

Evaluación del impacto del monocultivo de papa sobre la calidad edáfica en el Páramo de Guerrero (Cundinamarca, Colombia)

Evaluation of the impact of potato monoculture on soil quality in the Páramo de Guerrero (Cundinamarca, Colombia)

Ingrid Alexandra Triana Gasca ^{1,2}, Diego Mauricio Díaz Ramírez ^{1,3}, Victoria Vallejo Quintero ^{1,4}.

¹Universidad Central. Bogotá, Colombia. ²✉ itrianag@ucentral.edu.co, ³✉ ddiazr5@ucentral.edu.co, ⁴✉ evallejoq@ucentral.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v71n3.96989>

2022 | 71-3 p 280-286 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2021-06-29 Acep.: 2023-04-18

Resumen

En los últimos años, la expansión de la frontera agropecuaria en el Páramo de Guerrero (Colombia) ha transformado y alterado este frágil y estratégico ecosistema, afectando la prestación de bienes y servicios ambientales y disminuyendo la calidad edáfica. El presente estudio evaluó el efecto del monocultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) sobre la calidad edáfica en el Páramo de Guerrero. Para ello se comparó un conjunto total de datos (CTD) de 14 variables edáficas en tres agroecosistemas: (1) monocultivo convencional de papa (SC), (2) suelo en descanso (SD) y (3) un bosque (BO). Posteriormente, a partir del CTD se seleccionó un conjunto mínimo de datos (CMD) de 11 indicadores fisicoquímicos y microbiológicos empleados en la determinación del índice de calidad de suelos (ICS). Los mayores valores del ICS se obtuvieron en el BO (1.11) y SD (1.10), seguido del SC (1.07). Los resultados evidencian que las prácticas agrícolas implementadas en el páramo han afectado la calidad edáfica, lo cual es atribuido principalmente a menores contenidos de carbono (C) orgánico, humedad y actividad enzimática (catalasa) en el SC. Así mismo, a través de la guía diagnóstica en campo, se evidenciaron alteraciones en indicadores físicos como la resistencia al rompimiento, presencia de capas endurecidas y disminución en la velocidad de infiltración.

Palabras claves: actividad antrópica, agricultura convencional, conjunto mínimo de datos, indicadores de calidad, índice de calidad del suelo.

Abstract

Recently, the expansion of the agricultural frontier in the Páramo de Guerrero has transformed and altered this fragile and strategic ecosystem, affecting the provision of environmental goods and services, and leading to a detriment of soil quality. The present study evaluated the effect of potato monoculture (*Solanum tuberosum* L.) on soil quality in the Páramo de Guerrero. A total data set (CTD) of 14 edaphic variables in three agroecosystems was compared: (1) conventional potato monoculture (SC), (2) resting soil (SD), and (3) forest (BO). Subsequently, based on the CTD, a minimum data set (CMD) of 11 physicochemical and microbiological indicators was used in the soil quality index (ICS). The highest ICS values were obtained in BO (1.11) and SD (1.10) in comparison with SC (1.07). The results showed that agricultural practices in the Paramo have affected soil quality, mainly attributed to lower content of organic carbon (C), soil moisture and enzymatic activity (catalase) in the SC. Likewise, through the diagnostic guide in the field, alterations in physical indicators such as resistance to breakage, presence of hardened layers and decrease in infiltration speed were evidenced.

Keywords: anthropogenic activity, conventional agriculture, minimum data set, quality indicators, soil quality index.

Introducción

Los páramos son ecosistemas neotropicales entre el límite forestal superior y las nieves perpetuas; se encuentran distribuidos a lo largo de los Andes húmedos entre Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela, con extensiones hasta Costa Rica y Panamá (García *et al.*, 2019). Estos ecosistemas son fundamentales para la vida, dada su gran riqueza biológica y los numerosos servicios ecosistémicos que prestan a la sociedad (captación, almacenamiento y regulación hídrica, captura de carbono, regulación climática, formación y protección del suelo, entre otros) (Giné y Sánchez, 2016; Vargas, 2013). Sin embargo, hoy en día el cambio climático, el acelerado crecimiento poblacional y las diversas actividades económicas (agricultura, ganadería extensiva y minería) representan riesgos severos para la integridad de los páramos alrededor del mundo, ya que ejercen una enorme presión sobre los recursos naturales, lo que conduce a una pérdida de la calidad edáfica (Farfán *et al.*, 2020; Fernández *et al.*, 2019).

