



Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana

Carlos Bravo¹; Bolier Torres¹; Reinaldo Alemán¹; Haideé Marín¹; Galo Durazno¹; Henry Navarrete¹; Eberto Tuniesky Gutiérrez¹; Aracely Tapia²

Recibido: 9 de octubre del 2016/ Enviado a evaluar: 3 de diciembre del 2016/ Aceptado: 24 de mayo del 2017

Resumen. El presente trabajo muestra los resultados del impacto de diferentes sistemas de producción sobre la calidad y el potencial de erosión del recurso suelo en dos pisos altitudinales de la provincia de Napo, Ecuador. Para este propósito, se han utilizado parámetros morfológicos e índices estructurales de suelo y la técnica de evaluación multivariada mediante un análisis de componentes principales categórico. En general, los suelos presentaron clases texturales arcillosas y arcillo limosas con predominancia de materiales finos principalmente limo y arcilla, lo cual le proporcionan una mayor susceptibilidad a distintos procesos de degradación física, tales como sellado y encostrado superficial, erosión, compactación. El análisis de componente principales categórico permitió agrupar los sistemas de producción en función del piso altitudinal y diferentes parámetros indicando que la densidad aparente, el carbono orgánico, número de surcos y el % de pendiente son las variables que definen la calidad del suelo y su potencial de erosión.

Palabras claves: Ganadería; uso de la tierra; degradación; erosión; indicadores; componentes principales.

[en] Morphological and structural indicators of quality and potential of soil erosion under different land uses in the Ecuadorian Amazon

Abstract. This paper shows the results of the impact of different production systems on the quality and potential erosion of soil resources along two elevational gradients, Napo province, Ecuador. For this purpose, we used multivariate technique structural and morphological parameters evaluation indices soil and by analysis of categorical principal components. In general, soils presented clayey textural classes and silty clay, with predominantly fine materials, which will provide greater susceptibility to different physical degradation processes, such as surface sealing and crusting, erosion, compaction. The analysis of categorical principal component allowed to group production systems based on the elevational gradients and different parameters, indicating that the bulk density, total organic carbon, number of rill and % slope are the variables that define the quality of soil and its erosion potential.

Key words: livestock; land use; degradation; erosion; indicators; component analysis.

¹ Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador
E-mail: g12brmec@gmail.com; cbravo@uea.edu.ec

² Universidad Andina Simón Bolívar. Quito, Ecuador

[fr] Indicateurs morphologiques et structurelles de la qualité et le potentiel de l'érosion des sols dans les utilisations des terres en Amazonie équatorienne

Résumé. Cet article présente les résultats de l'impact des différents systèmes de production sur la qualité et le potentiel d'érosion des sols à deux niveaux altitudinaux dans la province de Napo, Equateur. A cet effet, nous avons utilisé des paramètres morphologiques et des indices structuraux du sol ainsi que la technique d'évaluation multivariée d'analyse en composantes principales. En général, les sols ont présenté des classes de texture argileuses et argilo-limoneuses avec une prédominance des matériaux fins, essentiellement limons et argiles, ce qui leur fournit une sensibilité accrue aux divers procédés de dégradation physique, tels que les soudures et croûtes superficielles, l'érosion et le compactage. L'analyse en composantes principales a permis de regrouper des systèmes de production sur la base de paramètres altitudinaux et différents paramètres indiquant la densité apparente, le carbone organique, le nombre de rainures et le pourcentage de pente sont les variables qui déterminent la qualité du sol et de son potentiel d'érosion.

Mots clés: du bétail, l'utilisation des terres, la dégradation, l'érosion, les indicateurs analyse des composants.

Cómo citar. Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Marín, H., Durazno, G., Navarrete, H., Tuniesky Gutiérrez, E. y Tapia, A. (2017): Indicadores morfológicos y estructurales de calidad y potencial de erosión del suelo bajo diferentes usos de la tierra en la Amazonía ecuatoriana. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 37(2), 247-264

Sumario. 1. Introducción. 2. Materiales y métodos. 2.1. Área de estudio: Reserva de Biosfera SUMACO (RBS). 2.2. Muestreo de campo. 2.3. Evaluación de variables morfológicas, estructurales, químicas y topográficas. 3. Resultados y discusión. 3.1. Variables morfológicas y topográficas en diferentes sistemas de producción y bosque. 3.2. Análisis de componentes principales categóricos con escalamiento óptimo. 4. Conclusiones. 5. Referencias bibliográficas.

1. Introducción

El Centro-Norte de la Amazonía Ecuatoriana, es considerada una de las zonas tropicales de gran concentración de biodiversidad a nivel global (Myers, 1990). Dicha zona forma parte de las áreas de amortiguamiento y transición de la Reserva de Biosfera Sumaco (RBS) con una superficie de 931.930 hectáreas, sitio que en el año 2000 ha sido reconocido por la UNESCO por medio del programa El Hombre y la Biosfera (Torres *et al.*, 2014). Esta categoría muestra a la RBS como un lugar especial donde se debe demostrar la relación entre el desarrollo humano y la naturaleza (UNESCO, 1996). En este marco, en la declaración de la RBS se planteó como objetivo principal, mejorar la calidad de vida en términos de sistemas productivos sostenibles a nivel local mientras se fomenta la conservación de los recursos naturales (Valarezo *et al.*, 2002).

En el contexto de los sistemas ganaderos, en el año 2008, un estudio multitemporal reveló que alrededor de un millón de hectáreas que comprende la RBS, el 8,35% se correspondieron con sistemas de ganadería con pastos en monocultivos y parches de sistemas silvopastoriles con árboles esporádicos (MAE/GTZ, 2008). No obstante, para el año 2013, estos mismos sistemas alcanzaron el 9,40% de toda la superficie de la

RBS (MAE y GIZ, 2013), lo que demuestra que en estos cinco años 9000 hectáreas fueron convertidas en áreas con pastos, sugiriendo que los sistemas ganaderos son la principal actividad productiva en la RBS (Torres *et al.*, 2014).

Dado el avance de los sistemas ganaderos en la RBS, es necesario determinar las variables que contribuyan a mejorar la calidad del suelo y evitar los procesos erosivos desde una visión sistemática, considerando al recurso suelo como un componente fundamental del proceso productivo a nivel de finca (Bravo *et al.*, 2015; Ashman y Puri, 2001). Bajo esta perspectiva, el suelo es un sistema vivo, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es clave para la producción de alimentos y para el mantenimiento de la calidad ambiental a escalas local, regional y global (Gliessman, 2007). Como recurso natural dinámico, el suelo puede ser degradado debido a su uso inadecuado por los seres humanos. En esta condición, el ejercicio de sus funciones básicas es gravemente afectado, causando interferencias perjudiciales en el equilibrio ambiental, y reduciendo drásticamente la calidad de vida en los ecosistemas (Valmiqui *et al.*, 2007).

