

**Análisis del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del departamento del
Caquetá**

Diana Yadirsa Palomares Cruz

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias agrícolas, pecuarias y del medio ambiente - ECAPMA

Trabajo: Opción de grado para optar al título de Agrónomo

Mag. Ismael Dussan Huaca

06 de octubre de 2021

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Florencia, octubre de 2021

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a Dios todo poderoso primeramente quien me ha dado la fortaleza para desarrollar de manera satisfactoria una etapa más en mi vida a nivel académico. A mi familia quienes están cada día a mi lado siempre en las buenas y en las malas. De igual forma a cada uno de los docentes que hicieron parte de mi proceso de aprendizaje.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la vida y la oportunidad de adquirir nuevas experiencias a nivel profesional, al igual que todos mis logros en cada proceso de mi vida en los cuales nunca me ha abandonado, y me ha dado la fortaleza para no decaer a pesar de los momentos difíciles y surgir cuando solo la fe hace realidad las cosas.

Agradecimientos a mis padres, Orfilia palomares y Elbert morales por darme la vida y esforzarse para que pudiera salir adelante; a mi esposo Albeiro Llanos y a mi hijo Thiago Daniel Llanos, por su apoyo y ser el motor de cada cosa que hago.

A mis compañeros de trabajo Alexis Pacheco y María Rita Lara, como también a mi mejor amiga Rut zuleidy Muñoz porque fueron personas que hicieron parte de mi proceso formativo y me animaron en los momentos difíciles.

Agradezco al Ing. Ismael Dussan Huaca por su asesoramiento y paciencia; quien me brindó su apoyo incondicional, asesoría, acompañamiento y empuje, para llevar a cabo el presente trabajo.

Tabla de Contenido

información general	12
Reseña Bibliográfica s.....	12
Geoestructura del suelo	12
Tejido productivo	20
Cultivos anuales	20
Cultivos semestrales	23
El fósforo como nutriente esencial para las plantas	24
Fotosíntesis	25
Formas y cantidades de fósforo en el suelo	26
factores que afectan la disponibilidad de fósforo para las plantas	28
Deficiencia de fósforo en las plantas	29
Interacciones del fósforo con otros elementos del suelo	31
Interacciones fósforo-nitrógeno	31
Interacciones fósforo-calcio	32
Interacciones fósforo-magnesio	32
Interacciones fósforo-aluminio	32
Interacciones fósforo-hierro	34
Interacciones fósforo-zinc	34
Problema	35
Descripción del Problema	35
Planteamiento del Problema	36
Justificación	38
Objetivos	40
Objetivo general	40
Objetivos específicos	40
Metodología	40
Materiales y Métodos	40
Resultados de la Investigación	42
Análisis de Resultados	42
Interpretación de los resultados de análisis de suelos en el Caquetá	44
Acidez extraíble y pH	44
Cationes Cambiables o bases (Ca, Mg, K)	45
Relaciones Catiónicas	49
Capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE):	49
Fósforo (P):	49
Elementos menores (Hierro y Cobre)	50
Materia orgánica (MO) y Nitrógeno (N₂)	50
El fósforo y su importancia en el crecimiento vegetal	51
Alternativas agronómicas para mejorar la disponibilidad y absorción del fosforo en suelos amazónicos	53
Sistemas agrosilvopastoriles	53

Ventajas de un sistema agroforestal.....	54
Ventajas ambientales:.....	54
Ventajas socioeconómicas:	55
Limitaciones de los sistemas agroforestales.....	56
Abono verde y compost para cultivos	57
Abonos orgánicos	58
Enmiendas orgánicas	58
Los fosfocompostes.....	58
La inoculación de plántulas con endomicorrizas	59
Compactación de la roca fosfórica con fertilizantes fosfatados solubles en agua	60
Granulación de rocas fosfóricas con azufre.....	61
¿qué sistema de producción recomendaría para el establecimiento en estos suelos considerando su requerimiento nutricional y el manejo agronómico?	62
Material vegetal.....	65
Conclusiones y Recomendaciones.....	66

Tabla de Figuras

Figura 1: Distribución % de las clases agrologicas de suelos en el departamento del Caquetá....	13
Figura 2: Vocación productiva de los suelos del departamento del Caquetá	16
Figura 3: Distribución porcentual de los usos actuales de tierra del departamento del Caquetá ..	17
Figura 4: Uso actual del suelo del departamento del Caquetá.....	18
Figura 5: Conflictos de uso de suelo - Fuente: UPRA (2017).....	20
Figura 6: La fotosíntesis – Fuente, (Sordo Medina, 2021).....	26

Lista de Tablas

Tabla 1: Deficiencia inducida por el exceso de otro	30
Tabla 2: Consolidado de análisis de suelos realizados en el departamento del Caquetá .	46
Tabla 3: Interpretación del contenido de fosforo en los suelos (IGAC, 2018)	50

Introducción

El fósforo es uno de los diecinueve elementos considerados como esenciales para la vida de las plantas. Constituye un componente primario de los sistemas responsables de la capacitación, almacenamiento y transferencia de energía, y es componente básico en las estructuras de macromoléculas de interés crucial, tales como ácidos nucleicos y fosfolípidos, por lo que se puede decir que su papel está generalizado en todos los procesos fisiológicos.

En el sistema suelo-planta, el 90 % del fósforo está en el suelo y menos del 10 % se encuentra repartido fuera del suelo. Sin embargo, sólo una pequeña parte de ese 90 % es utilizable por los vegetales.

A diferencia de todos estos elementos, el fósforo disponible en el suelo es insuficiente para los vegetales, y esta deficiencia sólo se puede abordar con la aplicación de fertilizantes fosforados, ya que el fósforo no es reciclado por las lluvias ni es liberado rápidamente de los residuos orgánicos. Si a esto unimos que la fuente de estos fertilizantes es de origen animal, y que una vez adicionados al suelo pasan muy rápidamente a compuestos menos solubles, los cuales con el tiempo disminuyen cada vez más su disponibilidad para las plantas, es fácil comprender que este nutriente reviste una problemática especial en los suelos. (Fernández, 2007)

Los suelos de la región amazónica presentan características de un alto grado de degradación química, física y biológica. En su mayoría se encuentran clasificados dentro de los órdenes oxisol y ultisol, en los cuales predominan los suelos de texturas finas, bien drenados, de colores pardo, amarillentos y rojizos; desde el punto de vista de las propiedades químicas, son ácidos (el 95% presenta valores de pH entre 4,5 y 5,8). con una capacidad de intercambio

catiónica de baja, a media y saturación de bases baja, lo cual indica la poca fertilidad y la fragilidad de los suelos de la amazonia (Lips,1996).

En la región predominan oxisoles y ultisoles que se caracterizan por presentar baja fertilidad, debido a su estado avanzado de meteorización y lixiviación, como consecuencia de los altos regímenes de precipitación y la alta permeabilidad. Los oxisoles presentan una mineralogía denominada por arcillas de escasa actividad, baja capacidad de intercambio catiónico y alta acidez, condiciones que están asociadas con toxicidad por Al y, en algunos casos, por Mn.

El P se considera como el elemento más limitante en suelos ácidos; el contenido de P total en suelos con estas características varía entre 200 y 600 mg.kg-1 de suelo, mientras que el P disponible para las plantas varía entre 1 y 3 mg.kg-1, determinado por Bray II (Amezquita, 2013).

Según en el noroccidente de la Amazonia colombiana, la dinámica de cambio de la vegetación natural por pasturas se encuentra en constante aumento. Actualmente, el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono para Colombia, (2017) el departamento de Caquetá concentra la mayor cantidad de alertas tempranas por deforestación del país, que representan el 34,6 % del total nacional.

La mayor parte del bosque natural se ha intervenido para el establecimiento de ganadería extensiva de manera que, a la fecha existen en el departamento 14.251 fincas dedicadas a esta actividad (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2017).

Los suelos más afectados por prácticas de ganadería extensiva son los que se localizan en el paisaje de lomerío amazónico. Estos suelos son pobremente drenados en las depresiones y bien drenados en el resto del territorio; poseen texturas finas con un cambio marcado en el porcentaje de arcilla entre los horizontes A y B; se caracterizan por baja fertilidad natural, poca

disponibilidad de oxígeno y bajos contenidos de materia orgánica; son desde fuerte a extremadamente ácidos, y presentan alta saturación de aluminio, baja saturación de bases y pobre contenido de fósforo y potasio (Rosas et al., 2016).

La escasez de nutrientes en el suelo limita la producción vegetal y el desarrollo de actividades productivas dependientes de la fertilidad edáfica (Morgan & Connolly, 2013). Los macronutrientes son elementos que afectan la totalidad de los procesos de los seres vivos, por lo que en la nutrición del ganado bovino resultan indispensables (Escudero & Mediavilla, 2003; Silveira & Moura, 2020). Los macronutrientes cumplen numerosas funciones y se clasifican en dos grupos según la cantidad en la que se encuentran en los alimentos: los primarios, que son nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y los secundarios, que incluyen calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) (Ringuelet & Gil, 2005).

Diversos estudios de zonas de pastoreo en la región amazónica reportan pérdida de nutrientes primarios y secundarios. Luizão (2007), alarma que con la edad de la pastura se pierden nutrientes en altas proporciones; Peña *et al.* (2013), reportan disminución de los niveles de Ca y Mg en paisajes degradados.

Asimismo, en su estudio de los macronutrientes en suelo de vega, lomerío y montaña, Becerra-Ordoñez et al. (2014) señalan que los valores de los parámetros Ca, Mg, K y P, independientemente de la geoforma considerada, fueron similares a los registrados por Peña-Venegas y Cardona (2010) en suelos expuestos a pastoreo.

La baja fertilidad natural de los suelos amazónicos, incluyendo el macronutriente fosforo (P), se constituyen en limitantes para la producción agropecuaria de la región. Por todo lo anteriormente expuesto, este trabajo pretende analiza el comportamiento del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del Departamento del Caquetá.

información general

Reseña Bibliográfica

Geoestructura del suelo

El relieve que forma el territorio Caqueteño, responde a las geoestructuras de la megacuenca de sedimentos del Amazonas y la cordillera de los Andes. La Geoestructura de cordillera corresponde a la cordillera Oriental. Se caracteriza como una cordillera de plegamiento de gran complejidad estructural y denudacional; abarca el 11,71% del territorio, con un área de 10.568,17 km². Además, la megacuenca de sedimentos del Amazonas cubre un área de 79.678,12 km² correspondiente al 88,29% del Departamento, está constituida por serranías y cerros de origen tectónico, que están por encima del paisaje de lomerío y que en algunos casos forman barreras que bloquean el curso de algunos ríos. Por otro lado, las principales fuentes hídricas que riegan el departamento son: el río Apaporis, Caguán, Orteguzaza, Yarí, Fragua y el río Caquetá con todos sus afluentes (IGAC, 2014).

Paisajes

En el Departamento se puede diferenciar claramente cuatro unidades de paisajes. El IGAC (2014) en su estudio de suelos y zonificación de tierras del Departamento del Caquetá realizado en el 2014, clasificó las unidades de mayor a menor, con referencia a la extensión que ocupan de la siguiente manera: Lomerío con un 67,79%, Montaña con un 11,71%, Macizo con un 10,06%, Valle con un 9,70% y Piedemonte con un 0,71%.

