

13

Fecha de presentación: enero, 2020

Fecha de aceptación: febrero, 2020

Fecha de publicación: abril, 2020

EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE CALIDAD DEL SUELO DE DIVERSOS CULTIVOS EN DIFERENTES CONDICIONES TOPOGRÁFICAS, PARROQUIA EL PROGRESO, EL ORO

EVALUATION OF SOIL QUALITY INDEXES OF DIFFERENT CROPS UNDER DIFFERENT TOPOGRAPHIC CONDITIONS IN THE PARISH EL PROGRESO, EL ORO

Jenner Barrera León¹

E-mail: jjbarrera_est@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0768-2406>

Salomón Barrezueta Unda¹

E-mail: sabarrezueta@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4147-9284>

Rigoberto García Batista¹

E-mail: rmgarcia@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2403-0135>

¹ Universidad Técnica de Machala. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Barrera León, J., Barrezueta Unda, S., & García Batista, R. (2020). Evaluación de los índices de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas, parroquia El Progreso, El Oro. *Revista Científica Agroecosistemas*, 8(1), 83-90.

RESUMEN

La calidad del suelo es una herramienta de valoración que facilita la aplicación de prácticas de manejo que promuevan sistemas agronómicos sostenibles. El objetivo de caracterizar varios usos de suelo en función de varias propiedades físicas-químicas del suelo y estimar un índice de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas. El estudio se llevó a cabo en tres usos de suelo que fueron Banano, Cacao Joven y Maduro ubicados en la parroquia El Progreso perteneciente al Cantón Pasaje-El Oro, con un clima tropical mega térmico y una topografía irregular. Para lo cual se tomaron 15 muestras de suelo del estrato de (0 a 0,10 cm). Se realizó un análisis a las variables físicas y químicas del suelo. Las variables que presentaron incompatibilidades fueron puestas a un análisis de componentes principales para seleccionar el conjunto mínimo de datos (CMD) de los componentes que explicaron la mayor variabilidad y se verificó redundancia a partir de la correlación. El ICS se obtuvo del promedio de los indicadores normalizados (0 a 1), entre mayor sea el valor del ICS mejor es la calidad del suelo del uso de suelo. Las variables físicas seleccionadas fueron la densidad aparente y los contenidos de arena, limo y arcilla; mientras que las variables químicas fueron: el pH del suelo, Carbono, Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Hierro, Manganeso, Hierro, Cobre y Zinc.

Palabras clave:

Propiedades del suelo, fertilidad del suelo, relieve, cultivos tropicales.

ABSTRACT

Soil quality is a valuation tool that facilitates the application of management practices that promote sustainable agronomic systems. The objective is to characterize various land uses based on various physical-chemical properties of the soil and to estimate a soil quality index for various crops in different topographic conditions. The study was carried out in three land uses that were Banana, Young and Ripe Cocoa located in El Progreso belonging to the Canton of Pasaje-El Oro, with a tropical mega thermal climate and an irregular topography. Fifteen soil samples were taken from the stratum (0 to 0.10 cm). An analysis of the physical and chemical variables of the soil was carried out. The variables that presented incompatibilities were put to a principal component analysis to select the minimum data set (MDS) of the components that explained the greatest variability and redundancy was verified from the correlation. The SQI was obtained from the average of the standardized indicators (0 to 1), the higher the SQI value the better the land quality of the land use. The selected physical variables were bulk density and contents of sand, silt and clay; while the chemical variables were soil pH, Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Calcium, Magnesium, Iron, Manganese, Iron, Copper and Zinc.

Keywords:

Soil properties, soil fertility, setoff, tropical crops.

INTRODUCCIÓN

La producción de alimentos a escala global está condicionada al recurso suelo, el cual está limitado a varios factores ambientales (sequías, inundaciones, heladas, etc.) y antrópicos (agricultura, urbanismos, etc.), que se pueden manifestar en la pérdida de la fertilidad, la compactación, salinización, entre otros; los cuales afectan su capacidad para el desarrollo agrícola.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2015), considera que el manejo del suelo debe ser estudio en función de su calidad o salud, cuyo concepto es: ***“es la capacidad del suelo para funcionar como un sistema vital vivo, dentro de los límites del ecosistema y del uso de la tierra, para sostener productividad vegetal y animal, mantener o mejorar la calidad del agua y del aire, y promover la salud vegetal y animal”***. (Doran & Zeiss, 2000)

Si bien es cierto los nuevos retos de la agricultura se deben centrar en la sostenibilidad del recurso suelo, pero también en el desarrollo de herramientas y métodos para la evaluación y monitoreo del estado del suelo. En este marco, para lograr evaluar la calidad del suelo es pertinente contar con variables que nos ayuden a medir las condiciones en que se encuentra el recurso suelo; estas variables son conocidas como indicadores.