En Colombia, alrededor del 60 % de los páramos han sufrido procesos de transformación paisajística y ecosistémica como consecuencia de las actividades agropecuarias basadas en prácticas convencionales, entre ellas, los monocultivos de papa (*Solanum tuberosum* L.). El uso intensivo del suelo para la producción de papa (bajo el modelo de la revolución verde) ha ocasionado problemáticas ambientales como la erosión, la contaminación, la compactación, la pérdida de carbono orgánico y de biodiversidad, lo cual trae como consecuencia la degradación de los suelos (Avellaneda-Torres *et al.*, 2018; Farfán *et al.*, 2020; Fernández *et al.*, 2019; Gutiérrez *et al.*, 2020) y el deterioro de propiedades físicas, químicas y biológicas edáficas en agroecosistemas (Gutiérrez *et al.*, 2020; Vallejo-Quintero *et al.*, 2018).

La calidad del suelo (CS) en agroecosistemas ha sido evaluada y monitoreada a través de herramientas (cualitativas y cuantitativas) que incluyen, generalmente, la selección de un conjunto mínimo de indicadores (CMD) mediante modelos o procedimientos estadísticos multivariados o mediante la opinión de expertos, para finalmente realizar su respectiva puntuación e integración en índices de calidad (Maurya *et al.*, 2020; Rezaee *et al.*, 2020). Las evaluaciones de CS deben considerar indicadores físicos, químicos y biológicos, asociadas con importantes procesos del suelo, de tal modo que su interpretación se traduzca en una visión holística del estado general del suelo, permitiendo identificar fenómenos de degradación temprana, así como corroborar el mantenimiento o aumento de la CS en sistemas agrícolas sometidos a distintas prácticas de manejo (Afanador *et al.*, 2020; Maurya *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2018).

Estudios llevados a cabo por Pinzón-Pinto *et al.* (2016) en el Páramo de Guerrero evidenciaron que la agricultura y la ganadería han contribuido a una pérdida y fragmentación de la vegetación natural y a la eliminación del horizonte genético O, lo que afecta la calidad física (retención de humedad, densidad aparente, temperatura del suelo y porosidad) y química de sus suelos (disminución del contenido de materia orgánica y nutrientes). Igualmente, estudios desarrollados por Álvarez-Yela *et al.* (2017) y Avellaneda-Torres *et al.* (2018) en páramos del Parque Nacional Natural de los Nevados (Colombia) demostraron cómo la agricultura intensiva afecta la dinámica y la calidad del suelo, generando un detrimento en la diversidad y función de grupos microbianos indispensables en la dinámica de los ciclos biogeoquímicos (C y N). Se evidenció que las actividades agropecuarias alteran la estructura de la comunidad microbiana y ocasionan una pérdida de la diversidad funcional metabólica, reduciendo su resistencia al estrés ambiental. Igualmente, se observó un aumento significativo de arqueas oxidadoras de amonio, bacterias copiotróficas y hongos ascomicetos, que afectan la respuesta fisiológica y funcional del ecosistema en las áreas intervenidas. Así mismo, se encontró impacto en indicadores químicos (carbono orgánico, Ca, K, capacidad de intercambio catiónico y amonio) y actividades enzimáticas (fosfatasas, fosfodiesterasas, β -glucosidasas y proteasas).

No obstante, a pesar de las importantes funciones ecológicas que ejercen este tipo de ecosistemas, continúan siendo limitados e insuficientes los estudios que evalúen el efecto de las actividades agropecuarias sobre la CS en zonas de páramo; este tipo de estudios resultan necesarios para plantear alternativas de mitigación, recuperación y conservación del recurso del suelo. Por otro lado, el Páramo de Guerrero es el segundo en extensión, en Colombia, después del de Sumapaz, es el más intervenido por actividades antrópicas (cultivos de papa, ganadería y explotación de carbón), y presenta distintos fenómenos de degradación que han puesto en peligro la prestación de los servicios ecosistémicos relacionados con la regulación del ciclo hidrológico y el ciclaje de nutrientes.

Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto del monocultivo de papa sobre la CS en el Páramo de Guerrero, para lo cual se plantearon los siguientes objetivos específicos: (1) seleccionar un CMD y un ICS para evaluar el efecto generado por el monocultivo de papa sobre la CS y (2) evaluar la calidad física edáfica en agroecosistemas del Páramo de Guerrero a través de una guía diagnóstica de calidad en campo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El Páramo de Guerrero se localiza en la cordillera Oriental de Colombia y ocupa un área de 15 000 ha, que comprenden una franja de montaña a una altitud de 3000 a 3900 m s.n.m. (Pinzón-Pinto, 2016). Esta investigación se llevó a cabo en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca) en la vereda Páramo de Guerrero oriental y occidental (05°07'34,3" N, 74°03'6,4" W).