Desde el punto de vista de la calidad y seguridad del suelo su papel está anclado a las funciones o desafíos globales así como a los servicios que presta a los humanos (Bravo, 2014; McBratney *et al.*, 2013), entre ellas: a) medio para el desarrollo de las plantas o producción de biomasa, b) componente del ciclo hidrológico y regulador de los suministros de agua, c) hábitat y proveedor de energía y reciclaje de nutrientes para organismos, d) agente almacenador, degradador, desintoxicador de sustancias, e) medio que provee soporte a estructuras tales como edificios, puentes, casas, caminos, f) elemento de nuestra herencia cultural que contiene restos paleontológicos y arqueológicos importantes para conservar la historia de la tierra y de la humanidad. Todo ello de gran utilidad como base para la aplicación de buenas prácticas y propiciar un adecuado manejo y conservación (Bronick and Lal, 2005).

La morfología de suelo considera un conjunto de atributos observables en campo, tanto en superficie como en el perfil del suelo, que permiten reconstruir los procesos edafogenéticos, las condiciones del medio y en muchos casos interpretar y predecir el comportamiento de las plantas y la respuesta del suelo frente a la introducción de manejos o cambios de uso de la tierra (FAO, 2009). Los atributos observables generalmente descritos incluyen: composición, forma, estructura del suelo, organización del suelo, color y moteados, distribución radicular, poros, evidencia de materiales traslocados como carbonatos, hierro, manganeso, carbono, arcilla, consistencia del suelo, entre otros (Casanova, 2005).

La estructura del suelo se considera un factor clave en el funcionamiento del mismo debido a su capacidad de soportar la vida vegetal y animal, y moderar la calidad ambiental (Bronick y Lal, 2005). La mayoría de los estudios sobre evaluaciones visuales de la estructura del suelo en campo han sido aplicadas en condiciones de clima templado (Guimaraes *et al.*, 2013; McKenzie, 2013; Mueller *et al.*, 2013; Munkholm *et al.*, 2013; Murphy *et al.*, 2013; Newel-Price, *et al.*, 2013) y pocas en condiciones tropicales (Pulido *et al.*, 2014) y subtropicales (Balarezo Giarola *et al.*, (2013). A pesar de ello, estos autores describen el método como suficientemente sensible para identificar cambios en la calidad estructural de distintos

órdenes de suelo (Ultisoles, Oxisoles, Molisoles, Alfisoles) y bajo diferentes manejos del suelo.

Al respecto, se ha encontrado que las puntuaciones obtenidas por los métodos visuales de variables medidas en campo se relacionan adecuadamente con propiedades físicas o indicadores de la calidad del suelo medidos en el laboratorio (Pulido *et al.*, 2014). En suelos tropicales de Venezuela se ha reportado una alta correlación entre las puntuaciones de evaluación visual y las propiedades físicas del suelo tales como la densidad aparente (D_a), porosidad, carbono orgánico del suelo (COS), y la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) (Pulido *et al.*, 2014). Como se ha señalado para suelos de clima templado un pobre estado visual de la estructura del suelo se correspondió con valores de densidad aparente superiores a 1.4 Mg m^{-3} , porosidad menor de $0,5 \text{ m}^{-3}\text{m}^{-3}$, COS por debajo de 25 g kg^{-1} y valores de K_{sat} por debajo de $0,5 \text{ cm h}^{-1}$.

Los sistemas de manejo influyen de manera importante en el comportamiento estructural del suelo ya que puede ser modificado, bien sea mejorando su condición o degradándolo (Bravo, *et al.*, 2015). En este sentido los sistemas silvopastoriles cumplen un papel multifuncional, en tanto que su adopción implica cambios favorables simultáneos en varios componentes y procesos agroecológicos (Gliessman, 2007; Altieri y Nicholls, 2013;). Por ejemplo, la cobertura que ofrece la hojarasca y las especies arbóreas que forman parte de estos sistemas actúan simultáneamente sobre procesos y componentes claves de los sistemas de producción ya que pueden incrementar la entomofauna benéfica, activar la biología del suelo, mejorar el nivel de materia orgánica y con eso la fertilidad y la optimización de los regímenes de temperatura y humedad del suelo (Nieto y Caicedo, 2012; Vallejo *et al.*, 2013). También pueden reducir procesos de degradación física como la erosión hídrica, compactación, sellado y encostrado superficial, entre otros (Bravo, *et al.*, 2015).

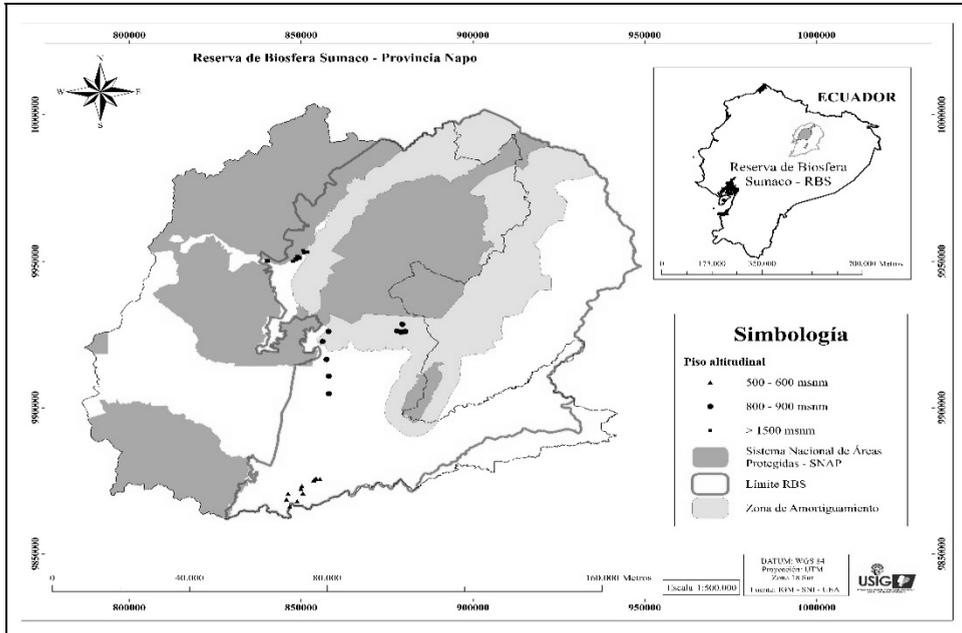
En este contexto, el objetivo de esta investigación consistió en evaluar el impacto de diferentes sistemas de producción sobre los parámetros morfológicos, estructurales y topográficos como indicadores de calidad y potencial de erosión del recurso suelo mediante el análisis de componente principal categórico en dos pisos altitudinales de la provincia de Napo, Ecuador.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio: Reserva de Biosfera SUMACO (RBS)

Para este estudio se seleccionaron distintas fincas relacionadas con sistemas de producción agropecuarios principalmente de uso ganadero y bosques secundarios localizados en dos pisos climáticos de la provincia de Napo, Reserva de Biosfera Sumaco (RBS), Ecuador (Figura 1), descritos como:

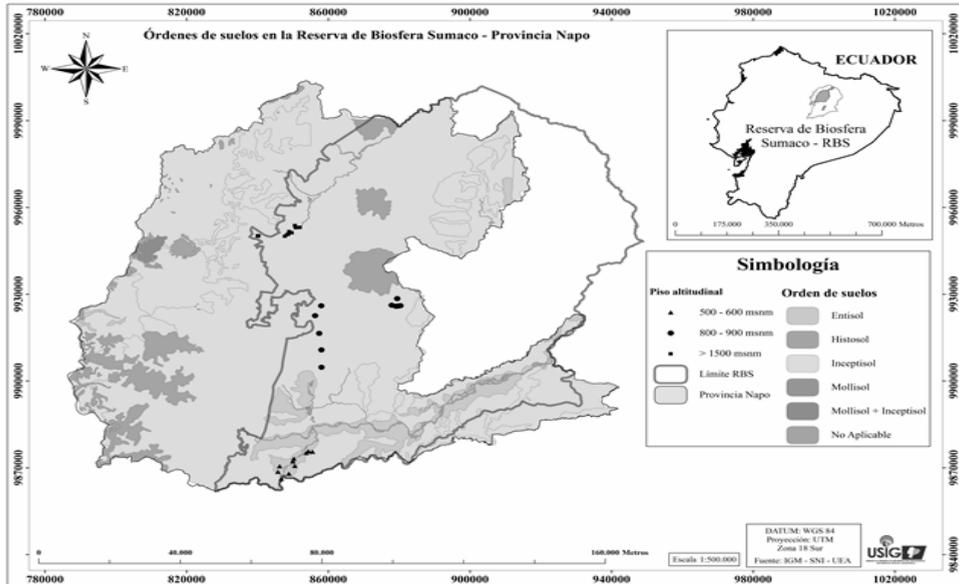
Figura 1. Localización de las zonas del estudio (baja, intermedia) en la provincia de Napo, Ecuador.



Fuente: Elaboración propia

Región baja: (altura entre 500 a 600 msnm), localizada en el cantón Carlos Julio Arosemena Tola y cuyos usos de suelo evaluados se identificaron como: Sistemas silvopastoriles no sistemáticos (pastos con árboles dispersos) y pasto sin árboles. Los suelos en esta zona en su mayoría se clasifican taxonómicamente en el orden Inceptisol (Figura 2) gran grupo Dystropept (Soil Taxonomy, USDA, 2006). Suelos franco limosos con frecuente afloramiento rocoso y escombros, drenaje bueno, de baja fertilidad con pH ácido (4.5-5.5) y presencia de aluminio tóxico con un nivel medio (Nieto y Caicedo, 2012). Las Fincas estudiadas se corresponden con la formación Arajuno, la cual es muy variable en espesor de suelo y litología con arenas y areniscas de grano grueso hasta fino, de color pardo. Presentan algunos conglomerados e intercalaciones discontinuas de arcilla abigarrada y la formación descansa sobre la Formación Chalcana en contacto bien definido (Baldock, 1982).

Figura 2. Principales órdenes de suelo en la zona bajo estudio.



Fuente: Elaboración propia

Región intermedia: (altura media de 800 a 900 msnm), localizada en las parroquias Cotundo y Sumaco (Cantón Archidona), con usos del suelo representados por sistemas de producción con Naranjilla (*Solanum quitoense*) y sistemas silvopastoriles no sistemáticos (pastos con árboles dispersos) y pasto sin árboles. En esta zona los suelos taxonómicamente son clasificados como del orden Inceptisol, gran grupo Tropaquept. Suelos franco arcillo limosos de color pardo, moderadamente profundos, drenaje moderado, pH ácido (4.5-5.5), aluminio tóxico muy alto, fertilidad muy baja (Nieto y Caicedo, 2012). Las fincas seleccionadas se localizaron en la formación Napo, la cual está integrada por una variedad de calizas masivas y estratos gruesos, fosilíferas, grises a negras, entremezcladas con areniscas calcáreas y lutitas negras (Baldock, 1982).

2.2. Muestreo de campo

Para la recolección de la información de campo y determinación de parámetros morfológicos se usó un esquema de muestreo sistemático (Figura 3), siguiendo la siguiente secuencia:

a) Selección del uso de la tierra en cada una de las zonas; **b)** establecimiento de un transecto que representará toda la variabilidad topográfica, vegetación y suelo en los sistemas agropecuarios estudiados y **c)** localización sobre el transecto de cinco puntos de muestreo o microperfiles de suelos de 30 cm de ancho x 30 cm de profundidad, de manera equidistante y en función del tamaño de la parcela.

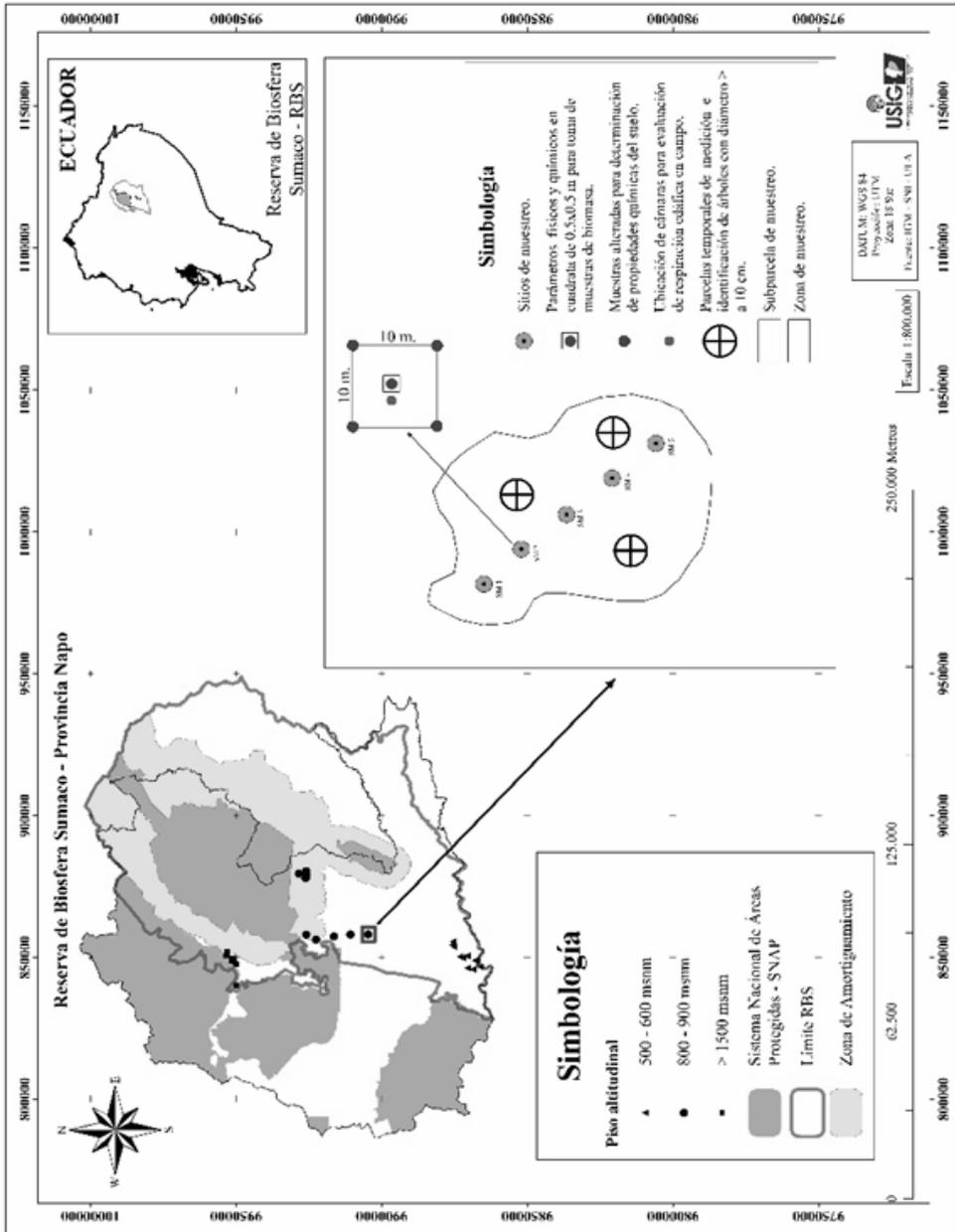
2.3. Evaluación de variables morfológicas, estructurales, químicas y topográficas

