en pF 0.5 (Figura a), pF 1.5 (Figura b), pF 3.4 (Figura c), agua gravitacional (Figura d) y agua disponible (Figura e) del horizonte superficial de los suelos. De color azul representa un cambio significativo ($p < 0.05$) en cada una de las variables. FG= Pastoreo en bosque montano alto, TgG= Pastoreo en páramo, TgG*=Pastoreo en pajonal intervenido por quema.