La precipitación es de régimen bimodal, con dos periodos húmedos (abril, mayo y parte de junio) y dos secos, el primero en diciembre, enero, febrero y marzo, y el segundo en julio, agosto y parte de septiembre, con variaciones en los valores promedios multianual entre 604.9 y 1084.5 mm (Estación Carmen de Carupa) (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Humboldt, s. f.). El Páramo de Guerrero se encuentra entre un régimen semihúmedo y húmedo, y su temperatura oscila entre 7.2 y 11.1° C (Estación Guerrero). Se seleccionó una finca representativa (15 ha) constituida por monocultivos de papa, relictos de bosque con vegetación de páramo y zonas de descanso agrícola.

Diseño experimental y muestreo de suelos

Para el muestreo se seleccionaron tres agroecosistemas: (1) monocultivo convencional de papa (*Solanum tuberosum* L.) (SC) (05°07'34,3" N, 74°03'6,4" W) de 4 años, bajo labranza convencional y aplicación periódica de agroquímicos; (2) un suelo en descanso (18 meses) (SD) (05°07'33,6" N, 74°03'6,5" W), con adiciones de semilla de avena y; (3) un relicto de bosque con vegetación de páramo (BO) (05°06'32,7" N, 74°02'6,1" W). En cada agroecosistema se establecieron dos cuadrantes (3 x 3m), en los cuales se tomaron con barrenos metálicos dos muestras compuestas aleatorias (n=2) provenientes de 25 submuestras (profundidad de 0-15 cm). Cada muestra de suelo se almacenó en bolsas ziploc debidamente rotuladas, las cuales se dividieron en dos porciones: una parte fue tamizada (2 mm) y secada a temperatura ambiente, para análisis fisicoquímicos y la otra parte fue refrigerada (4° C) para análisis microbiológicos en los laboratorios de suelo de la Universidad Central.

Guía diagnóstica *in situ* para la evaluación de la calidad física

Como parte de la evaluación de la calidad de suelos en el Páramo, se implementó la guía de calidad física del suelo desarrollada por Vallejo-Quintero *et al.* (2021). La guía considera indicadores en campo (velocidad de infiltración, resistencia a la penetración, estructura

del suelo, consistencia del suelo, color, porosidad del suelo, resistencia al rompimiento), los cuales cuentan con una puntuación (menos deseable = 0, moderada = 1, preferido = 2) en función de su desempeño.

Métodos fisicoquímicos y microbiológicos

Se seleccionó un CTD de 14 propiedades físicas (textura, densidad real y aparente, porosidad, humedad y agregados estables en seco: índice de estabilidad de agregados, agregados estables y diámetro geométrico medio); químicas (pH, carbono orgánico y conductividad eléctrica); microbiológicas (densidad de hongos y heterótrofos totales); y bioquímicas (actividad de catalasa), cuyos métodos fueron descritos por Vallejo-Quintero *et al.* (2018) y por Afanador *et al.* (2020).

Análisis estadístico

Se realizó una prueba estadística de Shapiro-Wilk para determinar la distribución normal de los datos. Se empleó el análisis de varianza (ANOVA) ($P \leq 0.05$) para comparar las 14 variables fisicoquímicas y microbiológicas seleccionadas, así mismo, se realizó un análisis de comparaciones múltiples (Tukey) para identificar diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre los agroecosistemas mediante el *software* estadístico SPSS v.s 25[®].

Selección del conjunto mínimo de datos (CMD)

Para la selección del CMD se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con las 14 variables estudiadas, empleando el programa estadístico Paleontological Statistics (PAST), versión 2.16, con una matriz de datos estandarizada (matriz de correlación). Para la conformación del CMD, se seleccionaron los componentes principales (CP) que tuvieron valores propios (*eigenvalues*) ≥ 1 , así como aquellos que explicaron al menos el 5 % de la varianza total del CTD. En cada CP se extrajeron las variables que presentaron un peso (valor de carga) ≥ 0.65 . El CMD quedó conformado por aquellas variables que mejor explicaron la variabilidad total con respecto a todas las propiedades inicialmente seleccionadas (Afanador *et al.*, 2020).

Índice de calidad de suelo (ICS)

Después de determinar las variables del CMD se calculó el ICS y cada variable fue transformada y normalizada en valores sin unidad entre 0 y 1, empleando funciones lineales. La técnica de indexación utilizada fue el IC aditivo ponderado propuesto por Karlen y Stott, (1994), la cual ha sido ampliamente utilizada por Chen *et al.* (2013); Nabiollahi *et al.* (2017); y Yu *et al.*, (2018). El procedimiento detallado del cálculo

del ICS es descrito por Afanador *et al.* (2020). Las calificaciones previamente establecidas para los indicadores se integraron en la siguiente ecuación (1):

$$ICS = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (\text{Ec 1})$$

Resultados y discusión

Efecto de las prácticas de manejo agrícolas en las propiedades de suelo

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la guía diagnóstica de calidad física, se evidenció que el SC tuvo valores bajos con relación a las variables: resistencia al rompimiento, capas endurecidas y velocidad de infiltración (Tabla 1), y presentó, en términos generales, una menor calidad física del suelo (calificación de 22) en comparación con SD y BO (Tabla 1).