Las evaluaciones morfológicas, químicas y topográficas incluyeron una serie de parámetros asociados a la calidad del suelo y del paisaje usando metodologías sencillas (Hernández-Hernández et al, 2011), entre ellas:

- a) Textura, estimada organolépticamente por el método de la cinta.
- b) Estructura, descrita mediante observación macromorfológica directa y usando una tabla de referencia (Granular, laminar ó blocosa).
- c) Profundidad del horizonte A de los suelos muestreados fue valorada en campo (FAO, 2009).
- d) Color, usando la tabla de Munsell.
- e) Erosión del suelo mediante la presencia o ausencia de surcos, cárcavas.
- f) Pendiente usando un clinómetro
- g) Altura msnm (GPS).
- h) Densidad aparente por el método del cilindro (Pla, 2010).
- i) El carbono orgánico total (COT) se determinó mediante el método de digestión húmeda Walkley y Black (Nelson y Sommer, 1982).

Para explicar la variación de los diferentes parámetros morfológicos, estructurales, topográficos en cada uso de la tierra, distinguir las zonas según estas variables y determinar posibles indicadores que definan la calidad del suelo y el potencial de erosión, se realizó un análisis de componentes principales categórico con escalamiento óptimo (ACPCat), lo cual permitió conversión a escala numérica, usando el programa SPSS, versión 21.

Figura 3. Esquema de muestreo de campo para la evaluación de parámetros morfológicos y toma de muestras de suelo.



Fuente: Elaboración propia

3. Resultados y discusión

3.1. Variables morfológicas y topográficas en diferentes sistemas de producción y bosque

Los resultados de la evaluación de campo tanto de las variables morfológicas, químicas y topográficas en las dos zonas o pisos climáticos considerados se muestran en las Tablas 1 y 2. Se puede apreciar que para las dos zonas las clases texturales para el horizonte superficial son predominantemente finas a medias (Arcillosas, Franco Arcillosa), mientras que para la profundidad interior predominan las texturas Arcillosas y Arcillo limosa. La textura del suelo representa una variable muy importante ya que está relacionada con otros parámetros físicos, químicos y biológicos como por ejemplo la densidad aparente, la retención de humedad, la capacidad de intercambio catiónico, la disponibilidad de nutrientes, la porosidad, y la actividad biológica (Pla, 2010; Bravo *et al.*, 2008). En suelos con predominancia de materiales finos principalmente limo y arcilla, existe una mayor susceptibilidad a distintos procesos de degradación física, tales como sellado y encostrado superficial, erosión, compactación (Bravo, 2014). Si se combinan los parámetros del suelo con las condiciones climáticas de la zona caracterizada por abundantes precipitaciones de alta intensidad, con un paisaje agrícola de topografía irregular y con altas pendientes, se puede señalar que dependiendo del manejo utilizado se pudiera magnificar o reducir dichos procesos (Bravo *et al.*, 2015). Por tanto, desde el punto de vista del uso del suelo se refuerza la idea que las zonas estudiadas deben estar siempre bajo protección y es aquí donde los sistemas agroforestales cumplen un papel multifuncional.

Las características de los sistemas ganaderos que implican el establecimiento de pastos y los antecedentes de uso de la zona (Bosque) han generado gran cantidad de biomasa que incrementa el contenido de materia orgánica del suelo, lo cual ha permitido que se genere en el horizonte superficial una estructura tipo granular en ambas zonas (Tabla 1 y 2). En contraste, para el segundo horizonte la mayoría de los usos evaluados presentaron una estructura blocosa débil. Dicha estratificación, influye sobre los índices estructurales tales como densidad aparente, porosidad, la capacidad de retención de agua, la permeabilidad, la estabilidad estructural, cohesión, entre otras (Bravo *et al.*, 2015; Álvarez y Taboada, 2008).

Desde el punto de vista de calidad del suelo el color representa una característica morfológica que permite inferir otras propiedades del suelo (Casanova, 2005). Por ejemplo el color negro ha sido asociado con niveles altos de materia orgánica, condiciones de buena fertilidad, en especial presencia de cationes tales como el Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ . Colateralmente el color está asociado con otras condiciones físicas relacionadas con la materia orgánica, tal como la presencia de una buena estructuración del suelo y rica actividad biológica (Gardi *et al.*, 2014). Cuando se caracterizó el color mediante la tabla Munsell la mayoría de los usos en el horizonte superficial, mostraron colores oscuros (10YR 2/2 y 10YR 2/1) categorizados de negro a marrón muy oscuro, ambos considerados como óptimos. No obstante, para el

horizonte subsuperficial, la situación es diferente y empiezan a predominar colores pardos, rojizos, marrón claro, que se corresponden con los colores que ocupan más del 50% del volumen del suelo. Por otra parte, los colores rojizos en algunos de los suelos de la zona 1 Arosemena (Tabla 2) están asociados al contenido de ciertos minerales, fundamentalmente minerales férricos muy característico de suelos amazónicos (Custode y Sourdat, 1986).