Vocación del suelo

Para la clasificación de los suelos según su vocación se realiza bajo el marco establecido por el IGAC (2010), donde se agrupa sistemáticamente las características fundamentales del suelo en las aptitudes naturales que presenta para producir sosteniblemente. De manera general, los suelos del departamento se agruparon en las clases 4, 5, 6, 7 y 8 (Figura 1); cada una con la subclase correspondiente.

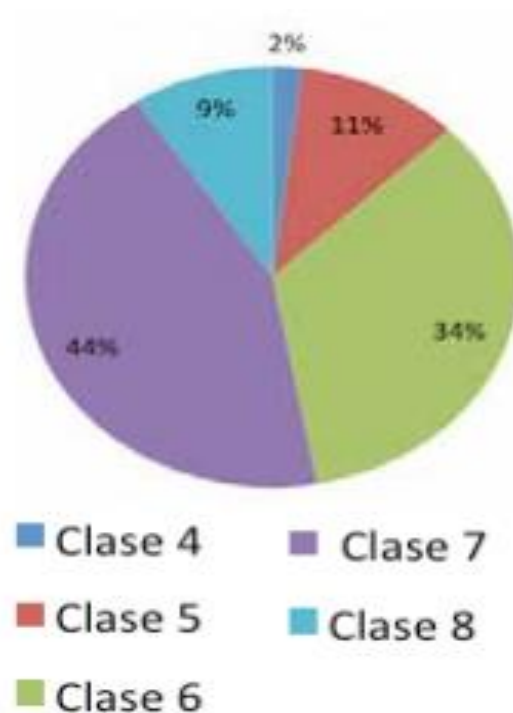


Figura 1: Distribución % de las clases agrológicas de suelos en el Departamento del Caquetá.

Fuente: IGAC (2014).

Tierras de la clase agrológica IV

Se ubica en la zona de cordillera; se caracterizan por el bajo grado de vulnerabilidad ante la acción de los factores atmosféricos y la actividad antrópica, presenta una variación de climas

de frío, templado y cálido y de condiciones muy húmedas. Los paisajes que aparecen con este tipo de tierras son Montaña, Piedemonte, Lomerío y Valle. Por la variación en sus características se diferencian 9 subclases; 4c-U, 4pc-V, 4sc-K, 4sc-P, 4sc-V, 4sc-U, 4psc-P, 4psc-U, 4psc-V.

Las actividades productivas que se pueden desarrollar en estas áreas son cultivos transitorios, semiperennes y ganadería semi intensiva. En su totalidad, cubre una extensión de 177.789 ha, correspondiente al 1,9% del territorio del Departamento. (IGAC, s.f).

Tierras de clase agrologica V

En el territorio esta clase se caracteriza por ser suelos con escasa profundidad efectiva, deficiente drenaje, áreas casi planas, generalmente cóncavas, no susceptibles a la erosión y susceptibles a inundaciones periódicas; ocupan paisajes de Montaña, Piedemonte, Lomerío y Valle. Los suelos con estas características, se clasifican en tres subclases, 5h-V, 5h-U, 5h-K; representan un 10,7% del área total del departamento, correspondiente a 964.805 ha. Son aptas para la producción agrícola; sus limitaciones se pueden disminuir o eliminar, con algunas prácticas que generan altos costos económicos. (IGAC, 2014).

Tierras de la clase agrologica VI

Estas clases de tierras se ubica en los paisajes de Montaña, Lomerío y Piedemonte; cuentan con relieve fuertemente quebrado con pendientes 12-25-50%, con presencia de sectores intercolinados depresionales, lo que favorece que la susceptibilidad al deterioro varíe de moderado a alta. En términos generales, los suelos de esta clase que ocupan 3.112.336 ha, se pueden trabajar bajo sistemas de cultivos permanentes, ganadería con pastos introducidos de brachiaria, en las zonas de menos pendiente y sistemas agroforestales y forestales. Por sus

condiciones se distingues las subclases de: 6p-V, 6p-U, 6p-P, 6pe-V, 6ps-V, 6s-V, 6es-V. (IGAC, 2014).

Tierras de clase 7.

En el departamento del Caquetá, las tierras de esta clase se distinguen por una capacidad de uso de bosques protectores y de conservación. Las tierras presentan limitaciones muy severas erosión, profundidad efectiva superficial, pendiente moderadamente escarpada, alta saturación de aluminio, fuerte acidez, fertilidad baja y humedad excesiva. Es de resaltar que algunas condiciones de relieve hacen posible el desarrollo de sistemas forestales que se pueden aprovechar, por medio de talas selectivas. Dentro de esta clase se distinguen las subclases presentes en el territorio de: 7pe-V, 7pe-U, 7p-P, 7p-K, 7e-V, 7e-U, 7s-V y 7ps-V; que ocupan una extensión de 3.940.760 ha, equivalentes al 43, 63% del área total del departamento. (IGAC, 2014).

Tierras de clase 8.

Los suelos de esta clase, se distinguen por tener pendientes superiores al 75%, alta saturación de aluminio, fertilidad baja, profundidad efectiva superficial, alta susceptibilidad al deterioro y alta acidez. El mejor uso de estas tierras es de conservación de los ecosistemas estratégicos y recuperación de la naturaleza. Se identificaron aproximadamente 873.323 ha, bajo estas condiciones de capacidad de uso.

La Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA] basado en datos del IGAC, reportó para el año 2017, que la vocación del suelo se agrupa en los siguientes sistemas productivos: Agrícola un 1% del total del territorio, ganadería un 0,1%, forestal de producción un 0.003% y agroforestal 3,6%. Es de aclarar, que dentro de esta clasificación no se incluyen los

datos de las áreas de protección legalmente constituidas, los resguardos indígenas y las áreas de los parques nacionales natural, (Figura 2).

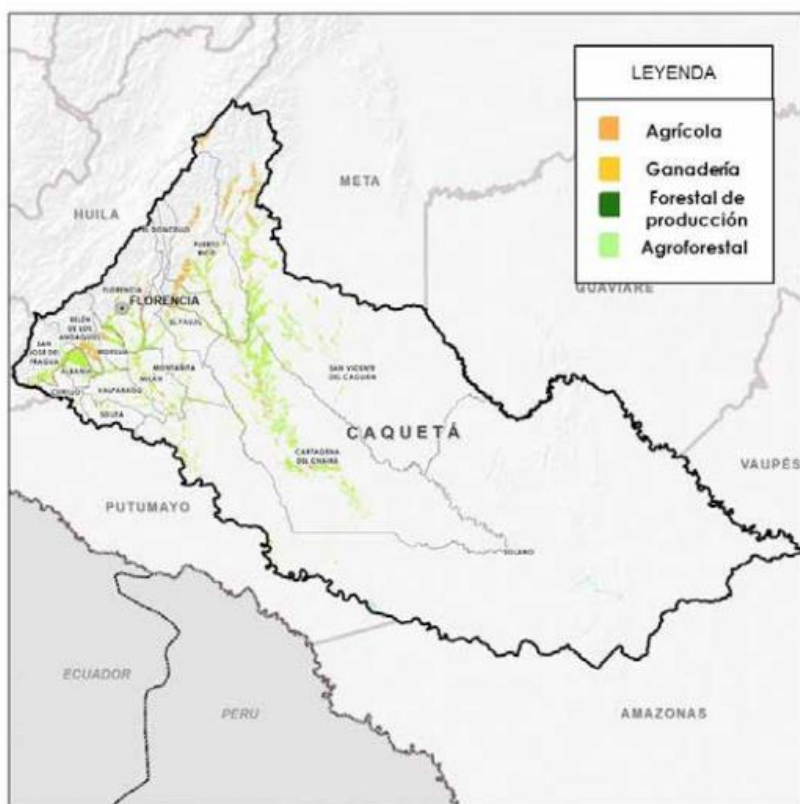


Figura 2: Vocación productiva de los suelos del departamento del Caquetá

Fuente: UPRA (2017)

Uso actual del suelo

La última zonificación de tierras realizada por el IGAC (2014), reporta que los principales usos de la tierra se distribuyen de la siguiente manera: áreas de conservación y protección ambiental (zonas de paramo, cuerpos de agua, humedales, y coberturas boscosas) un 70%, de las áreas de protección legal (Parques Nacionales Naturales) un 14%, en áreas para la

producción, un 9% de resguardos indígenas, un 7% en áreas para la explotación de los recursos no renovables (títulos mineros) un 0.02%.

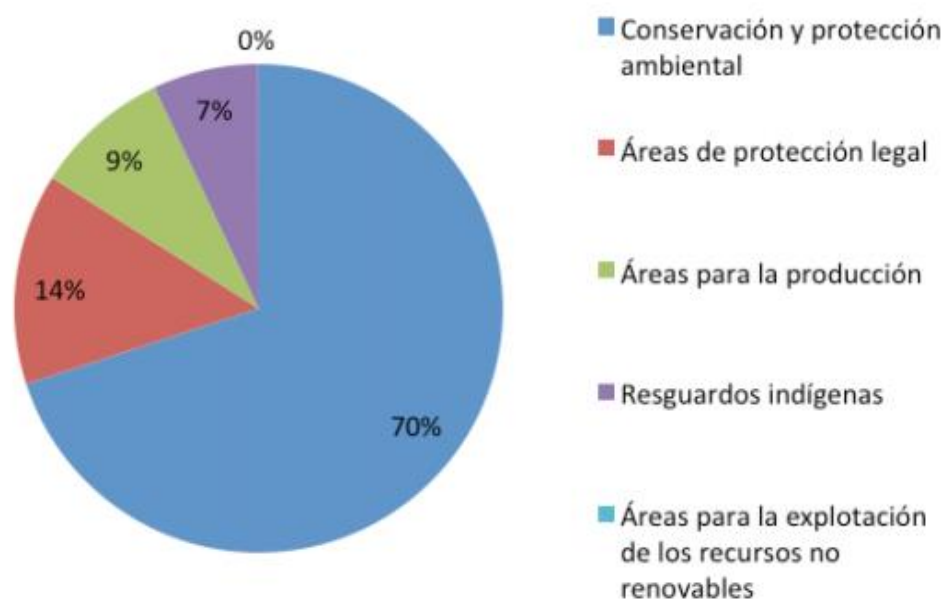


Figura 3: Distribución porcentual de los usos actuales de tierra del departamento del Caquetá

Fuente: IGAC (2014)

En los últimos años se ha identificado un claro crecimiento en las áreas de producción, pasando de un 9% en el 2014 a 17% en el 2017, lo que genera que se deteriore las condiciones naturales del suelo del departamento y, por ende, requieran acciones que ayuden a minimizar los impactos negativos que dicho crecimiento está generando; a razón, de que la vocación de las tierras del departamento es para uso de conservación, forestal y agroforestal (UPRA, 2017). En la Figura 4, se muestra claramente las zonas del departamento donde se están realizando las actividades productivas.

con vocación ganadera que es de 11.384ha. La agricultura, si bien, no presenta una discrepancia igual a la ganadería, si se están realizando en áreas que no son aptas para esas actividades.

