

Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)¹

Evaluation of soil fertility in agroforestry systems with African Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Parménides Furcal-Beriguete², Zeydi Robles-Argüello³, Ricardo Salazar-Díaz⁴

Fecha de recepción: 26 de enero, 2022
Fecha de aprobación: 18 de mayo, 2022

Furcal-Beriguete, P; Robles-Argüello, Z; Salazar-Díaz, R.
Evaluación de la fertilidad de los suelos en sistemas agroforestal con Palma Africana (*Elaeis guineensis* jacq.). *Tecnología en Marcha*. Vol. 36, Nº 2. Abril-Junio, 2023. Pág. 20-31.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v36i2.5903>

- 1 Este trabajo forma parte del proyecto de investigación Modelación de producción, protección y evaluación económica de cultivos en sistemas agroforestales de cacao en Osa y Golfito, código 1431031, financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, TEC.
- 2 Centro de Investigaciones y Desarrollo en Agricultura Sostenible del Trópico Húmedo (CIDASTH), Campus Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pafurcal@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8695-4523>
- 3 Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: zeydyrobles@gmail.com
- 4 Escuela de Agronegocios, Centro de Investigación y Gestión Agroindustrial (CIGA), Campus Central, Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: risalazar@itcr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-1954-0133>

Palabras clave

Contenido de nutrientes en suelos; sistema agroforestal; características de suelos; *Cordia megalantha*; *Theobroma cacao*.

Resumen

Se muestrearon cinco parcelas de tres años, establecidas por la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO), cada parcela constaba con dos tratamientos los cuales fueron sistema agroforestal (SAF) integrado por *E. guineensis*, *C. megalantha*, *T. cacao* y *Musa sp*, y el monocultivo de *E. guineensis*; cuyo objetivo fue evaluar el efecto de un sistema productivo agroforestal con *Elaeis guineensis* sobre la fertilidad fisicoquímica del suelo. Se determinó la densidad aparente del suelo y se extrajeron muestras compuestas en dos profundidades, obteniéndose el contenido de nutrientes, la materia orgánica, la densidad de partículas y la porosidad. Los datos fueron analizados estadísticamente en donde las parcelas fungieron como bloques, sin mostrar diferencias significativas para algunas variables edáficas y elementos evaluados; sin embargo, el contenido de fósforo fue significativamente más alto en el SAF y disminuyó con la profundidad del suelo 0 – 20 cm a 20 – 40 cm, el magnesio aumentó estadísticamente del año 2019 al 2020, igualmente que la materia orgánica, el carbono y el nitrógeno total y fueron superiores en la superficie (0 -20 cm) que a la profundidad 20 - 40 cm.

Keywords

Nutrient content in soil; agroforestry system; soil characteristics; *Cordia megalantha*; *Theobroma cacao*.

Abstract

Five three-year-old plots established by the Osa & Golfito Initiative (INOGO) were sampled, where each experimental plot consisted of two treatments, corresponding to an agroforestry system and a monoculture system of *E. guineensis*. Whose objective was to evaluate the effect of an agroforestry production system with *Elaeis guineensis* on the physicochemical fertility of the soil. The agroforestry system was integrated by *E. guineensis*, *Cordia megalantha*, *Theobroma cacao* and *Musa sp*. The bulk density of the soil was determined and composite samples were extracted at two depths, obtaining nutrient content, organic matter, particle density and porosity. The data were statistically analyzed where the plots served as blocks, without showing significant differences for some edaphic variables and elements evaluated; however, phosphorus content was significantly higher in FAS and decreased with soil depth from 0 - 20 cm to 20 - 40 cm, magnesium increased statistically from 2019 to 2020, as well as organic matter, carbon and total nitrogen and were higher at the surface (0 -20 cm) than at the depth of (20 - 40 cm).

Introducción

En Costa Rica, la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) es el segundo cultivo perenne con mayor área sembrada, aproximadamente 76.910 ha se encuentran dedicadas a su producción, con un alcance en el 2018 de 1.087.800 t [1], y una exportación del 65 % de la producción de aceite [2]. En la región Brunca, el cultivo de *E. guineensis* tiene gran importancia e impacto en los sectores económico, social y ambiental [3]; en esta zona se concentra el 68 % del área cultivada a nivel nacional [2]. En los cantones de Osa y Golfito es el principal cultivo agrícola en producción. Sin embargo, el monocultivo en el que se produce y su expansión es vista con preocupación por los ambientalistas [3].

En cualquier sistema de producción el suelo es un factor determinante y cada vez se vuelve un recurso más limitado. Aunado a esto, el monocultivo es una práctica que contribuye al deterioro del suelo a través del tiempo tanto físico, químico como biológico. En el cultivo de *E. guineensis* los problemas más comunes son el daño a la estructura del suelo que causa compactación lo que genera disminución de la tasa de infiltración y por consiguiente mayor escorrentía superficial [4], intensificando la pérdida de nutrientes a causa de la erosión.

La situación descrita permite establecer modelos más estables, entre ellos, los sistemas agroforestales (SAF) que permiten el cambio del uso del suelo con probabilidad de recuperarse de un estado de degradación y aumentar la productividad, entre otros [5], [6]. Los SAF aumentan el contenido de materia orgánica y con ello mejoran la estructura del suelo y otras propiedades físicas como la densidad aparente, la infiltración, la porosidad [7]. En ese orden, con los SAF se logra un aumento de la productividad y la eficiencia del uso del suelo del agroecosistema [8].