La protección que ofrecen algunos sistemas de manejo ganadero con respecto al recurso suelo, bien sea por la cantidad de árboles asociado al pasto o el tipo de pasto como el gramalote (*Axonopus scoparius*) permite que se minimice o no se manifiesten problemas de erosión (Vargas-Burgos, *et al.*, 2015). En contraparte, cuando existe un reemplazo de gramalote por pastos de ciclo corto como dallis (*Brachiaria decumbens*), kikuyo amazónico (*Brachiaria humidicola*), setaria o miel (*Setaria splendida*), pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) o pasto alemán (*Echinochloa polistachya*) adaptado a localidades pantanosas (López *et al.*, 1992; Bravo *et al.*, 2015), se pueden activar procesos de erosión intensos que llevan a la degradación del suelo y finalmente, a largo plazo a la disminución de la productividad del agroecosistema (Gliessman, 2007; Bravo *et al.*, 2008; Vargas-Burgos *et al.*, 2015). Tal como se aprecia en las Tablas 1 y 2 la aparición de surcos en sistemas ganaderos asociados a malas prácticas (sobrepastoreo, deforestación) son evidencias del proceso de erosión. Todo ello, se ve favorecido por el paisaje agrícola de los dos pisos altitudinales evaluados, caracterizado por una conformación topográfica con fuertes pendientes y la presencia de lluvias abundantes e intensas, lo que pone en evidencia la fragilidad de estos suelos (Figura 4), sobre todo en la zona de Archidona, Cotundo.

Figura 4. Sistemas ganaderos con bajo fundamento ecológico y manifestación del problema de erosión hídrica³.



Fuente: Carlos Bravo.

³ Sistemas ganaderos con bajo fundamento ecológico y manifestación del problema de erosión hídrica por el cambio de uso de la tierra a pastura de ciclo corto como dallis (*Brachiaria decumbens*) en la zona de Cotundo y pasto miel (*Setaria splendida*) en alto Sumaco, Napo, Ecuador

Tabla 1. Características morfológicas y topográficas de los usos de tierra seleccionados en la zona baja (Arosemena Tola), provincia de Napo, Ecuador.

| USO DEL SUELO | Clase Textural | | Estructura | | Color | | Prof. HA | No. Surcos /100m ² | Pendiente (%) | Altura msnm |
|--------------------------------------|----------------|----------|------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|-------------------------------|---------------|-------------|
| | 0-10 cm | 10-30 cm | 0-10 cm | 10-30 cm | 0-10 cm | 10-30 cm | | | | |
| Pasto Gramalote con Arboles | FA | A | Granular | Blocosa débil | Marrón 10YR 5/3 | Marrón rojizo 5YR5/3 | 9,40 | 5,60 | 19,80 | 514,00 |
| Pasto Dallis sin Arboles | FA | FA | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón oscuro amarillento 10YR 4/6 | 13,60 | 0,00 | 8,00 | 519,00 |
| Pasto Gramalote con Arboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Rojo oscuro 2.5YR 2.5/1 | 8,70 | 0,00 | 30,00 | 650,00 |
| Pasto Dallis y Gramalote con arboles | A | AL | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón claro 7.5YR 6/3 | 10,37 | 6,60 | 24,00 | 520,00 |
| Pasto Gramalote con Arboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón rojizo 5YR 5/4 | 9,46 | 6,20 | 19,60 | 513,00 |
| Pasto Dallis sin Arboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Negro 10YR 2/1 | Negro 10YR 2/1 | 9,72 | 0,00 | 4,00 | 467,00 |
| Pasto Gramalote sin Arboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Rojizo 2.5YR 5/6 | 10,53 | 10,60 | 25,00 | 498,00 |
| Pasto Dallis con Arboles | A | FAa | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón oscuro amarillento 10YR 4/4 | 10,90 | 0,00 | 10,00 | 492,00 |
| Pasto Marandú con árboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón-rojizo 5YR 5/4 | 11,10 | 10,40 | 37,40 | 510,00 |
| Pasto Gramalote sin Arboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro amarillento 10YR 5/6 | Marrón-rojizo. 5YR 5/4 | 10,43 | 6,20 | 40,00 | 530,00 |
| Bosque secundario | A | FA | Granular | Blocosa débil | Negro 10YR 2/1 | Negro 10YR 2/1 | 10,19 | 0,00 | 11,00 | 546,00 |

FA: Franco Arcillosa; A: Arcillosa; FAa: Franco Arcillo arenosa; AL: Arcillo Limosa; HA: Horizonte A
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Características morfológicas y topográficas de los usos de tierra seleccionados en la zona intermedia (Archidona), provincia de Napo, Ecuador.

| USO DEL SUELO | Clase Textural | | Estructura | | Color | | Prof. HA | No. Surcos /100 m ² | Pendiente (%) | Altura msnm |
|-----------------------------|----------------|----------|---------------|---------------|-------------------------------|------------------------------------|----------|--------------------------------|---------------|-------------|
| | 0-10 cm | 10-30 cm | 0-10 cm | 10-30 cm | 0-10 cm | 10-30 cm | | | | |
| Pasto Dallis sin Arboles | Aa | AL | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón grisáceo 10YR 5/2 | 12,16 | 27,00 | 24,00 | 828,80 |
| Pasto Dallis con Arboles | FA | FA | Granular | Blocosa débil | Marrón oscuro 10YR 3/3 | Marrón Claro 7.5 YR 6/4 | 10,75 | 0,00 | 7,50 | 854,00 |
| Pasto Gramalote sin Arboles | FA | FAL | Granular | Blocosa débil | Negro 10YR 2/1 | Marrón oscuro 7.5YR 3/4 | 11,06 | 8,80 | 33,60 | 947,40 |
| Pasto Gramalote con Arboles | A | A | Granular | Blocosa débil | Negro 10YR 2/1 | Marrón oscuro 7.5YR 3/4 | 13,20 | 3,20 | 14,00 | 1188,40 |
| Pasto Miel sin arboles | AL | AL | Granular | Blocosa débil | Marrón muy oscuro 7.5YR 2.5/3 | Marrón muy oscuro 7.5YR 2.5/3 | 12,73 | 14,40 | 15,80 | 1531,00 |
| NaranjaJilla | AL | FAL | Granular | Blocosa débil | Marrón muy oscuro 7.5YR 2.5/3 | Marrón oscuro 7.5YR 3/4 | 13,46 | 0,00 | 17,00 | 1201,80 |
| NaranjaJilla | FA | FAa | Granular | Blocosa débil | Negro 10YR 2/1 | Marrón oscuro amarillento 10YR 4/6 | 14,86 | 0,00 | 24,80 | 1234,40 |
| NaranjaJilla | FAa | FA | Granular | Blocosa débil | Marrón muy oscuro 7.5YR 2.5/3 | Marrón oscuro 7.5YR 3/4 | 14,46 | 0,00 | 5,20 | 950,00 |
| NaranjaJilla | A | AL | Granular | Blocosa débil | Marrón muy Oscuro 7.5YR 2.5/3 | Marrón oscuro 7.5YR 3/4 | 11,86 | 0,00 | 18,00 | 1173,00 |
| Pasto Miel con árboles | A | A | Blocosa débil | Blocosa débil | Marrón muy Oscuro 7.5YR 2.5/3 | Marrón oscuro amarillento 10YR 4/6 | 16,00 | 20,40 | 43,00 | 1290,40 |
| Bosque secundario | AL | AL | Granular | Blocosa débil | Marrón muy oscuro 7.5YR 2.5/3 | Marrón oscuro amarillento 10YR 4/6 | 12,40 | 0,00 | 8,00 | 1557,00 |