Lo mencionado anteriormente, se sintetiza en la Figura 5., los conflictos de uso de suelo en el Departamento del Caquetá. En este, se ilustra que el 86% corresponde a 7.730.208ha del territorio están bajo sistemas adecuados de uso (bosques naturales), el 13% que corresponde a 1.119.817ha bajo sistemas de sobreutilización (ganadería extensiva) y el 0,4% que corresponde a 33.588ha bajo sistemas de subutilización que equivale a la agricultura tradicional. (UPRA, 2017).

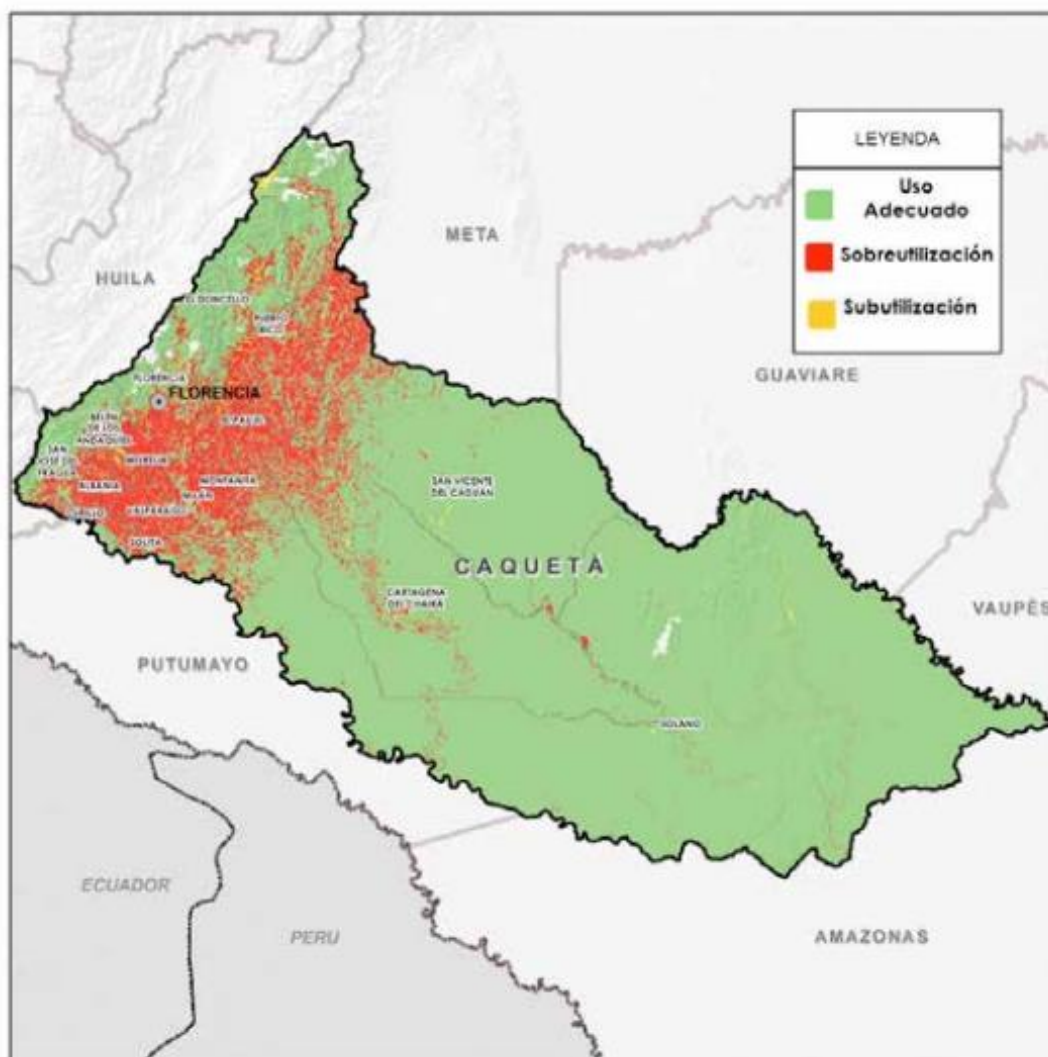


Figura 5: Conflictos de uso de suelo - Fuente: UPRA (2017).

Tejido productivo

El sistema productivo del Departamento se sustenta en la producción ganadera como una de las principales actividades productivas del sector, seguido de la producción de cultivos anuales y semestrales, como el caucho, cacao, caña panelera, café, plátano, yuca, maíz y arroz. Estos productos son cultivados y producidos en la zona predominante del departamento, que es la rural. De acuerdo con el Censo Nacional Agropecuario y las Evaluaciones Agropecuarias Municipales, los principales productos cultivados en el departamento se dividen en las siguientes categorías:

Cultivos anuales

Las plantaciones de caucho natural (*hevea brasiliense*) se establecieron en el territorio Caqueteño desde los años 50; a partir de esa época se ha posicionado como uno de los productos agrícolas más importantes, gracias a su adaptabilidad a las condiciones físicas, biológicas y químicas del suelo. Hoy por hoy, los 17 municipios tienen plantaciones con caucho natural. Según los reportes, el área sembrada bajo el sistema productivo de caucho ha venido aumentando pasando de 5.403 hectáreas en el 2011 a 6.351 hectáreas en el 2016, con una producción de 1.868 toneladas para 2011 y 3.177 toneladas para 2016, el rendimiento para el último año fue de 1,20 tonelada/hectárea. Cabe aclarar, que la producción del látex se distribuye por lámina y ripio es decir fondo de tasa (ASOHECA, 2018, p. 55).

En referencia a la producción, el primer lugar lo ocupa el plátano con producciones de 78.412 toneladas en 2011, 76.439 toneladas en 2012, 68.070 toneladas en 2013, 61.913 toneladas en 2014, 68.593 toneladas en 2015 y 71.420 toneladas en 2016 (EVA, 2017).

Según, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Sostenible (2016), el segundo cultivo del departamento con mayor producción es la yuca, sin embargo, a partir del 2012 a 2015 se observa una disminución pasando de 48.913 toneladas a 43.747 toneladas; en el 2016 se reactivó la producción con 49.102 toneladas. Paralelamente, los municipios de Cartagena del Chaira y San Vicente del Caguán son los que mayor participación tuvieron durante el periodo de estudio en el área sembrada, área cosechada y producción. El resto de municipios tuvieron un comportamiento similar en los tres ítems.

Es de resaltar, que los cultivos de yuca y plátano tienen los mayores porcentajes del área de siembra, cosecha y producción en comparación con el resto de cultivos anuales, porque muchos pobladores los tienen en áreas pequeñas aledañas a sus hogares y son categorizados como de pancoger, sin embargo, solo una pequeña parte llega a suplir las necesidades del mercado, por lo que conlleva a que este vacío sea cubierto por proveedores provenientes de otras regiones del país.

El tercer cultivo es la caña panelera con una producción de 21.481 toneladas y un rendimiento de 5,38 toneladas/ hectáreas, a corte 2016. Esta producción total fue aportada por 10 de los 16 municipios del departamento, destacándose Cartagena del Chaira, San Vicente del Caguán, San José del Fragua, Belén de los Andaquies y Albania. La caña panelera es un producto que se está posicionando en el departamento, debido a se han identificado especies que

dan excelentes resultados en los suelos ácidos característicos de la zona, con ayuda de enmiendas y fertilización química (EVA, 2017).

El café es el cuarto cultivo con mayor producción, presenta una característica ascendente en relación con las tres variables de estudio. Dicho comportamiento se debe a que se ha podido identificar que el café que se produce en el departamento, que es categorizado como café amazónico, tiene propiedades de olor y sabor únicas que son dadas por las propiedades del suelo del departamento. Para 2016 el área sembrada bajo este sistema productivo fue de 4.100 hectáreas, con un área cosechada de 3.417 hectáreas, una producción de 3.764 toneladas y un rendimiento de 1,10 toneladas/hectárea.

El quinto lugar en los cultivos anuales lo ocupa el cultivo de cacao mostrando el mayor avance en el número de toneladas por año de producción; iniciando con 399 toneladas en el 2011 y finalizando el 2016 con 1.139 toneladas, conllevando a una reactivación de este sistema productivo en el departamento. Esta dinámica responde a las buenas prácticas agrícolas que los cacaoteros juntos con la academia están ejecutando, para mejorar la calidad de los frutos y el rendimiento por hectárea. Adicionalmente, el área de siembra está creciendo y no muestra una relación adecuada con al área cosechada, puesto que, las plantaciones están en su proceso de renovación y estabilización de la producción.

El sistema productivo cacaotero se encuentra en prácticamente todos los municipios del departamento, a excepción de Albania que su contribución es menos a un 3%. El cacao al igual que el caucho, se han identificado como cultivos propios del departamento, a causa de que algunos clones de cacao se han adaptado a las condiciones agroclimáticas y propiedades de los suelos del Caquetá y están dando muy buenos resultados (ACAMAFRUT, 2018).

Los frutos amazónicos comprendidos por los cultivos de cocona, copoazu y arazá, se ubican en el último puesto en referencia a la decaída que han están presentando en los últimos seis años. Este comportamiento es una alerta para el sector agrícola, debido a que estas especies son endémicas de la región y no requieren procesos dispendiosos de manejo del cultivo. Se debe trabajar en la transformación y comercialización, donde se generaren alternativas productivas y de empleo para muchos productores.

Cultivos semestrales

El maíz y el arroz son los cultivos semestrales con mayor área sembrada en el departamento. En el caso del maíz se han tenido unas fluctuaciones importantes; de modo generar, el primer semestre (a) del año, el área sembrada, área cosechada y la producción es mayor en relación al segundo semestre del año (b). la mayor producción se obtuvo durante los periodos de 2011a con 6.333 ton/ha, 2012a con 8.536 ton/ ha, 2012b con 6.677 ton/ha, 2013a con 8.318 ton/ha, 2013b con 12.080 ton/ha; a partir del último año mencionado, la producción decayó llegando a 1.934 ton/ha en el 2015b. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Sostenible (2016).

El maíz tradicional es el cultivo semestral predominante durante los periodos de tiempo estudiados, con un área sembrada de 3.385 hectáreas en el 2016a, seguido del maíz tecnificado que reportan una siembra inicial en el 2013a con 450 hectáreas y termina el 2016a con una pérdida significativa en área y material vegetal con 50 hectáreas. El maíz forrajero se empieza a considerar en el Departamento en el periodo 2012a cuando su área sembrada superó las 120 hectáreas, pero según el Censo Nacional Agropecuario a partir del 2015a no se produce maíz de esta categoría en el Departamento.

El fósforo como nutriente esencial para las plantas

El fósforo (P) es el segundo macronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos. Es componente de muchos minerales inorgánicos (apatitas) y biomoléculas como Adenosin Difosfato (ADP), Adenosin Trifosfato (ATP), Ácido Desoxirribonucleico (ADN), Ácido Ribonucleico (ARN), Fosfolípidos, entre otros. Ayuda a la construcción de biomasa, obtención de micronutrientes, participa en varios procesos fisiológicos de las plantas (Gleason, 2007).

La insuficiencia de este elemento, provoca tardanzas en el crecimiento vegetal y una coloración púrpura en las hojas. Además, las plantas presentan muy baja eficiencia fotosintética lo que conlleva a un retraso en los procesos de maduración (Gleason, 2007; Sharma, et. al, 2013, Kruse, et. al, 2015).