Los resultados evidenciados en el SC, con relación al comportamiento de dichas variables físicas en campo, se asocian a las prácticas de manejo implementadas por décadas en los cultivos de papa, principalmente, la labranza convencional y el limitado aporte de material orgánico al suelo, lo cual impacta la condición física de este. Lo anterior demuestra, al igual que investigaciones desarrolladas por Cherubin *et al.* (2019), la importancia de implementar e incluir este tipo de guías en campo, dada su fácil ejecución e interpretación y rápida determinación, pues permiten identificar señales tempranas de degradación edáfica y monitorear procesos de recuperación de suelos, cuyos efectos, en algunas ocasiones, no son rápidamente identificables por propiedades medibles en laboratorio.

Por otra parte, del CTD de 14 propiedades edáficas evaluadas, se evidenciaron diferencias significativas (ANOVA $P \leq 0.05$) con respecto a las variables: humedad (H), pH, carbono orgánico (CO), densidad de heterótrofos (HET) y actividad enzimática de catalasa (CAT) (Tabla 2).

En el presente estudio, la H fue significativamente mayor en el BO (32.68 %), en comparación con el SC y SD (Tabla 2) (Tukey $P \leq 0.05$). Los resultados concuerdan con Daza *et al.* (2014) y Camargo-García

et al. (2012), quienes evidenciaron valores de H en un rango entre 26.8 % y 37.0 % en suelos del Páramo de Sumapaz con vegetación nativa y de 29.5 a 36.2 % en páramos del Parque Nacional Natural de Los Nevados. Los mayores porcentajes de H encontrados en el BO pueden asociarse al origen (glaciar y volcánico) de los suelos de páramos en Colombia, que están caracterizados por contener valores altos de materia orgánica (MO) que se mineraliza lentamente en bajas temperaturas. La combinación MO-cenizas volcánicas y el tipo de vegetación (musgos, líquenes y frailejones) que contribuye a la formación de una espesa y permanente cobertura orgánica del suelo, junto con las condiciones climáticas en estos ecosistemas, favorecen las condiciones de humedad del suelo y su capacidad de retención de agua (Vargas, 2013).

Por otra parte, los bajos valores de H del SC concuerdan con lo reportado por Farfán *et al.* (2020) en suelos bajo cultivo de papa en el páramo neotropical alto andino (Colombia); lo cual fue asociado al ingreso limitado de material orgánico al suelo en los monocultivos, de forma tal que el suelo permanece expuesto a la radiación solar, incrementando la evaporación en la superficie y limitando su capacidad para retener humedad.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas y microbiológicas evaluadas en los agroecosistemas

Propiedad	Agroecosistemas		
	SC	SD	BO
Textura	Arena (77.5 %)	Arena (73.7 %)	Arena (73.3 %)
	Limos (12.5 %)	Limo (14.4 %)	Limos (16.7 %)
	Arcilla (10.8 %)	Arcilla (7.5 %)	Arcillas (4.2 %)
	Franco arenoso	Franco arenoso	Franco arenoso
IE (%)	2.48 a	2.20 a	2.18 a
EA (%)	84.40 a	78.21 a	85.42 a
DGM (mm)	0.57 a	0.47 a	0.62 a
DPM (mm)	1.53 a	1.28 a	1.67 a
H (%)	20.81 a	31.54 b	32.69 b
DA (g/cm ³)	0.77 a	0.86 a	0.88 a
PO (%)	33.16 a	29.75 a	21.54 a
RP (MPa)	1.28 a	1.56 a	1.11 a
CE (DS/m)	0.03 a	0.05 a	0.04 a
pH	4.39 b	4.18 b	3.66 a
CO (%)	5.18 a	9.32 b	6.61 a
HET (Log UFC/g)	4.11 b	3.74 a	3.84 a
HOT (Log UFC/g)	3.50 a	3.35 a	3.27 a
CA (mmoles de H ₂ O ₂ consumidos /g ² h)	0.16 a	0.39 b	0.41 b