FA: Franco Arcillosa; A: Arcillosa; FAa: Franco Arcillo arenosa; AL: Arcillo Limosa; HA: Horizonte A
 Fuente: Elaboración propia

3.2. Análisis de componentes principales categóricos con escalamiento óptimo

Los resultados del coeficiente de Alfa de Cronbach, exhibieron en ambas dimensiones autovalores por encima de la unidad (Tabla 3), lo cual sugiere la bondad del modelo para la determinación de la varianza. Además se presentó una adecuada consistencia interna con valores iguales y superiores a 0,7 (alfa de Cronbach para la dimensión 1 de 0,8, dimensión 2 de 0,70 y la combinación de las dos dimensiones de 0,91). Con las dos dimensiones seleccionadas se logra explicar el 44,44 % de la variabilidad de la información general proporcionada por los indicadores evaluados.

Tabla 3. Resultados del coeficiente de Alfa de Cronbach para el modelo obtenido

| Dimensión | Alfa de Cronbach | Varianza explicada | |
|-----------|------------------|---------------------|------------------|
| | | Total (Autovalores) | % de la varianza |
| 1 | 0,796 | 3,895 | 25,965 |
| 2 | 0,685 | 2,771 | 18,476 |
| Total | ,911a | 6,666 | 44,441 |

Fuente: Elaboración propia

El aporte de los indicadores para cada dimensión, que representa las relaciones entre las variables y la dimensión de la solución se presentan en la Tabla 4. Se puede apreciar que los valores más altos ($>0,5$) para la primera dimensión y de manera positiva están asociados a los índices estructurales como densidad aparente y el carbono orgánico total del suelo en ambas profundidades con valores de cargas factoriales que oscilaron de 0,5 a 0,86, mientras que los indicadores morfológicos en ambas dimensiones muestran aportes muy bajos. Tales resultados sugieren que el uso de indicadores estructurales y el contenido de carbono total pueden permitir una mejor valoración de la calidad del suelo, mientras que los parámetros morfológicos pueden ser usados como complementarios y para evaluar el potencial de erosión.

En condiciones amazónicas los descriptores morfológicos son de gran utilidad para la comprensión de la génesis del suelo, la estratificación del perfil así como su funcionamiento y ayudan a explicar el comportamiento físico en términos del movimiento, captación y retención de agua, aireación, resistencia a la penetración, entre otros. Para la segunda dimensión, con cargas que oscilan entre 0,5 y 0,7 se presentan el % pendiente y el número de surcos, siendo la pendiente una de las variables fuertemente relacionada con el proceso de erosión del suelo que dependiendo de la cobertura vegetal de los sistemas de producción puede facilitar la formación de los surcos.

La cubierta vegetal desempeña un papel multifuncional ya que absorbe la energía de las gotas de lluvia, fija el suelo por sus raíces y reduce el escurrimiento. La brusca desaparición de la vegetación ocasiona una mayor incidencia de las alternativas climáticas, dejando el suelo sometido a los efectos de la lluvia, cuyo impacto directo provoca la destrucción de los agregados y su arrastre por la escorrentía superficial, lo que aumenta el riesgo potencial de erosión.

Tabla 4. Aporte de los indicadores evaluados en cada dimensión en el Análisis de Componentes Principales Categóricos

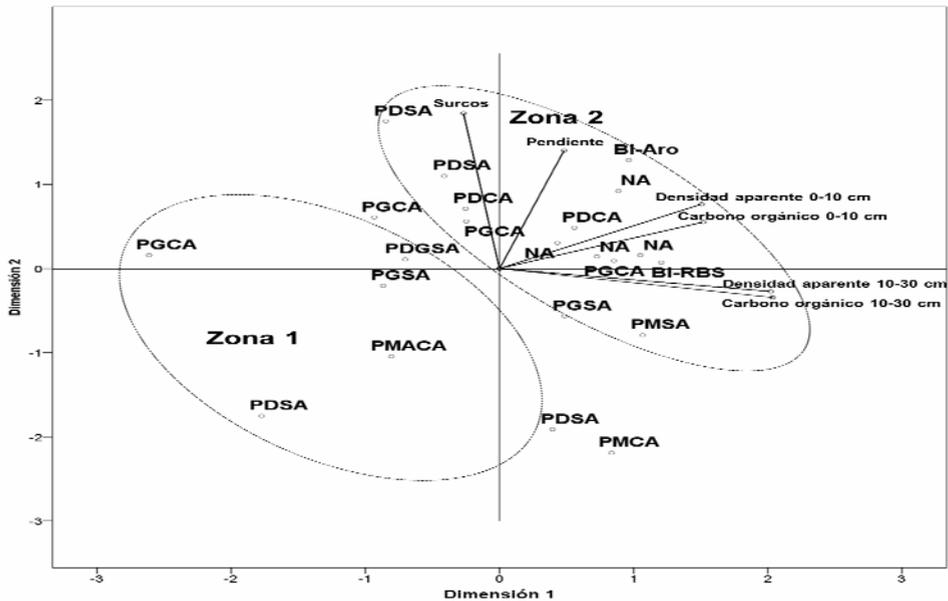
| Indicadores | Dimensión | |
|-------------------------------|-----------|-------------|
| | 1 | 2 |
| Espesor del Horizonte A. | 0,22 | 0,18 |
| Clase Textural de 0-10 cm | 0,08 | 0,10 |
| Clase Textural de 10-30 cm | 0,00 | 0,19 |
| Tipo de Estructura de 0-10 cm | 0,02 | 0,39 |
| Tipo de Estructura 10-30 cm | 0,10 | 0,18 |
| Color 0-10 cm | 0,03 | 0,01 |
| Color 10-30 cm | 0,08 | 0,31 |
| Número de Surcos | 0,02 | 0,71 |
| Drenaje Superficial | 0,06 | 0,05 |
| No. Lombrices/ m ² | 0,58 | 0,02 |
| % Pendiente | 0,05 | 0,50 |
| Densidad Aparente 0-10 cm | 0,50 | 0,12 |
| Carbono Orgánico 0-10 cm | 0,50 | 0,06 |
| Densidad aparente 10-30 cm | 0,85 | 0,02 |
| Carbono Orgánico 10-30 cm | 0,86 | 0,03 |
| Total activo | 3,90 | 2,80 |
| % de la varianza | 26,0 | 18,5 |

Fuente: Elaboración propia

En las regiones tropicales la conversión extensiva de bosques a pasturas y la intensificación agrícola son típicamente identificadas como los conductores más importantes de cambio en el uso del suelo, con consecuente pérdida de su fertilidad, calidad y biodiversidad (Valera et al., 2016; Guillaume et al., 2016; Vallejo-Quintero, 2013). Para la Amazonía ecuatoriana se ha señalado que dependiendo del tipo de reemplazo del bosque el daño ocasionado por la deforestación sobre el suelo puede variar, por ejemplo si se convierte a áreas con especies arbóreas como café, cacao o caucho en arreglo agroforestal el daño ocasionado al suelo es mínimo, ya que representan los manejos más análogo al uso potencial de esta región (Nieto y Caicedo, 2012 Bravo et al., 2015). Dichos sistemas reproducen más o menos las condiciones de un bosque natural en cuanto a la intercepción de las gotas, disminución del escurrimiento, restitución de hojarasca y minimización del proceso de erosión hídrica. En contraparte, los cultivos ya sean anuales o perennes, el peligro de erosión es muy significativo al inicio del ciclo de cultivo cuando el suelo queda desprotegido de su cubierta.