Frente a los elementos principales de nutrición, las plantas requieren al P en promedio entre 0,2 y 0,4% de su peso seco. A pesar de que el P es abundante, sólo el 0,1% del fósforo total está disponible. Las plantas lo adquieren de la solución del suelo como aniones de fosfato, procedentes de la mineralización de materiales orgánicos y solubilización de fuentes minerales (Mullen, 2005). En la solución del suelo se encuentra disponible en muy baja concentración (Sharma, et. al, 2013; Kruse, et. al, 2015).

Por lo tanto, la fracción de P disponible para la planta y su concentración en la solución del suelo puede ser insuficiente para satisfacer las necesidades de las plantas (Rengel y Marschner, 2005; Jorquera, Hernández, Rengel, Marschner y Mora, 2008), por lo cual debe suministrarse por medio de fertilizantes minerales elaborados a partir de roca fosfórica y/o fuentes altamente solubles (Patiño y Sánchez de P., 2014). Sin embargo, éstos tienden a

acumularse en forma de compuestos insolubles cuando entran en contacto con los coloides del suelo (Richardson y Simpson, 2011; Agrawal y Pathak, 2012).

Los oxisoles siempre tienen color rojo por el contenido de óxidos e hidróxidos de aluminio. Además, contienen cuarzo y arcilla caolinita, más pequeñas cantidades de otros minerales de arcilla y de materia orgánica, en este tipo de suelos las pérdidas del nutriente fósforo por efecto de la fijación son altas (80-90%).

Fotosíntesis

Múnera y Meza (2014) mencionan que la reacción química más importante en la naturaleza es la fotosíntesis. Esta reacción utiliza energía luminosa, en presencia de clorofila, para combinar el dióxido de carbono y el agua en azúcares simples. En este proceso, la energía solar es capturada en la ATF e inmediatamente este compuesto está disponible como fuente de energía para muchas otras reacciones dentro de la planta. Por otro lado, los azúcares formados se usan como bloques para construir otras células estructurales y compuestos para almacenamiento (p. 4).

Villarreal y Alfaro (1997) menciona que el Fosforo (P) desempeña un papel importante en la fotosíntesis, la respiración, el almacenamiento y transferencia de energía, la división y crecimiento celular y otros procesos que se llevan a cabo en la planta. Además, promueve la rápida formación y crecimiento de las raíces. El Fosforo (P) mejora la calidad de la fruta, hortalizas y granos y es además vital para la formación de la semilla. El Fosforo (P) está involucrado en la transferencia de características hereditarias de una generación a la siguiente.

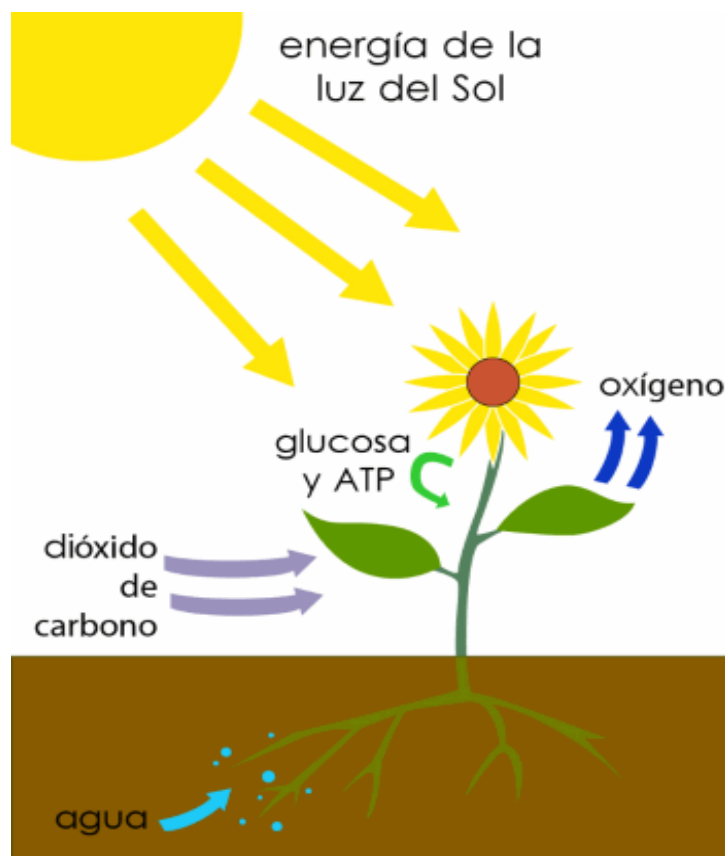


Figura 6: La fotosíntesis – Fuente, (Sordo Medina, 2021).

Formas y cantidades de fósforo en el suelo

El fósforo inorgánico consiste primordialmente de fosfato, de hierro y aluminio y fosfatos ocluidos relativamente insolubles, en los cuales el fósforo se encuentra asociado con el hierro y aluminio. (Thompson, 1974, citado por Prada, 2013) argumenta que la cantidad de materia orgánica en el suelo interviene sobre el fosforo (P) disponible para las plantas, debido a que esta materia orgánica presenta más cargas negativas que positivas, por lo cual los compuestos negativos se combinan con los hidróxidos de hierro y aluminio impidiendo que actúen sobre el

H_2PO_4 - con Fe^{3+} lo que deja en forma disponible el fósforo (P), para que sea asimilado por plantas y microorganismos.

Para Osorio, (2000) el Fósforo (P) se encuentra en el suelo de manera orgánica e inorgánica y continuamente se va transformando. Las formas inorgánicas del Fósforo (P) son pH dependientes, mientras que el Fósforo (P) orgánico obedece a otros factores como el clima, la vegetación, la textura del suelo, prácticas de manejo e irrigación.

El Fósforo (P) orgánico proviene de restos vegetales y animales que al ser degradadas por los microorganismos del suelo liberan compuestos fosfatados, constituye del 29 al 65% del fosforo presente en la superficie del suelo (Arzuaga et. al., 2006) que ha sido identificado específicamente en el suelo se encuentra, sobre todo, bajo tres formas más o menos degradadas: fosfolípidos, ácidos nucleicos, fitina y derivados constituyen, junto a otros compuestos no identificados, entre el 20 y 80 % del fósforo total del suelo, pero su proporción en la disolución del suelo es probablemente pequeña (Navarro y Navarro, 2003).

Por su parte, el Fósforo inorgánico es casi siempre predominante, excepto en los suelos donde la materia orgánica se halla en una gran proporción (Navarro y Navarro, 2003). Está representado en los suelos por las rocas y minerales primarios como apatitas, hidroxapatitas y oxapatitas, estas formas se caracterizan por ser insolubles, sin embargo, bajo condiciones apropiadas pueden ser solubilizadas y convertirse en formas disponibles para las plantas y los microorganismos, sin embargo, se calcula que entre el 95-99% de fósforo insoluble se encuentra presente en el suelo y no puede ser utilizado por las plantas (Khan et. al., 2009).

Hedley et. al., (1982) mencionan que el Fosforo (P) integra todas las cadenas alimenticias pasando de un organismo a otro. El hombre adquiere el Fosforo (P) de las plantas, las que directa o indirectamente a través de los alimentos de origen animal, provee los alimentos que se

ingieren. Las plantas a su vez, lo toman de la solución del suelo. Normalmente esta solución del suelo es demasiado pobre para sostener un cultivo y debe ser realimentada continuamente de las formas más insolubles de Fosforo (P) del suelo, a medida que los cultivos extraen. La mayor parte de los suelos agrícolas son demasiado pobres como para sostener este proceso y precisan de la fertilización.

factores que afectan la disponibilidad de fósforo para las plantas

Humedad: las experiencias señalan que el movimiento del fósforo aumenta con el contenido de agua del suelo. Por otra parte, la absorción de fósforo por las plantas aumenta cuando la succión matriz del suelo disminuye, lo que concuerda con el concepto de que la transferencia del nutriente a las raíces se efectúa por medio del agua (Zambrano et. al, 2020). La pluviosidad en el Caquetá fluctúa de 2500 mm/año a 4500 mm/año o más alto en algunos municipios (p. 1-12)

Textura: influye en la asimilabilidad del fósforo tanto por el contenido de agua que el suelo puede retener como por la contribución a la riqueza del fósforo del suelo. Los suelos de textura gruesa tienen menor contenido de agua que los de textura fina a cualquier succión matriz, y por lo tanto menor difusión del fósforo hacia la raíz. Por otra parte, la cantidad de fósforo intercambiable será menor en los suelos de textura gruesa que los de textura fina que tienen mayor capacidad de adsorción de aniones. El 90% de los suelos del Caquetá corresponden a la textura Franco arenoso.

Materia orgánica: es fuente permanente de fósforo a través de los procesos de descomposición y mineralización que liberan nutrientes a la solución del suelo. La materia orgánica generalmente tiene poca capacidad para fijar fuertemente los iones fosfato. Los suelos

ricos en materia orgánica, especialmente de fracciones activas de la misma, casi siempre exhiben relativamente bajos niveles de fijación de fósforo.

pH del suelo: La mayor parte de la fijación de fósforo ocurre a muy bajos o muy altos valores de pH. Cuando el pH sube desde menos de 5 hasta 6, los fosfatos de hierro y aluminio se hacen algo menos solubles. Además, cuando el pH cae desde más de 8 hasta menos de 6, los fosfatos de calcio incrementan su solubilidad. Por lo tanto, como regla general en los suelos minerales, la fijación de fosfatos es baja (y la disponibilidad para la planta es alta) cuando el pH se mantiene en el rango entre 6 y 7. Incluso en este rango de pH, la disponibilidad puede ser todavía muy baja, y los fosfatos solubles adicionados serán rápidamente fijados por el suelo. El bajo aprovechamiento por las plantas del fosfato agregado al suelo en una estación dada, es debido parcialmente a esta fijación.

Deficiencia de fósforo en las plantas

El P es constituyente de fosfolípidos, vitaminas, ácidos nucleicos, coenzimas, NAD Y NADP y forma parte de la molécula de ATP, que es el compuesto almacenador de energía de la planta; por ello el P es considerado el elemento clave en la vida de los vegetales (Potash & Phosphate Institute [ppi], 1999). Además, este elemento es fundamental en el desarrollo de estructuras reproductivas (flores y frutos) y participa en la formación de triosas fosfatadas, que son la base para la síntesis de sacarosa y almidón en la planta, claves en la calidad comercial e industrial del producto (Taiz & Zeiger, 2010).

El P se requiere en etapas iniciales, en las regiones de crecimiento activo; así mismo, los cambios fenológicos como la floración y fructificación requieren de P, por lo cual este elemento

es transferido de los sitios en donde se ha acumulado a los sitios de nuevo crecimiento (Osorio, 2014).