*IE= Índice de Estabilidad; EA= Estabilidad de Agregados; DGM= Diámetro Geométrico Medio; DPM= Diámetro Ponderado Medio; H= Humedad; DA= Densidad Aparente; PO= Porosidad; RP= Resistencia a la Penetración; CE= Conductividad Eléctrica; pH; CO= Carbono Orgánico; HET= Heterótrofos; HOT= Hongos Totales; CAT= Catalasa. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los agroecosistemas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Tabla 1. Puntajes asignados a los indicadores físicos a través de la guía diagnóstica de CS

Indicadores cualitativos	SC	SD	BO
Estructura y consistencia	2	2	2
Porosidad	2	2	2
Resistencia al rompimiento	1	2	1
Capas endurecidas	1	0	2
Velocidad de infiltración	1	2	2
Color	2	2	2
Calificación CS	22	24	26

Con relación a los valores de pH, estos fueron significativamente menores en el BO (3.66) (Tabla 2) (Tukey $P \leq 0.05$), y fueron similares a los reportados por Díaz-Granados *et al.* (2005) y Fernández *et al.* (2019). Los autores destacan que los suelos de páramos colombianos son generalmente de origen volcánico y se caracterizan por ser húmedos y ácidos, con valores de pH entre 3.9 y 5.4. El carácter ácido predominante en sus suelos favorece la formación de complejos de humus-Al; complejos que predominan en el horizonte A de la mayoría de los páramos colombianos de origen volcánico. Avellaneda-Torres *et al.* (2018) y Pinzón-Pinto (2016) reportaron valores de pH de 5.3 en suelos de ecosistemas neotropicales de páramos altoandinos en el Parque Natural Nacional de los Nevados y de 4.2 a 4.8 en horizontes genéticos O y A de suelos con vegetación natural en el Páramo de Guerrero (Colombia), respectivamente.

Con respecto al porcentaje de CO, este fue significativamente mayor en SD (9.32 %) (Tukey $P \leq 0.05$) en comparación con el SC y BO (Tabla 2). Los mayores valores de CO podrían asociarse con las actividades implementadas durante el periodo de descanso y recuperación del suelo, específicamente, la adición de la semilla de avena, lo cual contribuye a una mejoría en indicadores específicos del suelo. Los porcentajes de CO encontrados en el BO (6.61 %) son similares a los reportados por Fernández *et al.* (2019) en suelos con vegetación nativa en el Páramo de Rabanal (Boyacá), con valores de CO entre 6.59 y 7.54 %.

Con relación a la densidad de HET, el SC presentó valores significativamente mayores ($P \leq 0.05$) en el SC (4.11 Log UFC/g_{ps}) (Tabla 2). Lo anterior podría asociarse con las prácticas de manejo implementadas en el monocultivo de papa, particularmente con las operaciones de labranza y los agroquímicos adicionados al suelo. Es bien conocido que la labranza a baja escala incrementa la aireación y acelera la descomposición de los residuos orgánicos, ocasionando un aumento en la disponibilidad de nutrientes que favorece la densidad de microorganismos edáficos. Avellaneda-Torres *et al.* (2020) evidenciaron cambios en la estructura y composición de las comunidades microbianas en suelos de páramos (Parque Nacional de los Nevados) cultivados con papa y bajo ganadería, sin embargo, los cambios dependieron de la elevación y las condiciones climáticas, siendo mayor la riqueza microbiana en los suelos cultivados.

Contrariamente, otros autores han reportado que la labranza convencional genera un detrimento en la abundancia de microorganismos del suelo, lo cual estaría asociado al disturbio físico del suelo, la compactación, la variación en las condiciones de humedad y la disponibilidad de nutrientes, así como al intercambio gaseoso; ello, conjuntamente, altera su densidad y actividad (Choudhary *et al.*, 2018; Moreno *et al.*, 2021). No obstante, en el presente estudio no

hubo diferencias significativas en la mayoría de las variables físicas evaluadas en laboratorio (IE, EA, DGM, DPM, DA, RP y PO), las cuales se relacionan con una condición física y con el grado de compactación del suelo. Farfán *et al.* (2020) evidenciaron una disminución en la densidad de bacterias y hongos celulíticos en suelos de páramo neotropical alto andino (Colombia) disminución que está asociada con la aplicación de insumos químicos agrícolas.

Por su parte, la actividad enzimática de CAT presentó un comportamiento opuesto a la densidad de HET, siendo significativamente menor en el SC (0.16) (Tabla 2). Lo anterior podría relacionarse con la aplicación de pesticidas a largo plazo, lo que genera un impacto negativo en las actividades enzimáticas del suelo (Farfán *et al.*, 2020). La actividad de CAT suele emplearse como un importante indicador de calidad edáfica debido a su alta sensibilidad a los cambios en el uso y manejo del suelo (Romeo *et al.*, 2020; Vallejo-Quintero *et al.*, 2018). En el presente estudio, los menores valores de H (20.81 %) y de CO (5.18 %) encontrados en el SC podrían haber afectado dicha actividad; este resultado es similar a lo reportado por Avellaneda-Torres *et al.* (2018).