Esta investigación forma parte de la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO), que plantea implementar una estrategia para el desarrollo humano sostenible y la gestión ambiental en los cantones de Osa y Golfito de Costa Rica [3]. El Laboratorio Experimental de Palma Africana (LAPA) forma parte de esta iniciativa, investigando el impacto de entremezclar la *E. guineensis* con *Musa* sp., *Cordia megalantha* y *Theobroma cacao*, con el fin de determinar la capacidad de este sistema de compensar la pérdida de biodiversidad que ocurre en las plantaciones tradicionales. En ese sentido, se planteó como objetivo evaluar el efecto de un sistema de producción agroforestal con *E. guineensis* sobre la fertilidad fisicoquímica del suelo en el proyecto LAPA en los cantones de Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica.

Materiales y métodos

Localización y generalidades del proyecto

El área en estudio estuvo conformada de cinco parcelas ubicadas en las localidades de Chacarita, Piedras Blancas, Rancho Quemado, La Palma y La Guaria; las tres primeras pertenecen al cantón de Golfito, mientras que las dos últimas se localizan en el cantón de Osa, ambos en la provincia de Puntarenas, Costa Rica. Estas fueron establecidas y conducidas por el Laboratorio Experimental de Palma Africana Sostenible (LAPA) de la Iniciativa Osa & Golfito (INOGO).

El cantón de Golfito se localiza en la zona de vida Bosque Muy Húmedo Premontano y el cantón de Osa en Bosque Muy Húmedo Tropical [9], presentan altas precipitaciones con promedios mensuales de 347,7 mm y 334,0 mm y altas temperaturas con rangos de 23,5 ° C a 29,2 ° C en Golfito y para la localidad de Piedras Blancas la precipitación promedio es de 509,9 mm y rango de temperatura de 21,9 ° C a 31,8 ° C en Río Claro [10].

Los órdenes de suelos son Ultisol principalmente, asociación Entisol-Inceptisol e Inceptisol, según el mapa de suelos de Costa Rica [11], Figura 1.

Los trabajos de campo se iniciaron en el primer semestre del año 2019 y finalizaron en noviembre de 2020. Las parcelas fueron establecidas en el año 2016, principalmente entre los meses de agosto a octubre, con la siembra de todos los cultivos, excepto las plántulas de *C. megalantha* y la parcela en Chacarita que se establecieron en el año 2017.

Para evaluar la fertilidad fisicoquímica del suelo, fueron consideradas variables que definen la acidez tales como pH, suma de bases, acidez extraíble y saturación de acidez; además de macro y microelementos, también la materia orgánica y la relación C/N. Por otro lado, se determinaron la densidad aparente (Dap) y la de partículas o real (Dr), con las cuales se obtuvo

la porosidad. Se tomaron muestras a dos profundidades 0 - 20 cm y 20 - 40 cm debido a que alrededor del 80 % de las raíces de las especies de plantas dentro de este sistema agroforestal no superan esta profundidad, se hicieron análisis químicos a través de las soluciones extractoras KCl-Olsen Modificado y el porcentaje de carbono y nitrógeno totales a través del método Autoanalizador Dumas. La acidez fue determinada por valoración con NaOH y el Al con HCl; el P y S por colorimetría con el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) y los demás elementos como el potasio, calcio, magnesio y zinc por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

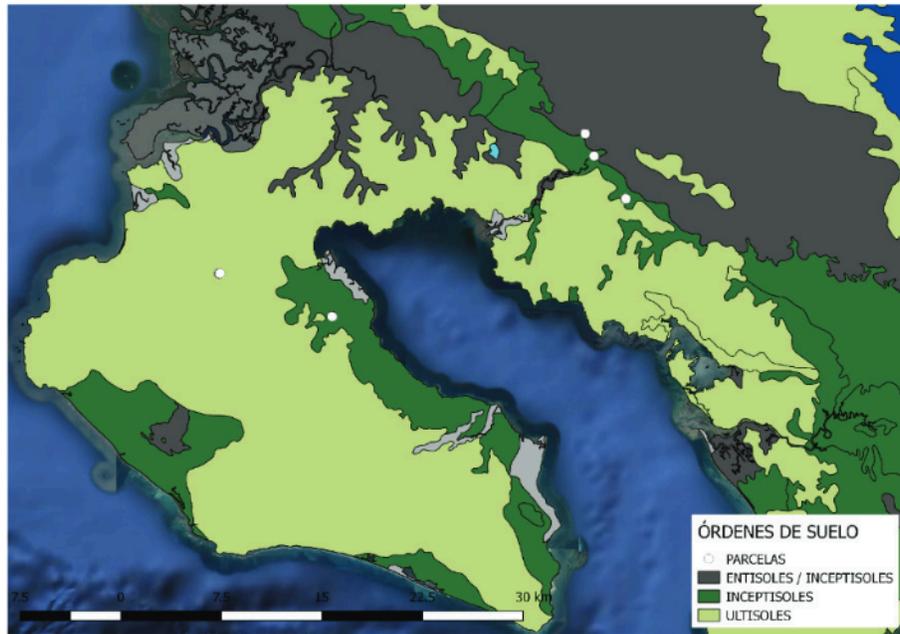


Figura 1. Órdenes de suelos presentes en las parcelas del proyecto LAPA, Osa y Golfito, Puntarenas, Costa Rica. Fuente: Elaborado con base en CIA 2020 [11].

La Dap se determinó por el método de cilindros de volumen conocido, se tomaron tres muestras de suelo con tres repeticiones de 0 - 20 cm de profundidad en cada unidad experimental. Mientras que la Dr, en el segundo año, se determinó por el método del picnómetro.

Diseño experimental y arreglo de tratamientos

El experimento constó de cinco parcelas en localidades diferentes con dos tratamientos cada una, sistema agroforestal y monocultivo de palma, con un área de 5.000 m² cada tratamiento. Estos fueron un sistema agroforestal que combinó *E. guineensis* sembrada 9 m x 12 m para un total de 93 plantas/ha, *C. megalantha* (42 árboles/ha), *T. cacao* (632 árboles/ha) y *Musa* sp. (plátano, banano o cuadrado) (976 plantas/ha) y un control con *E. guineensis* en arreglo "tresbolillo" con 9 m x 9 m.