Los Andisoles son altamente fijadores de fosfato y se cree que este potencial de fijación depende de la presencia de los materiales que hay en la fracción arcillosa, como resultado de la meteorización de la ceniza volcánica, es así como suelos dominados por complejos de humus-aluminio tienen alto potencial de adsorber P; un arma complementaria, que ayudaría a estimar la capacidad de fijación de fosfatos en suelos Andisoles. En estos suelos localizados por encima de 2.000 m s. n. m. se observa una mayor acumulación de materia orgánica, debido a su baja mineralización; en observaciones en suelos Andisoles en Colombia y Ecuador se puede concluir que la fijación de P está estrechamente relacionada con los contenidos de carbono en estos suelos, sobre todo por los complejos de humus-Al (Ospina, 1974; Espinosa, 1996).

Tabla 1: Deficiencia inducida por el exceso de otro

Exceso de	Deficiencia de
Nitrógeno Amoniacal	Calcio, Potasio
Calcio (encalado con Ca(OH) ₂)	Potasio, Magnesio, Fósforo, Hierro, Boro
Potasio	Magnesio, Calcio
Nitrógeno nítrico	nítrico Potasio, Molibdeno
Azufre	Calcio
Fósforo	Calcio, Hierro, Zinc
Manganeso	Hierro
Cobre, Cinc	Hierro, Manganeso
Aluminio intercambiable	Fósforo

Boro

Molibdeno

Nota: Munera y Meza (2020)

Interacciones del fósforo con otros elementos del suelo

En la disponibilidad y efectividad del fósforo en la nutrición vegetal inciden en gran medida las interacciones de este nutriente con otros elementos del suelo. Éstas pueden tener lugar en el propio suelo o durante los procesos de toma, translocación y utilización de los nutrientes por el vegetal. (ICIDCA No. 2, 2007).

Interacciones fósforo-nitrógeno

La interacción más común en el suelo entre estos dos elementos es la coprecipitación de fosfato y amonio, dando lugar a gran número de compuestos de fósforo y amonio entre los que se incluyen el aluminio, el calcio, el hierro y el magnesio, por lo que resulta difícil evaluar su incidencia (ICIDCA No. 2, 2007).

En el suelo, también se produce otro tipo de interacción entre estos nutrientes, como es el aumento de la solubilidad de los compuestos de fósforo en suelos alcalinos como consecuencia de los procesos de nitrificación; en este sentido, tienen mayor efecto las sales de amonio que las de nitrato, pero inferior al ácido nítrico (5). Por otro lado, parece que el nitrógeno juega un papel crítico en la asimilación del fósforo, induciendo un incremento en la absorción de éste por parte de la planta (6). La forma en que la planta toma el nitrógeno (nitrato o amonio) también tiene una considerable repercusión en la toma de fósforo.

Esto indica que, si el nitrógeno se absorbe predominantemente como amonio, al absorberse más cationes que aniones las raíces segregan protones, con la consiguiente disminución del pH. Por el contrario, si es el nitrato el que es absorbido de forma preferencial, el

balance entre aniones y cationes se desplaza hacia una mayor cantidad de aniones que de cationes, por lo que se segregan OH^- y HCO_3^- , lo que incrementa el pH de la superficie radicular (7) (ICIDCA No. 2, 2007).

Interacciones fósforo-calcio

Esta interacción se debe fundamentalmente a la formación de fosfatos de calcio de muy distintas solubilidades a la retención de fósforo en las superficies de carbonato cálcico. A nivel de toma de fósforo por las plantas, se ha encontrado una acción estimulante del calcio en la absorción de fósforo. Para explicar esta actuación se han dado distintas teorías. Uno de los mecanismos propuestos supone que el calcio incrementa la velocidad de transporte de fósforo a causa de su efecto en los transportadores de éste; otro indica un efecto pantalla del calcio en los lugares electronegativos, dando lugar a una mayor accesibilidad a los puntos más específicos de iones fosfatos (5) (Fernandez, 2007).

Interacciones fósforo-magnesio

La probabilidad de interacciones entre estos dos nutrientes a nivel del suelo es muy pequeña. Sin embargo, al magnesio se le ha atribuido la función de transportador de fósforo en la planta al constituir un activador del sistema enzimático kinasa, de vital importancia en el metabolismo de fósforo, ya que activa prácticamente todas las reacciones implicadas en la transferencia de fosfato (Fernandez, ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 2007).

Interacciones fósforo-aluminio

En suelos ácidos se produce la precipitación de fosfatos de aluminio, altamente insolubles, lo que conduce a concentraciones muy bajas de fosfatos en el suelo; por otro lado, la

presencia en suelos de hidróxidos de aluminio favorece la retención de fósforo en su superficie, disminuyendo su disponibilidad (Fernandez, 2007)

Concentraciones altas o tóxicas de aluminio en la solución del suelo conllevan a una disminución en el desarrollo radicular, lo que supone una menor capacidad de la planta para la toma de nutrientes y, por lo tanto, de fósforo. Algunos investigadores sugieren que un sistema radical superficial es ocasionado en parte, por acidez ($\text{pH} < 5.5$) y por niveles tóxicos de aluminio en el suelo, los cuales pueden estar relacionados con diferentes factores, tales como la susceptibilidad a la sequía y las deficiencias de fósforo y calcio.

Los efectos tóxicos del aluminio se manifiestan inicialmente en las raíces de las plantas causando una inhibición en la elongación celular y, por lo tanto, en el volumen del suelo que puede ser explorado por la raíz causando una reducción de la absorción de agua y nutrientes, donde el ápice juega un papel importante en los mecanismos de percepción y respuesta al aluminio. Adicionalmente, pueden existir otros factores relacionados con la toxicidad por aluminio como es el detrimento de las propiedades físicas del suelo, tal como el aumento en la densidad aparente asociada a deficiencia de oxígeno para las plantas (anoxia), que restringen el desarrollo de la raíz. En las plantas, no todo el aluminio absorbido precipita o se absorbe cerca de la superficie radicular. Diferentes tolerancias de las plantas a la toxicidad del aluminio, así como distintas acumulaciones de este elemento en vegetales, sugieren que los ácidos orgánicos actúan como agentes quelantes que impiden la precipitación del aluminio a los pH fisiológicos. De esta forma, el aluminio puede moverse en la célula o interferir en el metabolismo del fósforo dentro de la planta: inhibiendo la actividad de hexoquinasas, ácidos fosfatasa y ATPasa, lo que supone una reducción en la incorporación de fósforo a los hexoazúcares fosforilados (14) (Fernandez, 2007).

Interacciones fósforo-hierro

En los suelos amazónicos, el ion fosfato queda retenido en las superficies de óxidos e hidróxidos de hierro, también se produce la precipitación de los iones fosfatos y férricos, dando lugar a fosfatos de hierro, de insolubilidad muy elevada. Las interacciones entre estos dos elementos se pueden explicar cómo una reacción de precipitación de fosfato férrico externamente a la superficie radicular. El fósforo puede interferir en el transporte interno de hierro, formando fosfatos de hierro. Sin embargo, este elemento se mueve en la planta como citrato de hierro, lo que puede ser una protección contra la precipitación por el fósforo. Además, el hierro se encuentra unido a fosfoproteínas como Fe^{3+} y Fe^{2+} . De esta forma, la relación fósforo/hierro puede ser una medida del equilibrio entre Fe^{3+} y Fe^{2+} en las células, síntesis hemos y de clorofila (15).

Interacciones fósforo-zinc

De todos los nutrientes que interactúan con el zinc, el fósforo es, sin dudas, el más importante tanto por la incidencia económica como por la aparente complejidad de sus efectos. Para la deficiencia de zinc en los vegetales, provocada por la aplicación de fertilizantes fosforados, se han dado varias explicaciones: a) el incremento en el crecimiento vegetal debido a un aporte adecuado de fósforo, puede disminuir la concentración de zinc en la parte aérea de la planta hasta niveles de deficiencia, b) la aplicación de fosfato reduce los contenidos y la concentración de zinc en la planta, debido a que el fosfato adsorbido a las superficies de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio del suelo forma complejos de zinc en estas superficies, disminuyendo la disponibilidad de este nutriente, c) la disminución en el desarrollo de micorrizas V.A (vesículas arbusculares) también puede disminuir la toma de zinc por las raíces (16).

Estudios realizados por diferentes autores muestran que el zinc puede jugar un papel importante en el mantenimiento de la integridad y selectividad de las membranas celulares y que una deficiencia de este elemento puede dar lugar a una pérdida en el control de la toma de fósforo por las plantas. Por otro lado, algunos trabajos sugieren que el nivel de suministro de fósforo a niveles tóxicos podría modular la concentración de zinc en el citoplasma de las células de la raíz (Fernandez, ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 2007)

Problema

La baja disponibilidad natural de fosforo en los suelos de la región amazónica del Departamento del Caquetá, lo cual genera baja productividad, rentabilidad, competitividad y sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios en el departamento del Caquetá.

Descripción del Problema

La baja presencia natural del fosforo en los suelos del Departamento del Caquetá, debido a un estado de degradación avanzado, el cual se manifiesta en su baja capacidad de intercambio catiónico, baja concentración de bases y bajo fósforo disponible.

Las condiciones agroecológicas de la región contribuyen a acrecentar el problema de la baja disponibilidad del elemento nutritivo en el suelo. Las altas pluviosidades, la textura franco arenosa del suelo, el pH, los bajos contenidos de materia orgánica, alta capacidad de fijación del fosforo en los suelos, son factores influyen en acrecentar las pérdidas de este nutriente.

De igual manera, las malas prácticas agrícolas y ambientales como la deforestación y quema del bosque nativo para implementar monocultivos de pasturas, en sistemas de producción

de ganadería extensiva, la ocupación de terrenos baldíos y la comercialización de madera son factores que han contribuido a la degradación del suelo y de sus propiedades químicas.

Finalmente, la baja disponibilidad del fósforo en los suelos de la región, contribuye a generar la baja productividad, competitividad y sostenibilidad de los sistemas de producción agropecuarios. Lo cual se evidencia en los bajos ingresos de los productores, los altos niveles de pobreza en el sector rural, el abandono de las unidades productivas, el desplazamiento de la mano de obra rural hacia los centros urbanos, y en general, el marcado deterioro de las condiciones de vida de las comunidades rurales de la amazonia caqueteña.

Es por lo anterior que este estudio analiza el comportamiento del nutriente vegetal fósforo en los suelos amazónicos del Departamento del Caquetá; para proponer alternativas agroecológicas para mejorar el contenido del nutriente y la disponibilidad del mismo en el suelo.

Planteamiento del Problema

Los suelos del Caquetá hasta ahora estudiados son en su mayoría, latosoles, es decir terrenos que han estado durante largos periodos de tiempo bajo selvas tropicales, y que en su gran mayoría corresponde a Oxisoles de acuerdo con la clasificación de suelos del USDA, se caracterizan por estar conformados por arcillas rojas ecuatoriales o lateritas; son suelos muy pobres en materia orgánica, fósforo, potasio y demás nutrientes esenciales para una agricultura próspera (Molano A., 1968).

De acuerdo con Molano (1968), casi todo el Territorio está compuesto morfológicamente por zona montañosa de la Cordillera Oriental de Los Andes, ondulada, plana y cenagosa, con vegetación mesófila, con predominio de los bosques higrofiticos (Bosque Pluvial Tropical).