Selección del CMD para la evaluación de la CS

La selección de indicadores para el CDM se realizó a partir de un CTD de 14 indicadores a través de PAST, de los cuales quedaron 11 variables: DA, PO, H, CO, RP, IE, EA, DPM, DGM, HET y HOT (Tabla 3). El ACP indicó que el 72.381 % de las diferencias evidenciadas entre las propiedades estudiadas pueden ser explicadas en un 32.54 % por el componente uno, un 23.72 % por el componente dos y un 16.12 % por el componente tres. Los tres primeros CP se seleccionaron al presentar valores propios ≥ 1 . De los tres CP seleccionados, solo los parámetros con mayores valores de carga (≥ 0.65) se reunieron para la indexación. Para el CP1 se seleccionaron: PO, H, EA, DPM, DGM y HOT; para el CP2: CO, RP y HET; y para el CP3: DA y EA (Tabla 3).

De los indicadores seleccionados para el CDM, específicamente, H, CO, RP, EA, DPM, DGM, IE, PO, HET y HOT concuerdan con los reportados por Afanador-Barajas *et al.* (2020) y Vallejo-Quintero *et al.* (2018) en agroecosistemas en el municipio de Cachipay (Cundinamarca), quienes seleccionaron 6 de los 11 indicadores trabajados en el presente estudio (EA, DPM, DGM, H y HET). El CMD seleccionado en este estudio puede ser utilizado para hacer un seguimiento periódico de los cambios en la CS en áreas protegidas, como páramos, que han sido afectadas por actividades antrópicas, en lugar de utilizar un CTD, ya que ahorra tiempo y gastos en programas de monitoreo.

Tabla 3. ACP para la selección del CMD

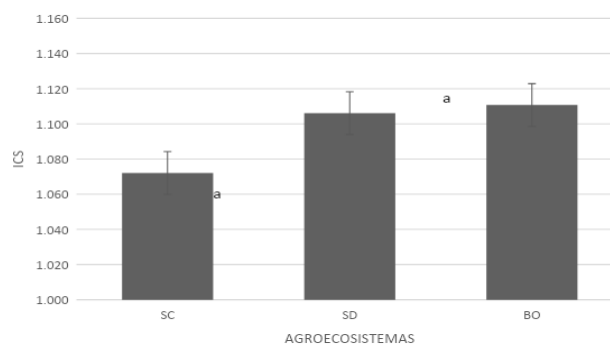
	CP1	CP2	CP3
Valores propios	4.56	3.32	2.26
Varianza	32.54 %	23.72 %	16.12 %
Varianza acumulada	72.381 %		
DA	0.21	-0.09	0.84
PO	-0.79	0.18	-0.45
H	0.66	0.48	0.11
CE	0.12	0.60	0.54
PH	-0.61	-0.23	0.17
CO	-0.17	0.74	0.31
RP	0.08	0.68	0.18
IE	0.40	-0.45	0.65
EA	0.85	-0.41	0.14
DPM	0.82	-0.28	-0.39
DGM	0.80	-0.28	-0.39
HET	-0.25	-0.79	0.23
HOT	-0.74	-0.44	0.17
CAT	0.24	0.55	-0.26

Comparación de la calidad del suelo mediante el IC

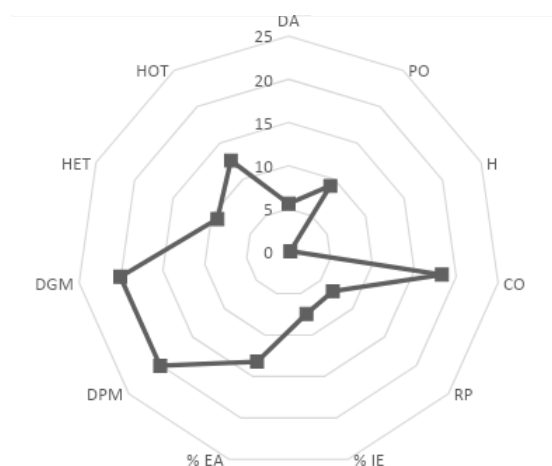
Con relación al ICS, este fue mayor en el BO (1.11) y SD (1.10) y, por último, el SC (1.07), sin embargo, no hubo diferencias significativas entre ellos (Figura 1). Las variables que tuvieron mayor contribución al ICS fueron DPM (20.08 %), DGM (20.08 %), CO (18.31 %), EA (13.22 %), HOT (12.60 %), HET (9.23 %), PO (9.11 %), IE (7.45 %), RP (6.92 %), DA (5.61 %) y H (0.23 %) (Figura 1). La tendencia evidenciada en el ICS es consistente con Zou *et al.* (2021), quienes reportaron menores valores del ICS en monocultivos de caucho (*Hevea brasiliensis*) en comparación con sistemas agroforestales y bosques, lo cual está asociado a una significativa pérdida de nutrientes del suelo.