Se utilizó un Diseño de Parcelas Divididas con Bloqueo, con dos tratamientos y cinco repeticiones (localidades) por tratamiento. El factor A correspondió a cada parcela (localidades) y el factor B correspondió a los dos tratamientos dentro de cada parcela. Se usó la prueba de comparación de medias DGC (Di Rienzo, Guzmán y Casanoves, versión 2018), con un nivel de significancia de 0,05 [12].

Resultados

En este capítulo del estudio se muestran a continuación diferentes cuadros y figuras con los resultados obtenidos, los cuales posteriormente serán discutidos.

En el cuadro 1 se presentan los valores de variables de fertilidad química de suelos en los dos tratamientos, Sistemas Agroforestales (SAF) y Monocultivo de palma africana (*E. guineensis*) correspondientes a las cinco parcelas que conforman el proyecto LAPA.

Cuadro 1. Valores promedios de variables que inciden en la fertilidad los de suelos.

| Variable | SAF | | | | Monocultivo | | | |
|---------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
| | Año | | Año | | Año | | Año | |
| | 2019 | 2020 | 2019 | 2020 | 2019 | 2020 | 2019 | 2020 |
| | Profundidad de muestreo (cm) | | | | | | | |
| | 0-20 | 20-40 | 0-20 | 20-40 | 0-20 | 20-40 | 0-20 | 20-40 |
| pH | 6,00 | 6,18 | 5,76 | 6,18 | 5,92 | 6,24 | 5,76 | 5,98 |
| σ | 0,88 | 0,80 | 0,69 | 0,72 | 0,55 | 0,84 | 0,37 | 0,58 |
| Mín | 5,00 | 5,20 | 4,90 | 5,40 | 5,10 | 5,20 | 5,30 | 5,20 |
| AE (cmol(+)/L) | 0,57 | 0,33 | 0,48 | 0,40 | 0,50 | 0,48 | 0,53 | 0,61 |
| σ | 0,79 | 0,43 | 0,62 | 0,45 | 0,64 | 0,70 | 0,49 | 0,64 |
| Máx | 2,14 | 1,20 | 1,71 | 1,28 | 1,77 | 1,88 | 1,18 | 1,62 |
| S.bases (cmol(+)/L) | 29,18 | 31,06 | 30,11 | 32,01 | 30,05 | 31,44 | 30,81 | 30,98 |
| σ | 14,73 | 15,00 | 15,11 | 16,60 | 13,47 | 14,61 | 15,09 | 14,71 |
| Mín | 5,87 | 6,81 | 5,97 | 5,02 | 7,09 | 6,93 | 7,52 | 6,78 |
| S.A. (%) | 2,81 | 3,3 | 4,94 | 4,46 | 4,52 | 4,58 | 3,5 | 4,64 |
| σ | 10,43 | 5,85 | 8,69 | 7,93 | 7,76 | 8,36 | 4,69 | 7,40 |
| Máx | 26,7 | 15 | 22,3 | 20,3 | 20 | 21 | 12,6 | 19,3 |
| Ca (cmol(+)/L) | 26,10 | 27,84 | 25,96 | 28,32 | 26,12 | 27,92 | 26,23 | 26,76 |
| σ | 14,74 | 15,36 | 14,71 | 16,52 | 13,80 | 15,19 | 14,92 | 14,81 |
| Mín | 4,49 | 5,30 | 4,30 | 4,07 | 5,15 | 5,69 | 5,63 | 5,34 |
| Mg (cmol(+)/L) | 2,81 | 3,01 | 3,69 | 3,39 | 3,65 | 3,34 | 4,13 | 3,96 |
| σ | 1,37 | 1,84 | 1,51 | 2,06 | 2,22 | 2,77 | 1,80 | 2,35 |
| Mín | 1,27 | 1,44 | 1,58 | 0,9 | 1,75 | 1,18 | 1,8 | 1,4 |
| K (cmol(+)/L) | 0,26 | 0,20 | 0,45 | 0,28 | 0,28 | 0,18 | 0,44 | 0,27 |
| σ | 0,13 | 0,10 | 0,36 | 0,22 | 0,14 | 0,09 | 0,36 | 0,18 |
| Mín | 0,11 | 0,07 | 0,09 | 0,05 | 0,16 | 0,06 | 0,09 | 0,04 |
| Fósforo (mg/L) | 6,00 | 7,50 | 6,40 | 6,00 | 4,00 | 5,40 | 4,80 | 4,00 |
| σ | 2,74 | 3,20 | 3,98 | 3,29 | 1,22 | 3,38 | 2,86 | 1,90 |
| Mín | 3,00 | 4,00 | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Zn (mg/L) (Dst) | 1,46 | 1,30 | 1,68 | 1,20 | 1,52 | 1,20 | 1,94 | 1,24 |
| σ | 0,45 | 0,33 | 0,51 | 0,55 | 0,50 | 0,30 | 0,46 | 0,50 |
| Mín | 0,70 | 0,80 | 1,10 | 0,20 | 1,00 | 0,80 | 1,40 | 0,50 |
| MO (%) | 3,33 | 2,01 | 4,02 | 2,34 | 3,30 | 2,30 | 4,16 | 2,34 |
| σ | 1,05 | 0,57 | 1,29 | 0,77 | 0,71 | 0,59 | 1,26 | 0,66 |
| Mín | 2,32 | 1,29 | 3,10 | 1,40 | 2,76 | 1,84 | 3,23 | 1,89 |

Nota: Desviación estándar (σ), Mínimo (Mín) y Máximo (Máx) para las variables: acidez extraíble (AE), suma de bases (S.bases), saturación de acidez (S.A.), materia orgánica (MO) y elementos químicos.