La Figura 5 muestra el diagrama de las dimensiones con sus respectivos indicadores y usos de la tierra. Se aprecia la distinción de dos grupos, uno de ellos a lo largo de la dimensión 2 en el cuadrante superior a la derecha llamado zona 2 (segundo piso altitudinal), con un alto grado de asociación de diferentes usos como naranjilla (*Solanum quitoense*) (NA), pasto gramalote con árboles (PGCA) y el uso con bosque (BI-RBS) con indicadores como densidad aparente y carbono orgánico total cuyas cargas factoriales oscilaron de 0,5 a 0,86. En el segundo grupo, con uso principalmente ganadero y vinculado con la primera zona altitudinal (Zona 1), por las variables no diferencian un uso de otro. También en la zona 2 se puede observar que el uso de tierra correspondiente al pasto dallis sin arboles (PDSA) se asocia con variables como pendiente y número de surcos, sugiriendo que la interacción de estos factores magnifica el potencial de erosión para este piso altitudinal, tal como ha sido señalado por Vargas-Burgos *et al.*, 2015.

Figura 5. Diagrama de las dos dimensiones con indicadores y usos de la tierra.



Fuente: Elaboración propia

Los suelos en la zona 2 registraron valores medios de densidad aparente alrededor de 0,38 a 0,44 Mg m^{-3} , mientras que el carbono orgánico total osciló de 8 a 14 % (0-10 cm) y de 4,89 a 8,31 % (10-30 cm). No obstante para los suelos en la zona 1, la densidad aparente osciló de 0,34 a 0,94 Mg m^{-3} , y el carbono orgánico total varió de 3 a 9 % de 0-10 cm profundidad y de 1,72 a 8,31 % en la capa de 10-30 cm.

Si bien, en las dos zonas ambas variables mostraron rangos categorizados como adecuados, los valores obtenidos en los usos de la tierra para la zona 2 muestran

rangos en dirección hacia lo óptimo, especialmente en los suelos con bosque usados como referencia (BI-Aro y BI-RBS). La presencia de un alto contenido de materia orgánica en la zona está relacionada con el antecedente de manejo y uso potencial de la región amazónica ecuatoriana con una gran superficie bajo bosque (Jadan *et al.*, 2012; Torres *et al.*, 2014; Bravo *et al.*, 2015). Todo ello favorece un mejoramiento de los parámetros físicos, químicos y biológicos de los suelos.

4. Conclusiones

El ACPCat permitió agrupar usos de la tierra en función del piso altitudinal y algunos parámetros edáficos, indicando que la densidad aparente, el carbono orgánico total, número de surcos y la pendiente son las variables que definen el impacto del cambio de uso sobre la calidad del suelo y su potencial de erosión.

El monitoreo o seguimiento a nivel de campo, con observaciones y mediciones directas de parámetros morfológicos es una herramienta de gran utilidad, ya que puede ayudar a entender el funcionamiento de suelo, el paisaje y cómo pueden activarse los procesos de degradación de los recursos (suelo, vegetación, agua), y los cambios que puede producir la intervención humana. Esto es indispensable para la solución y desarrollo de prácticas efectivas de conservación adaptadas a cada condición particular de suelo y clima amazónico.

La combinación de factores de suelo, sistemas de manejos, condiciones climáticas de las zonas de abundantes precipitaciones y alta intensidad, con un paisaje agrícola de topografía irregular y altas pendientes hace que se magnifiquen los problemas de pérdidas de suelo.

Dadas las características de las zonas estudiadas, donde se integran factores edáficos, topográficos y climáticos que pueden potenciar el proceso de erosión hídrica, se recomiendan sistemas silvopastoriles adaptados a cada piso altitudinal combinados con buenas prácticas que consideren asociación de pastos con leguminosas, reciclaje de nutrientes, fuentes de fertilización orgánica como la roca fosfórica y compost, de manera que protejan permanentemente al suelo y se minimicen impactos ambientales.

5. Referencias bibliográficas

- Altieri, M.A y Nicholls, C.I. (2013): Agroecología y resiliencia al cambio climático principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología*, 8, 7-20.
- Álvarez, C.R y M.A Taboada. (2008): Fertilidad física de los suelos. Segunda Edición. Buenos Aires, Universidad de Buenos Aires. 237 p.
- Ashman, M.R y Puri, G. (2001): *Essencial soil science. A clear and concise introduction to soil science.* BlackwellScience. UK. 198p.
- Balarezo-Giarola, N.F., da Silva, A.P., Tormena, C.A., Guimaraes, L.R.M., Ball, B.C., (2013): On the visual evaluation of soil structure: the Brazilian experience in oxisols under no-tillage. *Soil&TillageResearch* 127, 60–64.