Los indicadores calidad del suelo sean estos físicos, químicos o biológicos, permiten tener visión de los diferentes grados o niveles de degradación de este recurso. Para la selección efectiva de indicadores en la evaluación de la calidad del suelo es necesario contar con una objetividad clara, sin dejar de tomar en cuenta las funciones del suelo productivas y ambientales. (Estrada-Herrera & Hidalgo-Moreno, 2017)

Para estructurar un índice de calidad del suelo (ICS), este debe estar correlacionado con varios atributos del suelo como: materia orgánica (MO), Carbono orgánico total (COT), nitrógeno total (NT), los macro y micronutrientes; así como también, con factores físicos como la profundidad efectiva, porosidad, tipo de textura entre otros.

Si bien es cierto la tecnología de producción de cultivos ha cambiado de manera relevante; la técnica de siembra directa se extendió prontamente sobre la labranza convencional, es decir, la producción se intensificó con el uso considerable de agroquímicos,

específicamente fertilizantes; lo que trajo cambios radicales en el manejo del suelo como la deforestación de bosques, salinización e integración de tierras no aptas para labores agrarias, la compactación, aspectos que investigadores como Labrador & Biológicas (2008), los consideran como los factores de la agricultura que acentúa la pérdida de calidad del suelo.

Las condiciones como el clima, la topografía y las propiedades del suelo son calificados como los principales controladores ambientales, debido a intervención de la precipitación, humedad, y temperatura; así como también los factores topográficos: elevación, pendiente y aspecto, que son determinantes sobre el balance de agua del suelo, la descomposición del material vegetal, la erosión del suelo y los procesos de almacenamiento geológico.

Los cambios de uso en el suelo de las zonas de barbecho a cultivos, afectan su estructura y agotan la reserva de los diferentes nutrientes del suelo, esto complementario a la posición topográfica que favorece los procesos erosivos por escorrentía y por acción del viento, La intensificación y cambio de uso del suelo, las actividades de labranza y otras prácticas agrícolas inadecuadas contribuyen a incrementar el coeficiente de escurrimiento, lo que altera el papel regulador de los flujos hídricos y afecta la calidad del suelo.

Con lo expuesto se planteó los objetivos de caracterizar varios usos de suelo en función de varias propiedades físicas y químicas del suelo y estimar un índice de calidad del suelo de diversos cultivos en diferentes condiciones topográficas en la parroquia el Progreso, provincia El Oro-Ecuador.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la parroquia el Progreso (figura 1), ubicada entre las coordenadas geográficas 3°17'30" S y 79°45'38" O, en el municipio Pasaje en la provincia El Oro-Ecuador. Cuenta con una extensión territorial de 119 km². De acuerdo al mapa ecológico del Ecuador, el sitio se caracteriza por tener dos tipos de climas: Tropical Mega térmico Seco y Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo. Posee pisos ecológicos desde los 20 msnm hasta 3.419 msnm (Cordillera de Los Andes) influyentes en las temperaturas y precipitaciones (Villaseñor, Chabla & Luna, 2015). Los suelos son de perfiles muy pocos desarrollados, textura gruesa y pH ácido, color pardo amarillento, son de parte montañosa que corresponden a la clasificación de Inceptisol, Entisol.