Los valores de la densidad aparente (Dap) y la porosidad de los suelos en dos años (2019 y 2020), y la densidad de partículas (real) en el año 2020, a la profundidad de 0 a 20 cm, relacionadas con las cinco localidades del proyecto LAPA, se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Valores promedios de variables físicas de los suelos en los dos tratamientos de las parcelas experimentales.

| Variable | SAF | | Monocultivo | |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------|--------------------------------|------------|
| | Año | | Año | |
| | 2019 | 2020 | 2019 | 2020 |
| | Profundidad de muestreo (0 – 20 cm) | | | |
| Localidad La Palma | | | | |
| Densidad Real (g/ml) | | 2,22±0,03 | | 2,34±0,03 |
| Dap. (g/ml) | 1,01±0,06 | 1,07±0,02 | 0,97±0,06 | 1,09±0,03 |
| Porosidad (%) | 61,89 | 59,81±0,93 | 63,40 | 58,84±1,23 |
| Textura | Franco arcillo arenoso gravoso | | Franco arcillo arenoso | |
| Localidad Rancho Quemado | | | | |
| Densidad Real (g/ml) | | 2,26±0,04 | | 2,35±0,02 |
| Dap. (g/ml) | 0,62±0,05 | 0,95±0,02 | 0,73 ±0,07 | 0,94±0,04 |
| Porosidad (%) | 76,60 | 64,05±0,93 | 72,45 | 64,58±1,47 |
| Textura | Franco arcillo arenoso gravoso | | Franco arcillo arenoso gravoso | |
| Localidad La Guaria | | | | |
| Densidad Real (g/ml) | | 2,26±0,04 | | 2,15±0,06 |
| Dap. (g/ml) | 0,89±0,02 | 0,94±0,02 | 0,91±0,02 | 0,87±0,02 |
| Porosidad (%) | 66,42 | 64,67±0,61 | 65,66 | 67,19±0,61 |
| Textura | Franco gravoso | | Franco arenoso gravoso | |
| Localidad Chacarita | | | | |
| Densidad Real (g/ml) | | 2,34±0,03 | | 2,39±0,01 |
| Dap. (g/ml) | 0,76±0,04 | 1,02±0,03 | 0,79±0,07 | 0,94±0,02 |
| Porosidad (%) | 71,32 | 61,55±1,12 | 70,19 | 64,66±0,76 |
| Textura | Franco arenoso | | Franco arenoso | |
| Localidad Piedras Blancas | | | | |
| Densidad Real (g/ml) | | 2,17±0,04 | | 2,24±0,04 |
| Dap. (g/ml) | 0,93±0,03 | 1,00±0,04 | 0,93±0,03 | 0,93±0,02 |
| Porosidad (%) | 64,91 | 62,27±1,46 | 64,91 | 64,93±0,57 |
| Textura | Franco arenoso | | Franco arenoso | |

Fuente: Datos de 2019 y textura adaptados de Mack 2019 [13].

En la figura 2 se muestran los valores de fósforo y de magnesio, resultados obtenidos de los análisis a dos profundidades de suelos en dos períodos consecutivos en las cinco parcelas experimentales que conforman el proyecto LAPA.

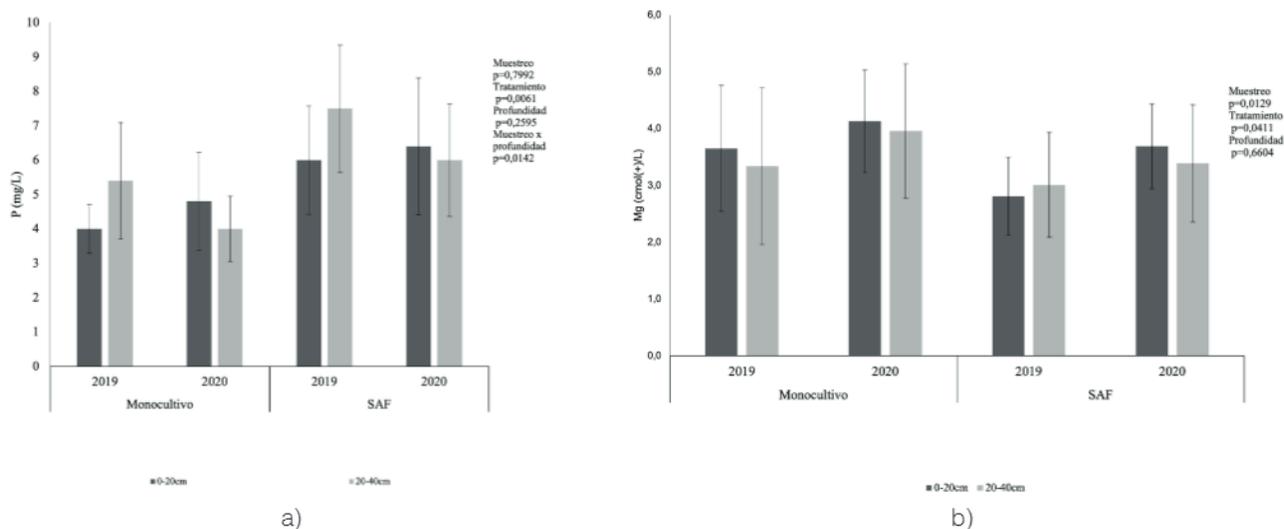


Figura 2. Valores promedio y error estándar de las variables fósforo (a) y magnesio (b), en los dos tratamientos de las parcelas experimentales del proyecto LAPA.