Estas condiciones, sumadas a otros factores físicos como el clima han favorecido el

establecimiento de unos suelos que en términos generales, presentan una textura principalmente fina, con diferentes grados de drenaje interno, un pH que fluctúa entre 4,5 y 5,8 (IGAC, 1993); con una capacidad catiónica de cambio de baja a media y saturación de bases baja; presentan alto contenido o saturación de aluminio, elemento tóxico para muchos cultivos; en los horizontes minerales se presenta bajo contenido de carbón, fósforo, potasio y magnesio. Mineralógicamente predominan el cuarzo y la caolinita, elementos que no aportan nutrientes a las plantas, dando lugar a una fertilidad muy baja a ligeramente moderada. Se distinguen los siguientes suelos:

De montaña. Su drenaje interno varía de imperfectamente a excesivamente drenados, moderadamente profundos, en ciertos lugares limitados por el nivel freático; ácidos a muy ácidos, con alto contenido de aluminio y baja fertilidad.

De piedemonte. Formados especialmente sobre los depósitos de conos aluviales, con una profundidad efectiva variable debido al contenido de piedras; así mismo el drenaje interno es moderado a alto. Ácidos a muy ácidos, con alto contenido de aluminio, que los hace tóxicos y una baja fertilidad.

De lomerío. Formados a partir de sedimentos arcilloso-arenosos principalmente, con un nivel freático fluctuante que en algunos sectores genera encharcamiento. Son ácidos a muy ácidos, con un alto contenido de aluminio que los hace tóxicos y con una baja fertilidad.

De la Altiplanicie Estructural. Formados de rocas sedimentarias (areniscas) del Paleozoico y que hacen parte de la Formación Araracuara, con un bajo contenido de nutrientes que no facilita la formación de cobertura vegetal exuberante.

De las terrazas aluviales. Formados por la acumulación de sedimentos aluviales, depositados en el Holoceno por los ríos Caquetá, Caguán y Ortegua principalmente, con un nivel freático fluctuante, de textura fina a gruesa, con una profundidad efectiva variable; son

ácidos a muy ácidos, con alto contenido de aluminio y una fertilidad de baja moderada. (Corpoamazonia, 2007).

Justificación

Esta propuesta nace a partir del problema que se presenta por la baja presencia del fósforo en los suelos del departamento del Caquetá, debido a un estado de degradación avanzado, el cual se manifiesta en su baja capacidad de intercambio catiónico, baja concentración de bases y baja disponibilidad de fósforo. Además del interés de investigar acerca de la importancia del fósforo (P) en los suelos del departamento del Caquetá y en los sistemas de producción, siendo este elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, favoreciendo el desarrollo de las raíces, y la maduración de los granos, clasificándose como un nutriente primario.

El fósforo es uno de los tres principales nutrientes que las plantas necesitan para prosperar: fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K). Funciona como uno de los principales actores en la fotosíntesis, transportador de nutrientes y transmisor de energía. El fósforo también afecta a la estructura de la planta a nivel celular. Una planta con la cantidad correcta de este elemento va a crecer vigorosamente y madurará más temprano que las plantas que no lo tienen. La deficiencia se muestra cuando hay un crecimiento raquítrico, faltan los frutos o las flores, muestran languidez y las hojas pueden ser más verdes o tener un color violeta debido a que el proceso de fotosíntesis está afectado (J. Aldama, 2016).

El fósforo es un elemento nutritivo esencial para las plantas y su deficiencia reduce severamente los rendimientos de los cultivos. Los suelos neotropicales son mayormente ácidos, deficientes en cationes básicos y con un alto poder de fijación del fósforo. En vista de ello, es

necesario aplicar cantidades importantes de fertilizantes fosforados para obtener un crecimiento óptimo de los cultivos, producción adecuada de alimentos y fibras (FAO, 2007).

De igual forma esta investigación puede ser de utilidad para productores ya que plantea alternativas agronómicas para mejorar la disponibilidad y absorción del fósforo en suelos amazónicos.

Debido a los efectos negativos causado por los fertilizantes químicos, la micorrización ha sido una de las técnicas empleadas para disminuir las unidades de fósforo que se aplican en los campos de cultivo; sin embargo, en los pastos aún no se ha logrado y los estudios han estado dirigidos a algunas leguminosas y muy pocas gramíneas. La inoculación con micorriza incrementa el crecimiento en el establecimiento temprano de los cultivos. Las plantas desarrollan una “calidad biológica” superior, en cuanto a mayor altura, vigor y área foliar, incrementa el rendimiento (entre 15 y 50%), protege las raíces contra ciertos hongos patógenos, aumenta hasta 50% la eficiencia en el uso de fertilizantes, disminuyendo los costos, haciendo más sostenible el ejercicio agrícola (Noda, 2009).

Conociendo la importancia del fósforo para la nutrición de las plantas forrajeras, y reconociendo el potencial del departamento como productor de pasturas para uso pecuario, teniendo en cuenta el déficit de fósforo que presentan los suelos y su mal manejo en aspectos de fertilidad, se plantea la aplicación de fertilizantes, que sean de bajo costo y accesibles para los productores. La roca fosfórica micorrizadas se presenta como una alternativa viable para el manejo nutricional de este tipo de sistemas productivos (Romero et. al., 2003).

Con el propósito de aportar al conocimiento adecuado del uso de alternativas agronómicas para mejorar la disponibilidad y absorción del fósforo en los suelos de la amazonia,

se hace necesario evaluar la efectividad de dichas alternativas mediante recopilación de estudios realizados en la zona.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el comportamiento del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del Departamento del Caquetá.

Objetivos específicos

Discutir sobre la importancia del fosforo en la nutrición vegetal y en los sistemas de producción locales.

Analizar alternativas agronómicas para mejorar la disponibilidad y absorción del fosforo en suelos amazónicos.

Capítulo 2. Metodología

Materiales y Métodos

Para el desarrollo del trabajo se abordó la investigación documental, literaria que permite comparar distintas fuentes bibliográficas, que son el resultado de otras investigaciones y de reflexiones teóricas. Al respecto, Alfonso (1995) sostiene que “la investigación documental es un procedimiento científico, un proceso sistemático de indagación, recolección, organización, análisis e interpretación de información en torno a un determinado tema. Al igual que otros tipos de investigación, éste es conducente a la construcción de conocimientos”. La revisión de

literatura se hizo mediante búsqueda de información en la red, es decir mediante fuentes de investigación confiables y autores experimentados, así como también el uso de investigaciones realizadas en la región por parte de entidades locales como Corpoamazonia, ICA y la universidad de la Amazonia, de igual forma, algunos trabajos realizados por estudiantes de universidades como tesis de grado.

Como objetivo general de esta investigación tenemos, analizar el comportamiento del nutriente vegetal fosforo en los suelos amazónicos del departamento del Caquetá, el cual se hará mediante recopilación de información e interpretación de análisis de suelos realizados en diferentes zonas del departamento. Los análisis de fertilidad de suelos se desarrollaron en el Laboratorio del instituto geográfico Agustín Codazzi.

Como primer momento se procedió a una revisión bibliográfica, así como: documentos, también audiovisuales, trabajos de grado, artículos de revistas científicas, entre otras publicaciones que permiten cumplir con el propósito de investigar sobre la importancia del fosforo en la nutrición vegetal y en los sistemas de producción locales, así como también determinar cuál es el estado de los suelos del Departamento del Caquetá.

Para lo cual, nos basamos en investigaciones realizadas por el ICA y algunos autores que han contribuido años atrás con dicha investigación.

Complementario a esto, se retoman y se organizan unos análisis de suelos realizados en la región de tal forma que permitan fortalecer el proceso de construcción de conocimiento para poder establecer un diagnóstico de los nutrientes en los suelos del Caquetá principalmente el fosforo, realizado por el docente Ismael Dussan. Con estos datos se pudo realizar una interpretación y así establecer un diagnóstico más acertado de como es el comportamiento del fosforo en los suelos del departamento y en qué cantidades aproximadamente se encuentra.

De esta manera se hace necesario resaltar la importancia del fósforo en el crecimiento vegetal, teniendo en cuenta la posición de diversos autores. Para llevar a cabo el segundo objetivo que es analizar alternativas agronómicas para mejorar la disponibilidad y absorción del fósforo en suelos amazónicos, se tuvo en cuenta los datos obtenidos en el cumplimiento del primer objetivo para así plantear alternativas agronómicas que permitieran mejorar tanto la disponibilidad como la absorción del fósforo.

De ahí se plantearon soluciones como la implementación de sistemas agrosilvopastoriles, abonos verdes, abonos orgánicos, enmiendas orgánicas, fosfocompostes entre otras, que según investigaciones han demostrado ser muy acertadas para mejorar la deficiencia de nutrientes en los suelos.

Finalmente, del análisis de la información obtenida, se procede a sistematizar el trabajo con las recomendaciones, basadas en las necesidades identificadas según la interpretación de los análisis y datos recopilados de investigaciones realizadas en la región, que sean funcionales para productores y personas interesadas en el tema.

Resultados de la Investigación

Análisis de Resultados

Importancia del fósforo en la nutrición vegetal y en los sistemas de producción locales.

Estado de los suelos del departamento del Caquetá.

En el noroccidente de la Amazonia colombiana, la dinámica de cambio de la vegetación natural por pasturas se encuentra en constante aumento. Actualmente, el departamento de Caquetá concentra la mayor cantidad de alertas tempranas por deforestación en el país, representando el 34,6 % del total nacional (Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono para

Colombia, 2017). La mayor parte del bosque natural se ha intervenido para el establecimiento de ganadería extensiva, de manera que a la fecha existen en el departamento 14.251 fincas dedicadas a esta actividad (Instituto Colombiano Agropecuario [ICA], 2017).

Los suelos más afectados por prácticas de ganadería extensiva son los que se localizan en el paisaje de lomerío amazónico. Estos suelos son pobremente drenados en las depresiones y bien drenados en el resto del territorio; poseen texturas finas con un cambio marcado en el porcentaje de arcilla entre los horizontes A y B; se caracterizan por baja fertilidad natural, poca disponibilidad de oxígeno y bajos contenidos de materia orgánica; son desde fuerte a extremadamente ácidos, y presentan alta saturación de aluminio, baja saturación de bases y pobre contenido de fósforo y potasio (Rosas et. al., 2016)

De acuerdo con algunos autores, la escasez de nutrientes en el suelo limita la producción vegetal y el desarrollo de actividades productivas dependientes de la fertilidad edáfica (Morgan & Connolly, 2013). Los macronutrientes son elementos que afectan la totalidad de los procesos de los seres vivos, por lo que en la nutrición del ganado bovino resultan indispensables (Escudero & Mediavilla, 2003; Silveira & Moura, 2020). Los macronutrientes cumplen numerosas funciones y se clasifican en dos grupos según la cantidad en la que se encuentran en los alimentos: los primarios, que son nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), y los secundarios, que incluyen calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) (Ringuelet & Gil, 2005).

Numerosos estudios de zonas de pastoreo en la región amazónica reportan pérdida de nutrientes primarios y secundarios. Luizão (2007) afirma que con la edad de la pastura se pierden nutrientes en altas proporciones y Peña et al. (2013) reportan disminución de los niveles de Ca y Mg en paisajes degradados.

Asimismo, en su estudio de los macronutrientes en suelo de vega, lomerío y montaña, Becerra, Ordoñez et al. (2014) señalan que los valores de los parámetros Ca, Mg, K y P, independientemente de la geoforma considerada, fueron similares a los registrados por (Peña, Venegas & Cardona 2010) en suelos expuestos a pastoreo.