Conclusiones

El CMD seleccionado en el presente estudio permitió identificar 11 variables fisicoquímicas y microbiológicas (DA, PO, H, CO, RP, IE, EA, DPM, DGM, HET y HOT) altamente sensibles a las prácticas agrícolas del páramo. A su vez, el IC fue menor en el SC, en comparación con el SD y B, además, es relevante que estos dos últimos tuvieron índices muy similares, lo que refleja una progresiva recuperación del suelo previamente cultivado; posiblemente dicha recuperación se debe a la adición de materiales orgánicos al suelo, como la semilla de avena. Por su parte, la guía diagnóstica de calidad del suelo permitió identificar señales físicas de degradación del suelo, las cuales no fueron evidenciadas a través de los indicadores físicos ejecutados en laboratorio.

**Figura 1.** Valores del índice de calidad del suelo en los agroecosistemas comparados.

*SC= suelo cultivado, SD= Suelo en descanso, BO= Bosque



DA= Densidad Aparente; PO= Porosidad; H= Humedad; CO=Carbono Orgánico; RP= Resistencia a la Penetración; IE= Índice de Estabilidad; EA= Estado de Agregación; DPM= Diámetro Pandeado Medio; DGM= Diámetro Geométrico Medio; HET= Heterótrofos Totales y HOT= Hongos Totales.

Figura 2. Contribución relativa (porcentaje) de los indicadores al índice de calidad del suelo.

Referencias

- Afanador-Barajas, L. N.; Coca, A.; Giraldo, F.; Bautista, F.; Mendoza, A. y Vallejo-Quintero, V. (2020). Evaluación de la calidad de suelos en agroecosistemas de Colombia a través de la selección de un conjunto mínimo de datos. *Colombia Forestal*, 23(1), 35-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.14483/2256201X.14856>
- Álvarez-Yela, A. C.; Álvarez-Silva, M. C.; Restrepo, S.; Husserl, J.; Zambrano, M. M.; Danies, G.; Gómez, J. M. y González-Barrios, A. F. (2017). Influence of agricultural activities in the structure and metabolic functionality of paramo soil samples in Colombia studied using a metagenomics analysis in dynamic state. *Ecological Modelling*, 351, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.010>
- Avellaneda-Torres, L. M.; Sicard, T. L.; Castro, E. G. y Rojas, E. T. (2020). Potato cultivation and livestock effects on microorganism functional groups in soils from the neotropical