Nota: Medias con p-valor > 0,05 no presentan diferencias significativas entre sí, DGC (p-valor < 0,05).

En ese mismo aspecto, la figura 3 muestra los resultados de las variables físicas analizadas de los suelos porosidad y densidades aparente y real, variables que presentan comportamiento, excepto la densidad real, según el contenido de la materia orgánica y el manejo de los suelos.

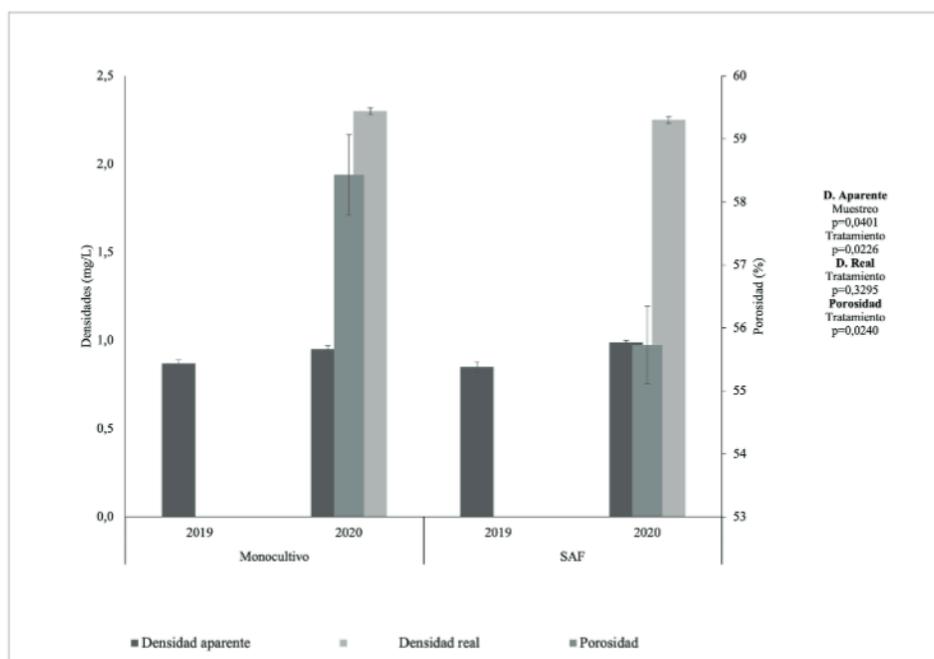


Figura 3. Valores promedio y error estándar de las densidades y porosidad de los suelos en los dos tratamientos de las parcelas experimentales del proyecto LAPA.

Nota: Medias con p-valor > 0,05 no presentan diferencias significativas entre sí, DGC (p-valor < 0,05).

Los resultados de los análisis de la materia orgánica, el nitrógeno y el carbono total, y las relaciones de estos dos últimos, variables importantes en el comportamiento de los suelos de acuerdo con su manejo, se visualizan en la figura 4.