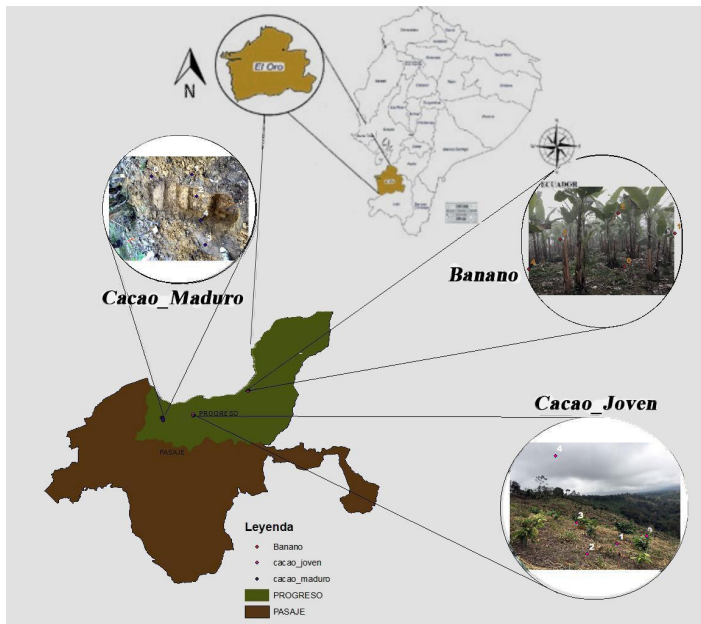


Figura 1. Ubicación de la investigación

Diseño de la toma de muestras

Se delimitó tres usos del suelo: banano, Cacao Joven y cacao maduro. Luego se procedió a conformar 5 parcelas con una distancia de 50 m entre ellas por cada uso del suelo; la forma que tomó el muestreo fue en "L" para extraer las muestras de suelo de cero a 10 cm.

La toma de muestra fue de dos tipos. Primero con un cilindro metálico de 5x10 cm se toma la muestra de suelo inalteradas para determinar densidad aparente (Da) y luego con una pala se extrajo 1 kg de suelo para determinar las propiedades físico-químicas.

Con las muestras debidamente codificadas en campo, fueron secadas al ambiente, trituradas y tamizadas con una malla de 2 mm. Luego se procedió a la determinación de propiedad física textural (arena, limo y arcilla) por el método de Bouyoucos en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala. También se determinaron varias propiedades químicas del suelo (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos de laboratorio para determinar las propiedades químicas del suelo.

Propiedades	Unidad	Métodos
pH	1:1,2	H2O (1:2,5)
Nitrógeno (N)	%	Kjeldhal
Fósforo (P)	(mg/kg)	Olsen modificado a pH 8.5 (Olsen y Sommers, 1982).
Potasio (K+)	(cmol/kg)	Olsen modificado a pH 8.5 (Olsen y Sommers, 1982).
Calcio (Ca ⁺⁺)	(cmol/kg)	Extracción de KCL 1N (US-DA-NRCS, 2014).

Magnesio (cmol/ Mg++) (kg) Extracción de KCL 1N(US-DA-NRCS, 2014).

Suma de Bases

Obtención del atributo topográfico pendiente

Para determinar el atributo topográfico pendiente se descargó de la plataforma Alaska Satellite Facility (<https://www.asf.alaska.edu/>) provisto por la NASA una cuadrícula de 12.5 m x 12.5 m del área de estudio que corresponde al frame 7130, path 109 y frame 7120, path 109 (13 de marzo 2009). con los datos descargados se conformó un modelo de elevación digital (DEM), con la herramienta ArcToolbox, dentro del programa ArcGis versión 10.3 (ESRI, 2014), obteniendo el DEM de la parroquia El Progreso. los valores de la pendiente fueron extraídos al realizar un buffer de 15 m del DEM obtenidos de la parroquia El Progreso.

En el mapa de pendiente se clasificó y los sitios donde se tomaron las muestras se encuentra dentro de: fuertemente inclinado para los usos del suelo banano y cacao joven y ligeramente inclinado para el cacao maduro (Figura 2).

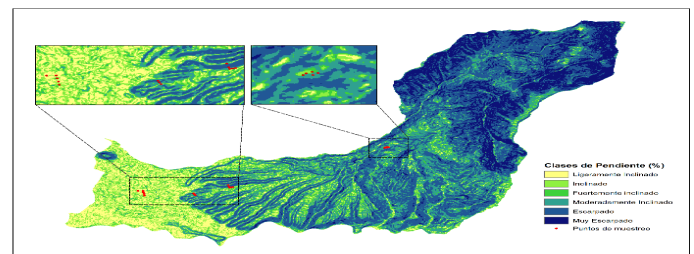


Figura 2. Mapa de Clases de Pendiente en sitio El Progreso

Determinación del Conjunto mínimo de datos (CMD)

Los pasos para desarrollar el índice de calidad del suelo fueron tomados de Andrews, et al. (2002), y consisten en: 1) selección de propiedades del suelo mediante un análisis de componentes principales (ACP), 2) extraer las propiedades con mayor varianza para establecer como variables en análisis y conformar un conjunto mínimo de datos, 3) normalizar las variables para transformarla en indicadores que conforman el índice de calidad del suelo.

Cálculo del Índice de Calidad del Suelo (ICS)

Se procedió un análisis de componentes principales (ACP) para la selección de indicadores que conforman el conjunto de datos mínimos (CDM), fueron tomadas los autovectores >1 y que su distancia representa el 10% de la carga del mayor eigenvectores con respecto al valor más alto $\geq 0,40$.