- high Andean Páramo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0190122. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190122>
- Avellaneda-Torres, L. M.; León-Sicard, T. E. y Torres-Rojas, E. (2018). Impact of potato cultivation and cattle farming on physicochemical parameters and enzymatic activities of Neotropical high Andean Páramo ecosystem soils. *Science of the Total Environment*, 631-632, 1600-1610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.137>
- Camargo-García, J. C.; Dossman, M. Á.; Rodríguez, J. A.; Arias, L. M. y Galvis-Quintero, J. H. (2012). Cambios en las propiedades del suelo, posteriores a un incendio en el Parque Nacional Natural de Los Nevados, Colombia. *Acta Agronómica*, 61(2), 151-165. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122012000200008&lng=en&tlng=es
- Chen, Y. D.; Wang, H. Y.; Zhou, J. M.; Xing, L.; Zhu, B. S.; Zhao, Y. C. y Chen, X. Q. (2013). Minimum data set for assessing soil quality in farmland of northeast China. *Pedosphere*, 23(5), 564-576. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60050-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60050-8)
- Cherubin, M. R.; Chavarro-Bermeo, J. P. y Silva-Olaya, A. M. (2019). Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93(5), 1741-1753. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>
- Choudhary, M.; Datta, A.; Jat, H. S.; Yadav, A. K.; Gathala, M. K.; Sapkota, T. B.; Das, A. K.; Sharma, P. C.; Jat, M. L.; Singh, R. y Ladha, J. K. (2018). Changes in soil biology under conservation agriculture based sustainable intensification of cereal systems in Indo-Gangetic Plains. *Geoderma*, 313, 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.041>
- Daza, M.; Hernández, F. y Triana, F. (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. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v67n1.42642>
- Díaz-Granados, M.; Navarrete, J. y Suárez, T. (2005). Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*, 22, 64-75. <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista>
- Farfán, M. -A.; Forero, S. -M. y Avellaneda-Torres, L. M. (2020). Evaluation of impacts of potato crops and livestock farming in Neotropical high Andean Páramo soils, Colombia. *Acta Agronómica*, 69(2), 106-116. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n2.82206>
- Fernández, C. J.; Cely, G. E. y Serrano, P. A. (2019). Cuantificación de la captura de carbono y análisis de las propiedades del suelo en coberturas naturales y una plantación de pino en el páramo de Rabanal, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 121-133. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.66152>
- García, V. J.; Márquez, C. O.; Isenhardt, T. M.; Rodríguez, M.; Crespo, S. D. y Cifuentes, A. G. (2019). Evaluating the conservation state of the páramo ecosystem: An object-based image analysis and CART algorithm approach for central Ecuador. *Heliyon*, 5(10), E02701. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02701>
- Giné, D. S. y Sánchez, R. G. (2016). The Andean Páramo: Geographic characterization and state of their environment. An interdisciplinary contribution. *Estudios Geográficos*, 76(278), 369-393. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201513>
- Gutiérrez, J.; Ordoñez, N.; Bolívar, A.; Bunning, S.; Guevara, M.; Medina, E.; Olivera, C.; Olmedo, G.; Rodríguez, L.; Sevilla, V.; y Vargas, R. (2020). Estimación del carbono orgánico en los suelos de ecosistema de páramo en Colombia. *Ecosistemas*, 29(1), 1-10. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1855>
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (s. f.). Páramos y sistemas de vida: Guerrero. <http://www.humboldt.org.co/es/i2d/item/557-paramos-y-sistemas-de-vida-guerrero>
- Karlen, D. L., and D. E. Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J. W., D. C. Coleman, D. F. Bzedicek, and B. A. Stewart (eds). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Sc. Soc. Am. (Special Publication, 35), Madison, USA. pp: 53-72.
- Moreno, M. V.; Casas, C.; Biganzoli, F.; Manso, L.; Silvestro, L. B.; Moreira, E. y Stenglein, S. A. (2021). Cultivable soil fungi community response to agricultural management and tillage system on temperate soil. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(4), 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.01.008>
- Nabiollahi, K.; Taghizadeh-Mehrjardi, R.; Kerry, R. y Moradian, S. (2017). Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 83, 482-494. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.001>
- Pinzón-Pinto, A. (2016). Efecto en las propiedades físicas de un suelo de páramo por la acción antrópica. *Suelos Ecuatoriales*, 46, 51-58. http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/61
- Rezaee, L.; Moosavi, A. A.; Davatgar, N. y Sepaskhah, A. R. (2020). Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators*, 117, 106566. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106566>
- Romeo, F.; Settineri, G.; Sidari, M.; Mallamaci, C. y Muscolo, A. (2020). Responses of soil quality indicators to innovative and traditional thinning in a beech (*Fagus sylvatica* L.) forest. *Forest Ecology and Management*, 465, 118106. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118106>
- Vallejo-Quintero, V. E.; Navarro-Plazas, L. P. y Ardila-García, V. (2021). Evaluación de la calidad física de suelos. Guía in situ para la evaluación de calidad física de suelos en agroecosistemas del campo experimental CETA, Cachipay (Cundinamarca). Bogotá: Ediciones Universidad Central. <https://doi.org/10.30578/c.suelos.2021>
- Vallejo-Quintero, V.; Afanador, L. N.; Hernández, M. A. y Parra, C.. (2018). Efecto de la implementación de diferentes sistemas agrícolas sobre la calidad del suelo en el municipio de Cachipay, Cundinamarca, Colombia. *Bioagro*, 30(1), 27-38. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612018000100003&lng=es&tlng=es
- Vargas, O. (2013). Disturbios en los páramos andinos. En J. Cortés y Sarmiento, *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana: memorias del proceso de definición de criterios para la delimitación de páramos* (pp. 39-57). Bogotá: Ministerio de Ambiente e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Yu, P.; Han, D.; Liu, S.; Wen, X.; Huang, Y. y Jia, H. (2018). Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. *Catena*, 171, 280-287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.021>
- Zou, X.; Zhu, X.; Zhu, P.; Singh, A. K.; Zakari, S.; Yang, B.; Chen, C. and Liu, W. (2021). Soil quality assessment of different Hevea brasiliensis plantations in tropical China. *Journal of Environmental Management*, 285, 112147. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112147>