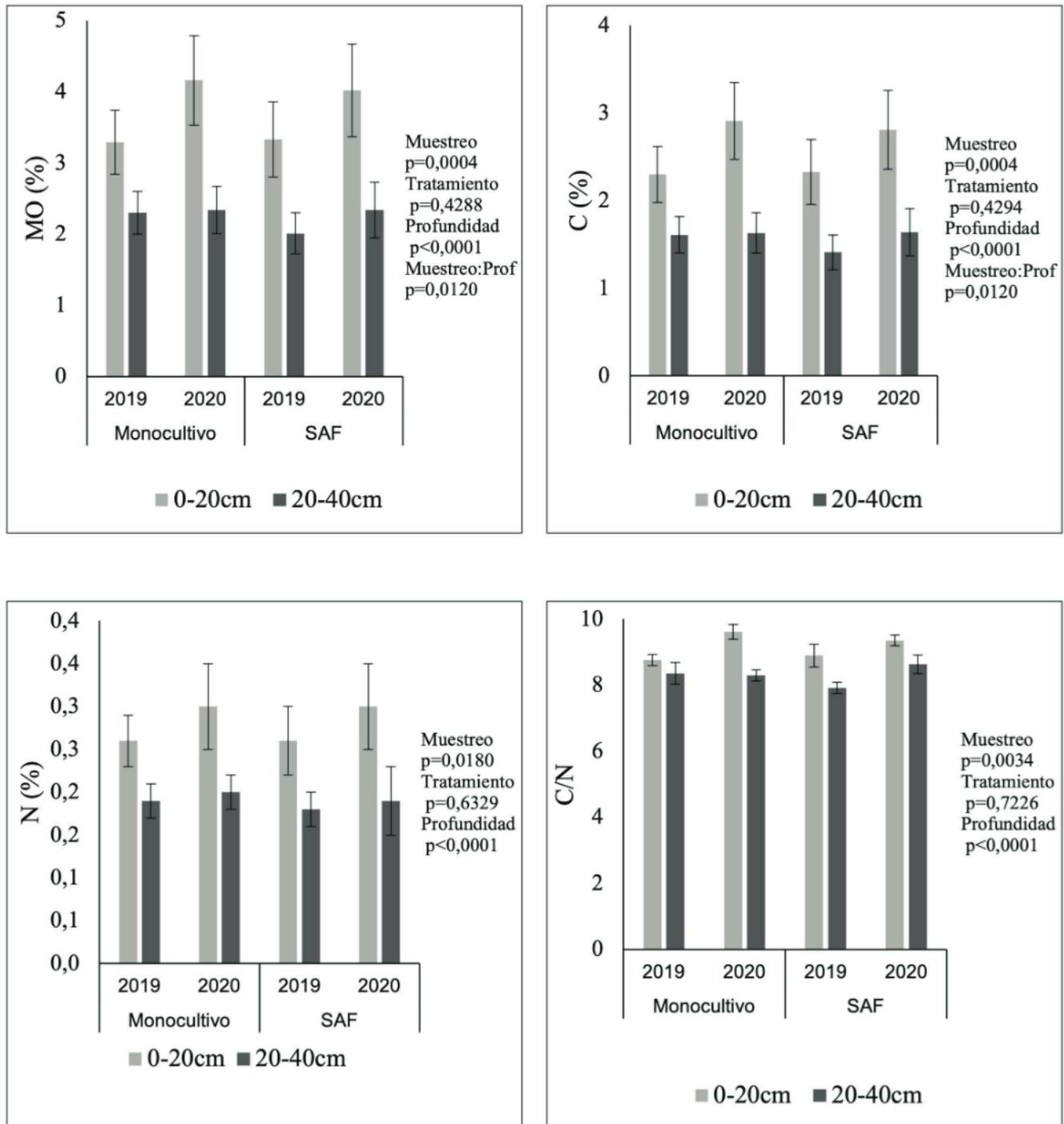


Figura 4. Valores promedio y error estándar para el porcentaje de materia orgánica (MO), carbono (C), nitrógeno (N) y relación carbono-nitrógeno (C/N) presentes en el suelo en ambos tratamientos de las parcelas experimentales del Proyecto LAPA.

Nota: Medias con p-valor > 0,05 no presentan diferencias significativas entre sí, DGC (p-valor < 0,05).

Discusión

Fertilidad de los suelos de las parcelas experimentales

Los suelos evaluados son suelos de fertilidad media a alta según [14]. Los rangos de pH encontrados en ambos tratamientos variaron entre 5,76 y 6,24. Según [15], [16] estos son aptos para *E. guineensis*, no dejando de lado otros cultivos. [17] menciona que el pH óptimo para musáceas y *T. cacao* se encuentra entre 6,0 y 7,0. Este mostró diferencias significativas (p -valor $\leq 0,05$) para profundidad y entre cada muestreo, siendo menor en los primeros 20 cm de profundidad y con tendencia a disminuir del año 2019 al año 2020 (Cuadro 1). Se puede sugerir que la variación es debido a la fecha de muestreo, en 2019 se hizo en época de pocas lluvias, mientras que en el 2020 en el período de muchas lluvias; [18] indica que en suelos de alta precipitación ocurre lixiviación de bases intercambiables y el pH tiende a disminuir.

La acidez extraíble en ambos tratamiento fue 0,33 a 0,6 cmol(+)/L, registrándose algunos valores por encima del nivel crítico [19]. En la mayoría de los cultivos valores superiores a 0,5 cmol(+)/L comienzan a ser perjudiciales, sin embargo, la suma de las bases intercambiables (Ca+Mg+K) presentaron valores por encima de 5 cmol(+)/L, con un rango entre 29,17 – 32 cmol(+)/L, producto principalmente de los relativos valores altos de Ca (Cuadro 1) lo que equilibra esta acidez [19], incidiendo en que la saturación de acidez sea baja (Cuadro 1), de modo que disminuye el efecto en los cultivos.

Dentro de las bases, el magnesio es el único elemento que mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (figura 2), en el monocultivo fue mayor que en el SAF y aumentó significativamente del año 2019 al año 2020, lo que puede estar asociado a la misma situación del pH, dado que la aplicación de abonos y enmiendas fue muy mínima a nula y al poco tiempo experimental (2 años) que aún los efectos beneficiosos del SAF [20] no se manifiesten; por el rango de valores encontrado en el suelo de este elemento, se asume que no limita el desarrollo de los cultivos presentes [16]. Los resultados del análisis de Ca concuerdan con lo mencionado por [21], que la mayoría de las plantaciones de *E. guineensis* en el sur del país están sembradas en suelos con alto contenido de este elemento; por otro lado, expresa que el K, en estos suelos donde se ubica este cultivo en el sur, es el elemento que con mayor frecuencia se encuentra desbalanceado respecto al Ca y al Mg; el K se encuentra a nivel medio aunque el valor mínimo está por debajo del crítico [20].

Las relaciones de las bases intercambiables del suelo se encuentran en un rango alto, lo que limita la adecuada absorción por los cultivos, aunque los niveles de estos elementos se encuentren adecuados [20]. De acuerdo con [23] en los rangos obtenidos para las relaciones Ca/K, Mg/K y Ca+Mg/K el elemento potasio se encuentra deficiente con respecto al calcio y al magnesio, además, de acuerdo con la relación entre Ca/Mg el elemento magnesio se encuentra desbalanceado con respecto al calcio.

El P presenta diferencias significativas (p -valor $\leq 0,05$) entre los tratamientos y en la interacción entre muestreo y profundidad, el SAF supera al monocultivo (Figura 2). En la profundidad de 0 – 20 cm el contenido de P aumentó del año 2019 al 2020 y disminuyó en la profundidad de 20 – 40 cm, este resultado podría explicarse por mayor aporte de materiales orgánicos [24], aunque es muy poco tiempo para esa aseveración. Aun así, el contenido de fósforo (P: 3,03 a 6,53 mg/L) en ambos tratamientos se encuentran por debajo del nivel crítico [20]. Lo que podría afectar las raíces de *E. guineensis*, [25] encontró correlación positiva entre la concentración de fósforo y la densidad radical. En Costa Rica, [26] también reportó bajos contenidos de fósforo, similares a los obtenidos en este estudio, en suelos de sistemas agroforestales con *T. cacao*.