Conforme Ghaemi, et al. (2014), para el proceso de eliminación de las variables redundantes del

resultado del ACP se aplica la matriz de correlación de Pearson al 0,01 y 0,05 de significancia, extrayendo los coeficientes de correlación (r) $\geq 0,6$, para completar el CMD.

Para el cálculo de la Relación de CMD con el atributo topográfico Pendiente (%) se realizó mediante la técnica de regresión lineal de la expresión de la variable pendiente (Y) respecto al CMD completado (X) variables ya seleccionadas, buscando los modelos de regresión (R^2) mayores a 0,7 siendo estos valores adecuados para realizar una predicción.

Las variables del CMD fueron normalizadas, de forma lineal entre cero a 1. Luego se procedió a obtener el promedio, y ser clasificado cada uso de suelo en una escala donde los valores menores a 0,2 son de muy baja calidad y mayor a 0,62 de muy alta calidad (Tabla 2) (Sánchez-Navarro & Gil-Vázquez, 2015).

Tabla 2. Niveles de ICS.

Puntuación	Niveles
$\leq 0,2$	Muy baja calidad
0,29 a 0,38	Baja calidad
0,39 a 0,53	Moderada calidad
0,54 a 0,61	Alta calidad
$\geq 0,62$	Muy alta calidad

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis descriptivo de las propiedades físicas se presenta en la Tabla 3. La Da varió de 1,08 g/m^3 a 1,46 g/m^3 , con el mayor en el uso del suelo cacao maduro (1,46 g/m^3) y el menor en el suelo con uso de cacao joven (1,08 g/m^3). La gravimetría indica que los contenidos de limo fueron mayores y oscilan entre 39,20 % (cacao maduro) a 47,20 % (cacao joven), mientras la arcilla y arena sus contenidos variaron entre 19,60 % (banano) a 27,20% (cacao maduro) y 38,80%(banano) a 33,60 % (cacao maduro) respectivamente. Estos resultados indican que la clase textural Franco predomina en los usos de suelo Cacao Joven y Banano, a diferencia de Cacao Maduro que la clase textural Franco Arcilloso.

Tabla 4. Estadístico descriptivo de las propiedades químicas de los usos del suelo (0-10 cm), en la parroquia el Progreso (Ecuador).

	pH	C	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Banano	6,10 \pm 1,04	2,56 \pm 0,24	0,22 \pm 0,04	11,52 \pm 4,77	0,5 \pm 0,16	12,84 \pm 3,47	3,04 \pm 0,57	182,06 \pm 85,58	30,56 \pm 22,94	4,52 \pm 0,52	7,2 \pm 1,04
Cacao Joven	5,80 \pm 0,38	3,58 \pm 1,11	0,28 \pm 0,11	6,5 \pm 1,14	0,46 \pm 0,23	11,98 \pm 2,77	2,7 \pm 0,36	331,84 \pm 146,03	119,4 \pm 71,13	11,36 \pm 3,05	9,04 \pm 1,12
Cacao maduro	7,36 \pm 0,41	1,32 \pm 0,48	0,12 \pm 0,04	10,4 \pm 11,57	0,38 \pm 0,22	13,44 \pm 3,79	1,92 \pm 0,65	24,02 \pm 6,5	25,04 \pm 9,25	7,00 \pm 1,93	7,56 \pm 3,93

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las propiedades físicas de los usos del suelo (0-10 cm), en la parroquia el Progreso (Ecuador).

	Da	Arena	Limo	Arcilla
Banano	1,42 \pm 0,11	38,80 \pm 8,79	41,60 \pm 6,07	19,60 \pm 4,98
Cacao Joven	1,08 \pm 0,13	31,20 \pm 8,07	47,20 \pm 7,56	21,60 \pm 2,61
Cacao maduro	1,46 \pm 0,17	33,60 \pm 4,34	39,20 \pm 1,10	27,20 \pm 4,15

En la Tabla 4 se presenta el análisis descriptivo de las propiedades químicas de los usos de suelo. El pH en todos los usos del suelo variaron entre 7,6 (ligeramente alcalino) en cacao maduro, a 5,80 (medianamente ácido) en Cacao joven y 6,10 (ligeramente ácido 6,10) en Banano. Villaseñor, et al. (2015), determinaron en varios usos del suelo en la Provincia de El Oro un pH promedio de 6,8, pero Barrezueta-Unda (2019), determinó una alta variación en suelos cacaoteros (pH 4,5-8,5).