- Baldock, J.W. (1982): Geology of Ecuador. Bulletin of the National Geological Map of the Republic of Ecuador. Ministerio de Recursos Naturales y Energía. Dirección General de Geología y Minas, Quito. 70 p.
- Bravo, C., Benítez, D., Vargas-Burgos, J.C., Alemán, R., Torres, B. y Marín, H. (2015): Socio-Environmental Characterization of Agricultural Production Units in the Ecuadorian Amazon Region, Subjects Pastaza and Napo. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4, 3-31.
- Bravo, C., Lozano, Z., Hernández-Hernández, R. M., Cánchica, H., González, I. (2008): Siembra directa como alternativa agroecológica para la transición hacia la sostenibilidad de las sabanas. *Acta Biológica*, 28 (1),7-26.
- Bravo, C. (2014): Caracterización del recurso suelo como base para la conversión agroecológica de áreas bajo pastizales a agroecosistemas sostenibles de Cacao y Ganadería en la región amazónica: Caso Pastaza y Napo. Proyecto Prometeo-Universidad Estatal Amazónica. Secretaria de ciencia y tecnología (SENESCYT). Informe final Prometeo. Quito, Ecuador. 120 pp.
- Bronick, C.J., Lal, R. (2005): Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3–22.
- Casanova, E. (2005): Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Central de Venezuela.-UCV. Consejo de Desarrollo Humanístico y Científico, Caracas. Venezuela. 481 pp.
- Custode, E. y Sourdat, M. (1986). Paisajes y suelos de la Amazonía ecuatoriana: entre la conservación y la explotación. *Revista del Banco Central del Ecuador* 24: 325-339.
- FAO, (2009). Organización de la Naciones unidas para la Alimentación y Seguridad Alimentaria. Guía para la descripción de los suelos. Roma, Italia. 99 p.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., Jones, A., Krasilnikov, P., Mendonça Santos Brefin, M.L., Montanarella, L., Muñoz Ugarte, O., Schad, P., Vara Rodríguez, M.I., Vargas, R. (eds), (2014): Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg, 176 pp
- Gliessman, S.R. (2007): Agroecology. The ecology of sustainable food system. Second Edition. Taylors &Francis Group. New York. United Sated. 384 pp.
- Guimaraes, D.V., Silva Gonzaga, M.I., Oliveira da Silva, T., Lima da Silva, T., Silva Díaz, N., & Silva Matías, M.I. (2013): Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil & Tillage Research*, 126, 177-182.
- Guillaume, T., Maranguit, D., Murtalaksono, K., & Kuzyakov, Y. (2016). Sensitivity and resistance of soil fertility indicators to land-use changes: New concept and examples from conversion of Indonesian rainforest to plantations. *Ecological Indicators*, 67, 49-57.
- Hernández-Hernández, R. M; E. Ramírez; I. Casto y S. Cano. (2008): Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y Eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). *Agrociencia*, 42, 253-266.
- Jadán O., Torres, B. y Sven G. (2012): Influencia del uso de la tierra sobre el almacenamiento de carbono en sistemas productivos y bosque primario en Napo, Reserva de Biosfera Sumaco, Ecuador. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 1(3), 173-185.
- López, L., Ramírez, P., Verdezoto, C., y Schelleberg, R. (1992): Sistemas de producción agropecuaria en el centro de la región Amazónica Ecuatoriana. En: Producción

- Agropecuaria de la Selva húmeda de la región Amazónica. Editado IICA, Quito, Ecuador 61-99 pp.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) – Programa GESOREN-GTZ. (2008): Análisis Multitemporal del Uso del suelo y Cobertura Vegetal de la Reserva de Biosfera Sumaco. Quito.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE) y GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). (2013b): Segunda medición del uso del suelo y de la cobertura vegetal en la Reserva de Biosfera Sumaco. Consultora Agroprecisión Cia. Ltda. Quito, Ecuador. 110 pp.
- McBratney, A.B., Field, D.J. y Koch, A. (2013): The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213(2014), 203-213.
- McKenzie, D.C. (2013): Visual soil examination techniques as part of a soil appraisal framework for farm evaluation in Australia. *Soil & Tillage Research*, 127, 26–33.
- Myers, N., (1990): The biodiversity challenge: Expanded hot-spots analysis. *Environmentalist* 10, 243–256. doi:10.1007/BF02239720
- Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B. (2013): Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil & Tillage Research*, 127, 85–91.
- Mueller, L., Shepherd, G., Schindler, U., Ball, B.C., Munkholm, L.J., Hennings, V., Smolentseva, E., Rukhovic, O., Lukin, S., Hu, C. (2013): Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil & Tillage Research*, 127, 74–84.
- Murphy, B.W., Crawford, M.H., Duncan, D.A., McKenzie, D.C., Koen, T.B. (2013): The use of visual soil assessment schemes to evaluate surface structure in a soil-monitoring program. *Soil & Tillage Research*, 127, 3–12.
- Munsell Color Company, Inc. (1990): Munsell Soil Color Charts. Baltimore, USA.
- Nieto, C. y Caicedo, C. (2012): Análisis reflexivo sobre el desarrollo agropecuario sostenible en la Amazónica Ecuatoriana. INIAP-EECA. Publicación Miscelánea N° 405 Joya de los Sachas, Ecuador. 102 p.
- Nelson, D.W.; Sommer, L.E. (1982): Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A.L. Page (ed.), *Amer. Soc. Agron. Madison, W.I., Methods of Soil Analysis*. 2nd ed. ASA Monogr. 9(2), 539-579
- Newell-Price, J.P., Whittingham, M.J., Chambers, B.J., Peel, S. (2013): Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil & Tillage Research*, 127, 65–73.
- Pla, I. (2010): Medición y evaluación de propiedades físicas de los suelos: dificultades y errores más frecuentes. *Propiedades Mecánicas. Suelos Ecuatoriales*, 40 (2):75-93.
- Pulido, M; Gabriels, D; Lobo, D; Rey, J C and Cornelis, W. 2014. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil & Tillage Research* 139: 8-18
- Soil Survey Staff, (2006): Keys of soil taxonomy. Twelfth Edition. United States Department of Agriculture (USDA). Natural Resources Conservation Service (NRCS). Washington D.C, 332p.
- Torres, B.; Starnfeld, F., Vargas, J.C., Ramm, G., Chapalbay, R.; Rios, M., Gómez, A., Torricelli, Y.; Jurrius, I.; Tapia, A., Shiguango, J., Torres, A., Velasco, C., Murgueytio, A., and Cordoba-Bahle, S.D. (2014): Gobernanza participativa en la Amazonía del Ecuador: recursos naturales y desarrollo sostenible. Universidad Estatal Amazónica, Ministerio del

- Ambiente del Ecuador, Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Napo y Cooperación Alemana al Desarrollo. Puyo, Ecuador. P.124
- UNESCO. (1996): Reservas de Biosfera: la Estrategia de Sevilla y el Marco Estatutario de la Red Mundial. UNESCO. París, Francia. 20 pp.
- Valarezo, V., Gómez, J., Mejía, L., Céleri, Y. (2002): Plan de manejo de la Reserva de biosfera Sumaco. Fund. Bioparques Tena, Ecuador.
- Valera, C. A., Valle Junior, R. F., Varandas, S. G. P., Sanches Fernandes, L. F., & Pacheco, F. A. L. (2016). The role of environmental land use conflicts in soil fertility: A study on the Uberaba River basin, Brazil. *Science of The Total Environment*, 562, 463-473.
- Valmiqui, C.L., De Lima M.R. y De Freitas Melo V. (2007): O Solo no meio ambiente: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensinomédio. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. 130 p.
- Vallejo-Quintero, V. (2013): Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal*, 16(1), 83-99.
- Varga-Burgo, JC., Benítez Jiménez, D., Bravo, C., Leonard, I., Pérez, M., Torres, V., Ríos, S. y Torres, A. (2015): Retos y posibilidades para una ganadería sostenible en la provincia de Pastaza de la Amazonía Ecuatoriana. Universidad Estatal Amazónica. Puyo, Ecuador. 174 pp.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Estatal Amazónica, Ecuador, Rainforest-USA, Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ) por la colaboración, apoyo y soporte financiero brindado para la ejecución del proyecto y a las familias ganaderas de la provincia de Napo que contribuyeron con la información.