Interpretación de los resultados de análisis de suelos en el Caquetá

Es preciso establecer los niveles críticos para cada elemento, con el fin de interpretar los resultados de un análisis de suelos. Para Bertsch (1987) el nivel crítico de un elemento es la concentración extraída del suelo por encima de la cual existe una alta probabilidad de no obtener incrementos sensibles en la producción, mientras que valores inferiores muy probablemente corresponderán a producciones pobres.

La Asociación de Reforestadores y Cultivadores de Caucho del Caquetá (ASOHECA), reporta la realización de análisis de suelos en fincas caucheras del departamento del Caquetá, en la Tabla 2., se presenta un consolidado de algunos de estos los cuales sirven para realizar el siguiente análisis.

Acidez extraíble y pH

Los suelos de la región, en general, presentan una textura principalmente franco arenosa, con diferentes grados de drenaje interno, un pH que fluctúa entre 4,5 y 5,8 (IGAC, 1993); con una capacidad catiónica de cambio de baja a media y saturación de bases baja; presentan alto contenido o saturación de aluminio, elemento tóxico para muchos cultivos; en los horizontes minerales se presenta bajo contenido de carbón, fósforo, potasio y magnesio. Según

Corpoamazonia, mineralógicamente predominan el cuarzo y la caolinita, elementos que no aportan nutrientes a las plantas, dando lugar a una fertilidad muy baja a ligeramente moderada.

Como se observa en la Tabla 2, Los resultados obtenidos de acidez extraíble, de acuerdo con Bertsch (1987) el primer dato indicador sobre el estado nutricional y la acidez del suelo es el pH. El pH determinado en agua se refiere a la acidez de los iones H_3O^+ y Al^{3+} que se encuentran en la solución del suelo. Los problemas de acidez en los suelos se presentan en pH menores a 5.5, ya que el aluminio se vuelve soluble y por lo tanto es capaz de causar toxicidad a las plantas dañando directamente las raíces. Los resultados obtenidos en los 35 análisis con respecto al pH son desfavorables, el promedio fue de 4.16. Esto muestra que el estado de los suelos analizados se encuentra en el nivel extremadamente ácido (pH inferior a 4,5), ya que, existen problemas de toxicidad por efecto del aluminio, que puedan afectar el buen desempeño de las raíces en las plantas (Bertsch, 1987).

Cationes Cambiables o bases (Ca, Mg, K)

El valor de Calcio y Magnesio expresado en un análisis de suelo corresponde a la cantidad total de nutrimento que está disponible a las plantas, el absorbido a la superficie coloidal, y el que está en solución (Bertsch, 1987). Los resultados de calcio promedio para los análisis variaron mucho. El promedio fue de 1.16, bajo <3 . Los resultados de magnesio obtenidos fueron muy parecidos y se encuentran dentro del nivel bajo $<1,5$. El valor promedio de magnesio fue 0,39. El valor promedio de potasio fue 0,007 meq/100 g, cuyo valor está muy por debajo del intervalo óptimo (de $<0,2$ a $>0,4$).

Tabla 2: Consolidado de análisis de suelos realizados en el departamento del Caquetá

No. Análisis	Municipio	Vereda	Finca	Variables																
				pH	Conductividad Eléctrica	Arenas %	Limos %	Arcillas %	Textura	M.O %	Nitrógeno %	Fosforo P ppm	Potasio K Meq/100 g	Calcio Ca Meq/100 g	Magnesio Mg	Aluminio Meq/100 g	Sodio Na Meq/100 g	Sat Al %	CICE	Ca:M g
1436	Puerto Rico	Centro Indígena	La Esperanza	4,90	0,11	46,67	30,00	23,33	Franco	2,89	0,14	3,19	0,16	13,68	5,00	0,74	0,13	3,7	19,7	2,7
1432	Doncello	Trocha C	Las Brisas	3,99	0,09	36,67	46,67	16,67	Franco	2,20	0,11	14,8 ₂	0,10	0,40	0,20	4,94	0,04	86,85	5,68	2,00
1433	San José Del Fragua	Cristal		4,45	0,06	50,00	23,33	26,67	Franco arcillo arenoso	1,62	0,08	13,9 ₉	0,03	0,43	0,12	2,42	0,06	79,17	3,05	3,54
1434	Puerto Rico	Maracaibo	Primavera	4,10	0,09	40,00	33,33	26,67	Franco	1,35	0,07	3,91	0,09	2,45	0,16	7,14	0,06	72,08	9,91	15,31
1427	La Montañita	El Carmen	La Floresta	3,93	0,08	10,00	50,00	20,00	Franco limoso	1,49	0,07	3,91	0,05	0,40	0,16	4,20	0,06	86,13	4,88	2,50
428	Albania	Quebradon		4,31	0,08	56,67	23,33	20,00	Franco arcillo arenoso	1,49	0,07	14,8 ₂	0,04	0,48	0,12	1,79	0,06	71,87	2,48	3,96
1429	Doncello	Maguare	El Progreso	4,04	0,10	66,67	16,67	16,67	Franco arenoso	1,71	0,09	49,9 ₈	0,07	0,48	0,16	1,79	0,00	71,83	2,49	2,97
1430	Doncello	Maguare	La Esperanza	4,05	0,11	70,00	16,67	13,33	Franco arenoso	1,42	0,07	3,19	0,04	0,43	0,12	1,26	0,13	63,86	1,97	3,54
1431	El Paujil	Morabia	El Rosal	4,19	0,09	36,67	40,00	23,33	Franco	1,34	0,07	3,19	0,09	0,60	0,16	5,78	0,06	86,32	6,69	3,75
1422	Puerto Rico		Resguardo Nassakiwe	4,38	0,11	63,33	26,67	10,00	Franco arenoso	1,63	0,08	12,3 ₄	0,09	1,53	0,60	4,62	0,17	65,92	7,01	2,54
1423	San José Del Fragua	Cristal		4,24	0,09	56,67	28,33	15,00	Franco arenoso	1,35	0,07	16,5 ₃	0,07	0,45	0,08	2,10	0,11	74,93	2,80	5,63
1424	Morelia	Sinaí	La Esperanza	4,32	0,07	56,67	26,67	16,67	Franco arenoso	1,54	0,08	19,1 ₆	0,07	0,78	0,16	2,94	0,11	72,64	4,05	4,84
1425	El Paujil	Morabia	Buena Vista	4,21	0,07	43,33	40,00	16,67	Franco	1,59	0,08	16,5 ₃	0,07	0,75	0,16	5,15	0,11	82,62	6,23	4,69
1426	Cartagena Del Chaira	Alto Arenoso	Totumal	4,51	0,09	63,33	26,67	10,00	Franco arenoso	1,58	0,08	6,86	0,07	0,88	0,16	2,63	0,06	69,27	3,79	5,47
1413	Morelia	Sinaí	Rosa Blanca	3,93	0,07	45,00	31,67	23,33	Franco	1,87	0,09	11,5 ₃	0,09	0,55	0,16	4,73	0,13	83,55	5,66	3,44
1414	Belén De Los Andaquíes	Aguadulce	Al Cauchal	3,96	0,07	55,00	25,00	20,00	Franco arenoso	1,16	0,06	6,86	0,03	0,33	0,08	2,21	0,11	80,37	2,74	4,06
1415	Valparaíso	Santafé	El Retorno	3,90	0,09	60,00	26,67	13,33	Franco arenoso	2,35	0,12	8,39	0,12	0,78	0,28	7,25	0,04	85,64	8,46	2,77
1416	Florencia	Santo domingo	El Mirador	3,82	0,09	55,00	35,00	10,00	Franco arenoso	2,86	0,14	12,3 ₄	0,09	0,33	0,16	2,73	0,02	82,04	3,33	2,03

1417	Cartagena Del Chaira	Alto Arenoso	La Primavera	3,91	0,06	63,33	30,00	6,67	Franco arenoso	1,81	0,09	12,34	0,13	0,63	0,16	3,89	0,11	79,16	4,91	3,91
1418	San Vicente Del Caguán	Buenos Aires	Parcela No.10	4,11	0,06	56,67	28,33	15,00	Franco arenoso	2,16	0,11	6,11	0,03	0,38	0,12	3,99	0,28	83,29	4,79	3,13
1419	San José Del Fragua	La Esperanza	La Batalla	4,49	0,08	53,33	20,00	26,67	Franco arcillo arenoso	1,00	0,05	5,37	0,04	0,50	0,12	1,68	0,22	65,78	2,55	4,17
1420	La Montañita	Palma Arriba	Villa Aurora	4,46	0,09	46,67	15,00	15,00	Franco	1,64	0,08	24,74	0,05	0,70	0,20	3,26	0,24	73,25	4,44	3,50
1421	Albania	Arenoso		4,32	0,10	60,00	23,33	16,67	Franco arenoso	2,60	0,13	9,94	0,07	0,53	0,16	1,47	0,15	62,01	2,37	3,28
1401	Belén De Los Andaquies	Aguadulce	Las Margaritas	4,18	0,04	53,33	23,33	23,33	Franco arcillo arenoso	1,03	0,05	4,64	0,01	0,38	0,12	2,00	0,22	73,40	2,72	3,13
1402	Puerto Rico	Valle bonito	Las Mirlas	4,36	0,06	63,33	23,33	13,33	Franco arenoso	1,79	0,09	3,91	0,09	2,15	1,04	5,04	0,15	59,49	8,47	2,07
1403	Florencia	Germania	Cocoa Rubber	4,56	0,06	43,33	36,67	20,00	Franco	1,01	0,05	3,91	0,03	0,60	0,16	3,47	0,15	78,72	4,40	3,75
1404	Puerto Rico	Cimitarra	La Esperanza	3,94	0,06	61,67	25,00	13,33	Franco arenoso	1,82	0,09	9,16	0,01	0,40	0,12	1,89	0,09	75,33	2,51	3,33
1405	Milán	California	San Jorge	4,20	0,06	61,67	40,00	16,67	Franco	2,23	0,11	7,62	0,13	0,48	0,24	5,99	0,04	87,08	6,87	1,98
1406	El Paujil	Morabia	El Rosal	3,88	0,05	46,67	36,67	16,67	Franco	1,53	0,08	18,27	0,08	0,53	0,16	5,46	0,04	87,14	6,27	3,28
1407	Valparaíso	Galina	La Esperanza	4,15	0,07	63,33	20,00	16,67	Franco arenoso	1,91	0,10	9,94	0,04	0,35	0,12	1,58	0,02	74,80	2,11	2,92
1408	Milán	Salado	Estambul	4,00	0,03	46,67	36,67	16,67	Franco	1,72	0,09	3,91	0,09	0,70	0,20	5,25	0,06	83,26	6,31	3,51
1409	El Paujil	La Revera	El Recreo	4,03	0,10	63,33	25,00	11,67	Franco arenoso	1,49	0,07	9,16	0,12	0,35	0,20	3,05	0,24	77,12	3,95	1,75
1410	San Vicente Del Caguán	Buenos Aires	La Belleza	4,19	0,13	70,00	26,67	3,37	Franco arenoso	2,23	0,11	15,67	0,12	5,15	2,16	6,62	0,15	46,61	14,19	2,38
1411	Doncello	Maguare		3,87	0,07	76,67	20,00	3,33	Franco arenoso	0,53	0,03	5,37	0,01	0,35	0,08	0,95	0,11	63,19	1,50	4,38
1412	El Paujil	Morabia	El Rosal	3,84	0,08	36,67	43,33	20,00	Franco	0,93	0,05	5,37	0,08	0,40	0,16	6,30	0,11	89,42	7,05	2,50
Promedio				4,16	0,08	53,67	29,14	16,48	Franco	1,68	0,08	10,77	0,07	1,15	0,39	3,61	0,11	73,65	5,32	3,68
Metodología				1:1	CONDUCTI	BOUYO	BOUYO	BOUYO	BOUY	WAL	KJEL	BR	ACET	ACET	ACET	KCL	ACET			
				PO	METRIA	UCOS	UCOS	UCOS	OUCO	KEY-	DALH	AY	ATO	ATO	ATO	1.0	ATO			
				TE					S	BLAC	II	DE	DE	DE	M	DE				
				NCI						K		AMO	AMO	AMO		AMO				
				OM								NIO	NIO	NIO		NIO				
				ET								E.A	A.A	A.A		E.A				
				RO																
Rangos										<2	<0,1	<15	<0,2	<3	<1,5					<50

		0,1-0,2	15-30	0,2-0,4		1,5-2,5	
Interpretación	>4	>0,2	>30	>0,4	>6	>2,5	>50
	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Alto

Nota: Informe de resultados del equipo técnico durante el periodo. Documento interno de trabajo. (ASOHECA, 2018, p 96).