En el uso de suelo cacao Joven, el contenido de C (3,58%) y N (0,28%) son los picos más altos, seguido del banano (C 2,56 %; N 0,22 %); esto indica que los niveles de C son altos en estos usos del suelo y bajos en N, resultado similar a los obtenidos por Barrezueta-Unda, (2019). El promedio de P (11,52 mg/kg) y K (0,5 cmol/kg) en el uso de suelo en Banano resultaron mayores a los usos de suelo Cacao Joven (6,5 mg/kg, 0,46 cmol/kg) y Maduro (10,4 mg/kg, 0,38 cmol/kg) debido al manejo agronómico y la demanda de nutrientes durante sus etapas fenológicas; González, et al. (2018), mencionan que se deben realizar aplicaciones frecuentes de estos nutrientes por su alta capacidad de ser removido en el proceso fisiológico de las plantas.

En general, el Ca se muestra como el menor valor en el uso de suelo cacao joven (11,98 cmol/kg), seguido de los 12,84 cmol/kg y 13,44 cmol/kg, que corresponde a banano y cacao maduro, respectivamente. Los valores de Mg fueron 3,04 cmol/kg (Banano), 2,7 cmol/kg (Cacao Joven) y 1,92 cmol/kg (Cacao Maduro). En el caso del Fe (331,84 mg/kg), Mn (119,4 mg/kg), Cu (11,36 mg/kg) y Zn (9,04 cmol/kg) se presentan los picos más altos en el uso de suelos cacao Joven.

Selección de CMD

El ACP del uso del suelo banano, género se tres componentes que representan el 94,887% de la varianza total de los datos originales (Tabla 5). Del primer componente principal (CP1) que representa el 33,08% de la varianza explicada, las variables seleccionadas de mayor peso son: Arena (0,884), Limo (-0,970) y K (0,935); en el CP2(32,45%) la Da (-0,918) con el Carbono (0,871), N (0,873) y Mg (0,935) son los de mayor peso; Mientras en el CP3(29,36%) el Ca (-0,881), Cu (0,890) y Zn (0,977) muestran coeficientes más altos.

Tabla 5. Resultados del ACP de los ICS en el uso de suelo Banano.

Componentes Principales	CP1	CP2	CP3
Eigevalor *	4,961	4,868	4,404
% de varianza	33,076	32,452	29,359
% acumulado	33,076	65,528	94,887
Coeficiente de ponderación	,349	,342	,309
Eigevector	1	2	3
Arena (%)	,884**	-,422	-,180
Limo (%)	-,970**	-,126	,200
Arcilla (%)	-,378	,898	,074
Da (dS/m)	-,085	-,918**	-,068
pH (1:1,2)	,754	,030	-,644
Carbono (%)	-,438	,871**	-,149
N (%)	-,195	,873**	-,104
P (mg/kg)	,740	,306	-,598
K (cmol/kg)	,935**	-,219	,257
Ca (cmol/kg)	,158	,318	-,881**
Mg (cmol/kg)	,329	,935**	,131
Fe (mg/kg)	-,787	,396	,428
Mn (mg/kg)	-,145	,473	,853
Cu (mg/kg)	-,287	,066	,890**
Zn (cmol/kg)	,095	,044	,977**

*Los valores propios en negrita corresponden a las variables seleccionadas para el índice.

**Las cargas con factor de negrita se consideran altamente ponderadas.

El uso del suelo cacao joven muestra en el ACP la extracción de tres CP que representan el 94,049% de la varianza total de los datos (Tabla 6). Las variables seleccionadas del PC1 (41,83%) son: Limo (0,953), Carbono (0,945) y N (0,952) lo que nos indica las condiciones de fertilidad y reacción del suelo, en el PC2 (30,00%) el indicador K (0,948) presentó el mayor peso del componente, seguido de Da (-0,950). En el PC3(22,23%) se seleccionó el pH (0,925) junto con el Cu (0,908).

Tabla 6. Resultados del ACP de los ICS en el uso de suelo Cacao_Joven.

Componentes Principales	CP1	CP2	CP3
Eigevalor *	6,274	4,500	3,334
% de varianza	41,827	29,997	22,225
% acumulado	41,827	71,824	94,049
Coeficiente de ponderación	,445	,319	,236
Eigevector	1	2	3
Da (dS/m)	,069	-,950**	-,048
Arena (%)	-,974	-,128	-,154
Limo (%)	,953**	-,196	,186
Arcilla (%)	,250	,965	-,063
pH (1:1,2)	,286	,249	,925**
Carbono (%)	,945**	,253	-,086
N (%)	,952**	,247	-,096
P (mg/kg)	,753	,658	-,017
K (cmol/kg)	-,026	,948**	,272
Ca (cmol/kg)	,736	-,547	-,067
Mg (cmol/kg)	,000	-,510	-,797
Fe (mg/kg)	-,688	,540	-,481
Mn (mg/kg)	,775	-,071	,624
Cu (mg/kg)	-,102	-,380	,908**
Zn (cmol/kg)	,524	-,304	-,488

*Los valores propios en negrita corresponden a las variables seleccionadas para el índice.