El porcentaje de materia orgánica (MO), de carbono total (C) y nitrógeno total (N) presentaron diferencias significativas para muestreo y para profundidad, por ende, la relación C/N mostró el mismo comportamiento, donde en 0 a 20 cm estas variables fueron superiores que en 20 a 40 cm, igualmente en el segundo año estas variables fueron mayores (Figura 4), lo que concuerda con [6], [9], [27], [28], [29], [30], contrario a lo encontrado por [31] con plantaciones de *C. arábica* y sombrío de especies forestales. La materia orgánica varió entre 2,01% – 4,14% en ambos tratamientos (monocultivo y SAF). Contrario de esta investigación, [26] obtuvo diferencias significativas entre los tratamientos para estas variables, siendo mayor en los sistemas de producción cacao-laurel respecto plátano en monocultivo y sistemas banano-laurel. En cambio, [32] obtuvo contenidos similares tanto en SAF como en monocultivo, igual que estos resultados, pero contrario a lo encontrado por [26], este estudio muestra que, al parecer, falta más tiempo para que los tratamientos muestren sus verdaderos resultados, el tiempo de este estudio fue de dos años; sin embargo, se muestra una tendencia en el contenido de MO, C y N de un año al otro de estudio (Figura 4).

La densidad aparente fue significativamente más alta (p -valor $\leq 0,05$) en el SAF, así mismo, la porosidad fue menor en este tratamiento, para [7], [33] la densidad aparente y la materia orgánica son indicadores de la porosidad, además que esta variable, la aireación y movimiento del agua están asociadas al uso del suelo. Los valores de densidad aparente fueron bajos (0,83 a 0,99 mg/L), a pesar de que los suelos donde están localizadas las parcelas son, principalmente, Inceptisoles (Figura 1), quizás debido a que en el país existe la posibilidad de haber suelos con características ándicas sin ser Andisoles [34]. En Inceptisoles, [26] obtuvo una densidad aparente menor en los sistemas con cacao-laurel y barbecho. Los autores [35] no encontraron diferencias para la variable porosidad total en los suelos de bosque nativo y monocultivos de *T. cacao* y *E. guineensis*, concluyeron que esta variable no es apropiada para determinar los efectos de estos sistemas sobre el suelo.

Conclusión

La diversificación del cultivo de *Elaeis guineensis* en un SAF con *Musa* sp., *Cordia megalantha* y *Theobroma cacao*, después de dos años, no produjo efecto significativo sobre la fertilidad fisicoquímica del suelo en general. Sin embargo, hubo algunas excepciones significativas: el contenido de fósforo fue mayor en el SAF y los porcentajes obtenidos de materia orgánica, N y C total fueron mayores en año 2020 respecto a los del 2019 y en los primeros 20 cm frente a la profundidad de 20 a 40 cm.

Recomendaciones

Continuar con la evaluación de las condiciones del suelo por los siguientes años para obtener una base de datos más sólida sobre los resultados.

Evaluar la fertilidad biológica del suelo, ya que los organismos vivos pueden proveer información de su entorno y evidenciar cambios a corto o mediano plazo en la salud del suelo.

Referencias

- [1] Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. Boletín estadístico agropecuario. 29 ed. S. Mora y Y. Quirós (eds.). MAG, San José, Costa Rica, 2019. [en línea] Disponible: <http://www.mag.go.cr/biblioteca-virtual/BEA-0029.PDF>
- [2] G. Rodríguez. "Análisis del desempeño de la cadena productiva de palma aceitera, 2004-2008". SEPSA, Costa Rica, 2010. (01 octubre, 2019) [en línea] Disponible en http://www.infoagro.go.cr/Agronegocios/Documents/Cadena_Palma_publicable%2031-03-10.pdf