**Las cargas con factor de negrita se consideran altamente ponderadas.

El ACP (Tabla 7) del uso de suelo Cacao Maduro alcanzando los últimos tres CP los mismo que presentan el 83,11% de la varianza total, en el PC1 (32,42% de varianza total) los indicadores con mayor eigevalor fueron las variables químicas N (0,962), Ca (0,947) y Cu (0,952), en el PC2(28,22%) el indicador Arena(0,881) presentó el mayor peso del componente, lo que confirma lo encontrado por Acosta, et al. (2005), en suelos arenosos o franco arcillo arenoso predominaron las propiedades químicas en los primeros componentes principales y en los últimos las propiedades físicas presentaron mayor peso.

Tabla 7. Resultados del ACP de los ICS en el uso de suelo Cacao_Maduro.

Componentes Principales	PC1	PC2	PC3
Eigevalor *	4,862	4,233	3,370
% de varianza	32,416	28,220	22,468
% acumulado	32,416	60,637	83,105
Coeficiente de ponderación	,390	,340	,270

Eigenvector	1	2	3
Da (dS/m)	-,832	,186	-,156
Arena (%)	,461	,881**	-,009
Limo (%)	,461	-,524	,609
Arcilla (%)	-,604	-,782	-,151
pH (1:1,2)	,764	,011	-,630
Carbono (%)	,978	,080	,116
N (%)	,962**	,166	-,047
P (mg/kg)	,976	,179	-,094
K (cmol/kg)	-,561	,645	,518
Ca (cmol/kg)	,947**	-,042	,031
Mg (cmol/kg)	-,722	-,522	,259
Fe (mg/kg)	-,870	,472	,133
Mn (mg/kg)	-,801	,527	,101
Cu (mg/kg)	,952**	,051	,294
Zn (cmol/kg)	,715	-,132	,520

-*Los valores propios en negrita corresponden a los PC examinados para el índice.

Tabla 8. Matriz de correlación de Pearson.

BANANO										
	Limo	Arena	K	Da	Carbono	N	Mg	Ca	Cu	Zn
Limo	1,00									
Arena	-0,84	1,00								
K	-0,83	0,86	1,00							
Da	0,17	0,29	0,14	1,00						
Carbono	0,29	-0,71	-0,66	-0,82	1,00					
N	0,04	-0,56	-0,35	-0,61	0,79	1,00				
Mg	-0,41	-0,13	0,14	-,893*	0,65	0,74	1,00			
Ca	-0,35	0,19	-0,18	-0,37	0,39	0,20	0,23	1,00		
Cu	0,47	-0,41	-0,09	-0,23	0,11	-0,13	0,08	-0,70	1,00	0,78
Zn	0,09	-0,13	0,35	-0,04	-0,18	0,00	0,20	-,890*	0,78	1,00
Cacao Joven										
	LIMO	N	CARBONO	Da	K	pH	Cu			
Limo	1									
N	,821	1								
Carbono	,810	,999**	1							
Da	,284	-,210	-,227	1						
K	-,138	,159	,162	-,866	1					
Ph	,399	,240	,247	-,252	,485	1				
Cu	,126	-,257	-,245	,268	-,134	,712	1			
Cacao Maduro										
	N	Cu	Ca	ARENA	LIMO	Da	Zn			
N	1									
Cu	,896*	1								
Ca	,835	,930*	1							

**Las cargas con factor de negrita se consideran altamente ponderadas

La matriz de Pearson para el uso de suelo Banano (Tabla 8) presenta dos correlaciones significativas negativas entre Mg y Da (-0,893*) y Zn y Ca (-0,890*). Esto indica que los valores de Mg y Zn aumentan, disminuyen la Da y el Ca, respectivamente. El Cacao Joven muestra una correlación altamente significativa (0,99**) entre el carbono y el N.

Posteriormente en el uso de suelos Cacao Maduro (Tabla 10) la relación de las variables debidamente seleccionadas en el ACP (Tabla 7), muestran la relación proporcional directa para la variable N con: Ca (0,835) y Arena (0,567), se evidencia una alta relación entre Cu y las variables Ca (0,930), Cu (0,896), así mismo el Cu y Limo (0,566), en cuanto al Zn con las variables: N (0,546), Cu (0,857), Ca (0,841) y Limo (0,548); mientras que la relación inversa para las variables Da con N (-0,869), Cu (-0,796), Ca (-0,643) y Limo (-0,764).

Arena	,567	,489	,433	1			
Limo	,408	,566	,359	-,295	1		
Da	-,869	-,796	-,643	-,165	-,764	1	
Zn	,546	,857	,841	,257	,548	-,478	1

*. La correlación es significativa a nivel 0,05.
 **. La correlación es significativa a nivel 0,01.

Relación de CMD con el atributo topográfico Pendiente (%)

Los modelos lineales que se generaron entre las variables seleccionadas del CMD y la pendiente y con el coeficiente de determinación (R^2), se presentan en la Tabla 9, el uso de suelo banano muestra el mayor R^2 K (0,8629), seguido de Carbono (0,7408) y el menor de Cu (0,0189), tanto en los usos Cacao Joven y Maduro la R^2 no presentó un bajo modelo ($<0,7$) siendo valores inadecuados para realizar una predicción.

Tabla 9. Modelos lineales entre usos de suelos y las variables del ICS.

Uso de Suelo	Variable	Ecuación	R^2
Banano	Arena	$-0,3844x + 23,107$	0,6779
	Limo	$0,4415x - 10,173$	0,4262
	K	$24,1x + 20,242$	0,8629
	Da	$-18,338x + 34,231$	0,2398
	Carbono	$14,661x - 29,341$	0,7408
	N	$44,225x - 1,5375$	0,2324
	Mg	$1,2672x + 4,3396$	0,0313
	Zn	$-1,3937x + 18,227$	0,1241
	Cu	$1,0906x + 3,2623$	0,0189
	Ca	$0,4155x + 2,857$	0,1234
Cacao_Joven	Limo	$0,1821x + 4,2758$	0,1273
	Carbono	$2,6455x + 3,399$	0,5836
	N	$27,083x + 5,2867$	0,5909
	Da	$-12,235x + 26,084$	0,1709
	K	$4,4575x + 10,82$	0,0707
Cacao_Maduro	Ph	$-2,8845x + 29,6$	0,081
	Cu	$-1,0161x + 24,413$	0,6462
	N	$-14,375x + 4,635$	0,2074
	Ca	$-0,2487x + 6,2525$	0,4462
	Cu	$-0,5371x + 6,6697$	0,5415
	Arena	$0,058x + 0,9619$	0,0317

Valores normalizados y conformación del índice de calidad del suelo (ICS)

En la Tabla 10 se presentan las variables seleccionadas el CMD y que fueron normalizados para conformar los indicadores del ICS. Los indicadores que presentaron los mayores valores en el uso de suelo

Banano corresponden al Cu (0,517), K (0,500), Mg (0,493); en el caso de los usos de suelo Cacao Joven los mayores valores de calidad que se presentaron en los indicadores Da (0,600), Limo (0,560) y K (0,520); el indicador Arena (0,560) con mayor ponderación en el uso de suelo Cacao Maduro

Tabla 10. ICS normalizados por uso de suelo.

BANANO							
	B1	B2	B3	B4	B5	Promedio	
Limo	0,50	0,32	0,62	0,25	0,00	0,34	
Arena	0,00	0,00	0,50	0,70	1,00	0,44	
K	0,25	0,00	0,50	1,00	0,75	0,50	
Da	0,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,40	
Carbono	1,00	0,67	0,00	0,17	0,33	0,43	
N	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	
Mg	1,00	0,27	0,00	0,67	0,53	0,49	
Ca	0,58	0,43	0,21	0,00	1,00	0,44	
Cu	0,42	0,92	0,25	1,00	0,00	0,52	
Zn	0,45	0,38	0,41	1,00	0,00	0,45	
						ICS	0,42

CACAO_JOVEN							
	CO1	CO2	CO3	CO4	CO5	Promedio	
Limo	0,00	1,00	0,50	0,80	0,50	0,56	
Carbono	0,05	1,00	0,00	1,00	0,05	0,42	
N	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	0,40	
Da	0,00	0,33	1,00	0,67	1,00	0,60	
K	1,00	1,00	0,40	0,20	0,00	0,52	
Ph	0,30	1,00	0,20	0,00	0,50	0,40	
Cu	0,27	0,69	0,32	0,00	1,00	0,46	
						ICS	0,47