- [3] M. Román y J. E. Angulo. Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible. INOGO, Costa Rica, 2013. (01 octubre, 2019) [en línea] Disponible: http://inogo.stanford.edu/sites/default/files/Informe%20econ%C3%B3mico%20INOGO%20Feb%202013_2.pdf
- [4] I. E. Henson. "Impactos ambientales de las plantaciones de palma de aceite en Malasia" (original en inglés). *Revista Palmas* 16, Núm. 4, pp. 49-66. 1995. (20 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/490/490>
- [5] F. Farfán. "Agroforestería y sistemas agroforestales con café". Manizales, Caldas, Colombia, FNC – Cenicafé, 2014. (08 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: https://www.cenicafe.org/es/publications/Agroforester%C3%ADa_y_sistemas_agroforestales_con_caf%C3%A9.pdf
- [6] F. Montagnini, E. J. Somarriba, E. Murgueitio, H. Fassola, B. Eibl. "Sistemas agroforestales". Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 2015. Informe técnico. Núm. 402. (22 setiembre, 2019) [en línea] Disponible: https://www.researchgate.net/publication/324416322_Sistemas_Agroforestales_Funciones_productivas_socioeconomicas_y_ambientales
- [7] R.M. Murray, M.G. Orozco, A. Hernández, C. Lemus, O. Nájera, "El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo". *Avances en Investigación Agropecuaria*. AIA 18(1), pp. 23-31, 2014.
- [8] M.I. Pavón Rosales, M. E. Domini Cuadra, G.M. Suárez Venero, J. Flores, G. R. Almenares Garlobo, "Sistema Agroforestal para el uso racional del suelo en el municipio San José de las Lajas, provincia Mayabeque", *Cultivos tropicales* vol.35, Núm.2, pp.14-20, 2014.
- [9] R. Quesada. "Los bosques de Costa Rica". Cartago, Costa Rica, ITCR, 2007. (4 octubre, 2019) [en línea]. Disponible: <http://www.cientec.or.cr/exploraciones/ponencias2007/RupertoQuesada.pdf>
- [10] Instituto Meteorológico Nacional. Promedios mensuales de datos climáticos de las estaciones meteorológicas ubicadas en los cantones de Osa y Golfito, Puntarenas, IMN, 2019. San José, Costa Rica.
- [11] Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA). "Mapa digital de suelos de Costa Rica", 2020. (25 enero, 2021) [en línea]. Disponible: http://www.cia.ucr.ac.cr/?page_id=139
- [12] J. Di Rienzo, F. Casanoves, M. Balzarini, L. González, M. Tablada, C. Robledo, InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- [13] L. Mack. Evaluación de los sistemas de producción de palma africana (*Elaeis guineensis*) establecidos por el proyecto LAPA en la región de Osa-Golfito, Puntarenas, Costa Rica (en línea). Tesis Lic. Cartago, Costa Rica, TEC. 79 p. Consultado el 01 ago. 2019. Disponible en https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11173/evaluacion_sistema_agroforestal_monocultivo_palma_africana.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [14] J. Núñez, Manejo y conservación de suelos. 1era ed. San José, Costa Rica, EUNED. 288 p. 2010.
- [15] F. Munévar, "Fertilización de la palma de aceite para obtener altos rendimientos". *Palmas* 22, Núm.4, pp. 9-17. 2001.
- [16] N. Durán. Manejo de los suelos y fertilización en palma aceitera. In G. Meléndez, E. Molina (eds.). Memoria. Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de los Cultivos en Costa Rica, 2001. (1 setiembre, 2019) [en línea]. Disponible: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Curso%20Fertilidad%20de%20Suelos.pdf>
- [17] M. A. Arvelo, D. González, S. Maroto, T. Delgado y P. Montoya, Manual técnico del cultivo del cacao: Prácticas Latinoamericanas. IICA. San José, C.R. 2017.
- [18] J. Núñez, Fundamentos de Edafología. 2da ed. San José, Costa Rica, EUNED, 188 p. 2000.
- [19] J.C. Méndez y F. Bertsch, Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 1era ed. San José, Costa Rica, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 103 p. 2012.
- [20] D. Moreira y C. Castro. Sistemas agroforestales. Adaptación y mitigación en la producción de banano y cacao. Proyecto Euroclima-IIICA/Un día en la finca. Costa Rica. 2017, pp 1-12. (11 octubre, 2021) [en línea]. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=iPTFAqd2xro&feature=youtu.be&list=PLQM0b7UDnH_RHBQ0YIXWDPNPru6VCzOGU
- [21] N. Durán, R. Salas, C. Chinchilla, F. Peralta, "Manejo de la nutrición y fertilización en palma aceitera en Costa Rica", presentado a XI Congreso Nacional Agronómico/III Congreso Nacional de Suelos. San José, Costa Rica, 1999.
- [22] J.C. Méndez, "Estudio de la fertilidad de los suelos de Costa Rica con base en los registros de los análisis del Laboratorio de Suelos y Foliar del CIA/UCR durante el período 2006-2010". Tesis Lic. UCR, San José, Costa Rica, 2012.

- [23] V. H. Ramírez-Builes, "Los sistemas agroforestales en el trópico y la fertilidad del suelo". *Investigaciones de Unisarc*, 5 Núm. 2, pp. 11-21, 2007.
- [24] J. A. Cristancho, F. Munévar, A. Acosta, L. Santacruz, M. Torres, "Relación de las características edáficas y el desarrollo del sistema de raíces de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq)". *Palmas* 28, Núm.1, pp. 21-29, 2007.
- [25] R. H. Cerda. "Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca", Tesis M. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE, 2008. (23 octubre, 2019). [en línea]. Disponible: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A1822E/A1822E.PDF>
- [26] M. Ibrahim, D. Pezo. "Interacciones en sistemas silvopastoriles". In *Producción de madera en sistemas agroforestales de Centroamérica*. Manual Técnico no 109. Editores: G. Detlefsen y E. Somarriba. CATIE, Turrialba, Costa Rica, pp. 69-90, 2012. (01 setiembre, 2020) [en línea] Disponible:http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3512/Produccion_de_madera_en_sistemas_agroforestales.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [27] Oficina Nacional Forestal, Costa Rica. Guía Técnica para la implementación de Sistemas Agroforestales (SAF) con árboles forestales maderables. Heredia, Costa Rica. 30 p. 2013.
- [28] F. Casanova-Lugo, L. Ramírez-Avilés, D. Parsons, A. Caamal-Maldonado, A. Piñeiro-Vázquez, V. Díaz-Echeverría, "Environmental services from tropical agroforestry systems". *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22, Núm.3, pp. 269-284, 2016.
- [29] M. Corella, "Agroforestería y biodiversidad: la importancia de los sistemas agroforestales en la conservación de especies". *Biocenosis* 30, Núm.1-2, pp.59-62, 2016.
- [30] F. Farfán, "Cambios en la fertilidad del suelo con plantaciones de café y sombrero de especies forestales". *Cenicafé* 61, Núm.1, pp. 7 – 27. 2010.
- [31] A. C. Rodríguez, D. Cristóbal, E. Álvarez, M. Uribe. "Indicadores de calidad de un suelo para la producción de maíz bajo sistemas agroforestal y monocultivo". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Num. 16, pp.3263-3275, 2016. (08 enero, 2021) [en línea] Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3263.pdf>
- [32] J. L. González-Barrios, G. González-Cervantes, E. Chávez-Ramírez, "Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenta alta del Río Nazas". *Tecnología y ciencias del agua*. Enero-marzo Vol.3, Núm.1-2 a 2, pp. 21-32, 2012.
- [33] A. Alvarado, W. Forsythe, "Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica". *Agronomía Costarricense* 29, Núm.1, pp.85-94, 2005.
- [34] I. D. Novillo, M.D. Carrillo, J.E. Cargua, V. Nabel, K. E. Albán, F. L. Morales, "Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos", Ecuador. *Temas Agrarios* 23(2), pp.177-187, 2018.