CACAO_MADURO							
	CM1	CM2	CM3	CM4	CM5	Promedio	
N	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,20	
Ca	0,50	0,43	0,00	0,03	1,00	0,39	
Cu	0,47	0,07	0,00	0,02	1,00	0,31	
Arena	0,40	0,40	0,00	1,00	1,00	0,56	
						ICS	0,39

*Donde B1, B2, B3, B4, B5 corresponden al Horizonte 1
CO1, CO2, CO3, CO4, CO5 corresponden al Horizonte 1
CM1, CM2, CM3, CM4, CM5 corresponden al Horizonte 1

Se integraron los promedios de ICS (Tabla 12) de cada uso de suelo, a partir de estos resultados podemos señalar que el ICS en el uso Cacao Joven y Banano presentaron un promedio de (0,47 y 0,42) que presenta un nivel de la calidad moderada; no así en el uso de suelo Cacao Maduro que presentó un valor de 0,39 siendo un valor muy próximo al nivel de baja calidad. Bravo, et al., (2017), indican que la densidad aparente, el carbono C que es considerado un atributo clave dada su marcada influencia sobre la mayoría de las propiedades del suelo. La disminución del C orgánico sería la causa principal de los valores bajos del indicador estabilidad de agregados y la pendiente son las variables que definen el impacto del cambio de uso sobre la calidad del suelo, como lo expresan Cantú, et al. (2007), es importante señalar que estos indicadores de estado del recurso suelo no son universales sino que deben ser elegidos en función del tipo de ambiente y suelo de la región en estudio.

CONCLUSIONES

Los suelos se caracterizaron por ser heterogéneos, en el uso de suelo banano presentó condiciones de textura Franco, con un pH ligeramente ácido (6,10), con un rango de Da (1,42 g/m³) y porcentaje de arcilla 19,60% que supone un grado moderado de compactación; mientras que los suelos con cacao tuvieron condiciones de Franco(cacao joven) y Franco Arcilloso (cacao maduro), con rangos de pH en el uso cacao joven de 5,80 (medianamente ácido) y cacao maduro de 7,36(ligeramente alcalino), en cuanto a la Da el uso con el mayor valor en cacao maduro (1,46 g/m³) y en el suelo con cacao joven (1,08 g/m³), el mayor porcentaje de arcilla 27,20% (cacao maduro) y 21,60% (cacao joven).

El uso de suelo con mayor índice de ICS se presentó en el cultivo de Cacao joven (0,47) lo que manifiesta un nivel de calidad moderada, igual a la calidad mostrada por el cultivo de Banano (0,42) al contrario del cultivo de Cacao maduro (0,39) que presenta un nivel de baja calidad.

La metodología usada y la obtención de los ICS estuvieron compuestas con procedimientos sencillos y con investigación disponible, de tal forma que se puede emplear en localidades con recursos económicos y técnicos muy restringidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta, B., Márquez, O., Mora, E., & García, V. (2005). Uso del método de análisis de componentes principales para la evaluación de la relación suelo productividad en *Eucalyptus* spp. estado Portuguesa-Venezuela. *Revista Forestal*, (37), 17 – 44.

Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(1), 25–45.

Barrezueta-Unda, S. (2019). Propiedades de algunos suelos cultivados con cacao en la provincia El Oro, Ecuador. *CienciaUAT*, 14(1), 155–166.

Bravo, C., Torres, B., Alemán, R., Marín, H., Durazno, G., Navarrete, H., Gutiérrez, E. T., & 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.

Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia Del Suelo*, 25(2), 173-178.

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology: A Section of Agriculture, Ecosystems & Environment*, 15, 3-11.

Ghaemi, M., Astaraei, A. R., & Emami, H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds-east of Mashhad-Iran. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 14(4), 1005-1020.

González Gordon, R. A., David Silva, N., Suarez Calderón, A., & Castañeda Sánchez, D. A. (2018). Evaluación de la calidad química del suelo en agroecosistemas cacaoteros de la subregión del Nordeste y Urabá Antioqueño. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 5(1), 41–52.

Labrador, J., & Biológicas, C. (2008). Manejo del suelo en los sistemas agrícolas de producción ecológica. Sociedad Española de Agricultura Ecológica.

Sánchez-Navarro, A., & Gil-Vázquez, J. M. (2015). Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *Catena*, 131, 35-45.

Villaseñor, D., Chabla, J., & Luna, E. (2015). Caracterización física y clasificación taxonómica de algunos suelos dedicados a la actividad agrícola de la provincia de El Oro. *Cumbres*, 1(5).