Relaciones Catiónicas.

De acuerdo con Bertsch (1987) el contenido de cationes mayores en el suelo (Ca, Mg y K) puede estar en cantidades relativamente altas, y, sin embargo, ofrecer malas posibilidades de absorción de los mismos para la planta debido a que se encuentran en proporciones desequilibradas. Los resultados obtenidos promedio en la relación catiónica Ca/Mg son diferentes. El promedio presentado fue de un valor de 3,68 meq/100 g, que es adecuado, ya que el intervalo de balance se encuentra entre 2 a 5.

Capacidad de intercambio de cationes efectiva (CICE):

La capacidad de intercambio de cationes efectiva corresponde a la sumatoria de los meq/100mL de Ca, Mg, K y acidez extraíble, es el índice más directo de las potencialidades nutricionales del suelo. En relación con Bertsch (1987) un valor de CICE inferior a 5 cmol/L se considera bajo; entre más alto sea este índice mayor capacidad de nutrición tiene el suelo. El promedio encontrado fue de un valor de 5,32 meq/100mL, o sea tiene una cantidad normal de iones.

Fósforo (P):

De acuerdo con Bertsch (1987), la deficiencia de fósforo puede asociarse con el pH y con los contenidos de Al, Fe y Ca. En el ámbito de pH de 5,6 a 6,5 el P adquiere su máxima solubilidad. Valores de pH menores o ácidos favorecen la precipitación de fosfatos de aluminio y de hierro, como sucede en los suelos Ultisoles, y valores mayores, la formación de fosfatos de calcio, como ocurre en los Vertisoles. Para los resultados, se encontraron valores de pH alrededor de 4,16, esto indica que el fósforo no se encuentra en forma soluble en dichos suelos.

De acuerdo con los análisis realizados por ASOHECA (2018), Tabla 2., se observa una fluctuación ente 3-25 ppm de fosforo en los suelos, con un promedio de 10,66 ppm. Este valor del P en suelos de clima cálido de acuerdo con el IGAC (2016), se considera bajo, Tabla 3.

Tabla 3: Interpretación del contenido de fosforo en los suelos

Interpretación	P (ppm)
Bajo	< 15
Medio	15-40
Alto	>40

Nota: IGAC (2018)

Elementos menores (Hierro y Cobre)

El intervalo óptimo de hierro (Fe) va de 25-50, por lo tanto, se encuentro un exceso de Fe, ya que presentó un valor promedio de 502,43. Con respecto al cobre (Cu), el intervalo se encuentra entre <1 a >3 mg/L. Por lo tanto, el promedio se encuentra en niveles adecuados, con valores de 1,27.

Materia orgánica (MO) y Nitrógeno (N2)

Los contenidos de MO descienden con la profundidad y un valor será alto o bajo según el tipo de suelo. Según los análisis, presentó un valor promedio de 1,68% m. o, baja ya que <2. En el análisis de N2, como es de esperar en relación con los resultados de materia orgánica, el contenido de N2 promedio, fue de 0,08 bajo ya que va de <0,1 a >0,2.

Los valores de MO y N2 son directamente proporcionales, y claramente se ve en los resultados. Según Betsch (1987) cada fracción de la materia orgánica juega su propio papel dentro del suelo, por lo que sería importante saber la cantidad que existe de cada una y su grado de actividad, sin

embargo, con el valor que suministra un análisis de suelo es imposible ir más allá de una estimación global. De acuerdo con los factores que afectan la velocidad de mineralización, un alto contenido de materia orgánica puede o no implicar un alto suplemento de nutrimentos. En términos generales, puede decirse que la condición ideal para un suelo, es un alto contenido de materia orgánica.

El fósforo y su importancia en el crecimiento vegetal

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento vegetal, cuya riqueza en (P_2O_5) es del orden del 0,5 al 1% de la materia seca. Juega un papel muy importante en la fotosíntesis, en el transporte de nutrientes, en la síntesis y descomposición de glúcidos, síntesis de proteínas, actividad de las diastasas y como transmisor de energía. Se encuentra, en parte, en estado mineral, pero también formando compuestos orgánicos fosforados con lípidos, prótidos y glúcidos como por ejemplo la lecitina o la fitina. Se trata de un nutriente primario, lo cual supone que sea deficiente comúnmente en la producción agrícola y los cultivos, por lo que lo requieren en cantidades relativamente grandes.

Es necesario un adecuado suplemento de fósforo en nuestros cultivos con el objetivo de favorecer el crecimiento de las plantas y ayudar a que se reproduzcan de forma óptima. Así, una planta con la cantidad correcta de fósforo crecerá vigorosamente y madurará más temprano que otras plantas que carecen del mismo.

Podemos observar la falta de este nutriente en nuestras plantas cuando observamos un crecimiento raquítico, falta de frutos o flores, mostrando un aspecto "lánguido" y las hojas pueden ser más verdes o tener un color violeta debido a que el proceso de fotosíntesis está afectado (Álvaro G.J 2019).

Para Mujica (1993), el fósforo (P) es deficiente en la mayoría de los suelos debido a que el fósforo es un elemento poco móvil. Por su tendencia a reaccionar dando formas fosforadas no disponibles para las plantas, debe ser considerado uno de los elementos más críticos. El Fósforo (P) en la nutrición de las plantas es energía, es el que impulsa cada reacción enzimática de la planta; el ATP es, en efecto, la batería de la vida, el Fósforo (P) es también el principal mineral requerido en el proceso inmunológico de las plantas y, además, por si fuera poco, la producción de glucosa (°Brix) a partir de la fotosíntesis se basa en gran medida de enzimas a base de fosfato.

Fernández et. al., (2006) menciona que la carencia del fósforo en el suelo influye en el tiempo de la cosecha y madurez del desarrollo de la planta, reduciendo el rendimiento de los cultivos; hecho que conlleva a la suplementación con fertilizantes químicos fosforados. A ello se suma que más del 75% de los fertilizantes fosforados aplicados son relativamente costosos para los agricultores y trae consigo la salinización, intoxicación y muerte de organismos benéficos, entre otras alteraciones físico - químicas, asimismo son rápidamente inmovilizados en los suelos (Ramírez, 2009).

Para Villarreal y Alfaro (1997 p. 68-69) las concentraciones más altas de Fosforo (P) en plantas jóvenes se encuentran en el tejido de los puntos de crecimiento. Debido a que el Fosforo (P) se mueve rápidamente de los tejidos viejos a los tejidos jóvenes, las deficiencias aparecen primero en las partes bajas de la planta. A medida que las plantas maduran, la mayor parte del Fosforo (P) se mueve a las semillas. El Fosforo (P) ayuda a las raíces y a las plántulas a desarrollarse rápidamente y mejora su resistencia a las bajas temperaturas. Además, incrementa la eficiencia del uso del agua, contribuye a la resistencia de algunas plantas a enfermedades y adelanta la madurez. Es importante para rendimientos más altos y calidad de los cultivos.

Un aspecto importante de los suelos con buen contenido de Fosforo (P) es la influencia que esta condición tiene en la absorción de Fosforo (P) por los cultivos durante los períodos de estrés de humedad. Una nutrición inadecuada de fósforo puede afectar a distintos procesos, incluyendo la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos, Fernández (2007, p. 55), su carencia produce grandes trastornos como:

1. No se sintetizan proteínas, por lo tanto, se inhibe la síntesis de RNA.
2. Se produce acumulación en las plantas de compuestos que contienen nitrógeno, como arginina, glutamina, prolina, lisina, asparagina e iones amonio.
3. No se establece el equilibrio adecuado entre azúcares y almidón.

Alternativas agronómicas para mejorar la disponibilidad y absorción del fosforo en suelos amazónicos.

Un buen suelo es esencial para una buena cosecha. El suelo debe tener todos los nutrientes necesarios para el crecimiento de las plantas, y una estructura que las mantenga firmes y derechas. La estructura del suelo debe asegurar suficiente aire y agua para las raíces de la planta, pero debe evitar el exceso de agua mediante un buen drenaje. El humus se pierde rápidamente si al suelo se lo deja expuesto.

Sistemas agrosilvopastoriles

Para Altieri (2016) son Sistemas donde la tierra se maneja para la producción concurrente de cultivos forestales, agrícolas y para la crianza de animales. Estos sistemas sirven de buena manera para minimizar el impacto ambiental que vienen sufriendo el planeta, debido a las malas prácticas en la agricultura. En el departamento del Caquetá se implementaron estos sistemas de

forma investigativa en pequeñas fincas del norte del Caquetá, y en las cuales se indujeron 5 componentes: recursos naturales, seguridad alimentaria, producción de abonos, energía renovable y producción de especies menores. (Zolarte, 2017).

El Centro Internacional de Agricultura Tropical, indica que los sistemas silvopastoriles son útiles para mejorar el bienestar animal, la producción de leche y carne, y al mismo tiempo hacer la producción ganadera más amigable con el medio ambiente. Por lo general, un sistema silvopastoril incluye especies arbóreas que proveen sombra a los animales, y arbustos y hierbas que sirven de alimento para el ganado. Al mismo tiempo, estas especies vegetales ofrecen beneficios al medio ambiente, como mejorar la fertilidad y estructura del suelo, proteger fuentes hídricas, proveer hábitat y alimento a otras especies de mamíferos, aves e insectos benéficos que cumplen roles importantes en los agroecosistemas. (CIAT 2016).

Ventajas de un sistema agroforestal

Muchas ventajas se pueden obtener en un sistema agroforestal; pero, particularmente tiene dos ventajas especiales que de forma global encierran otras particulares, una es la sustentabilidad por parte de los productores, y sin duda alguna la otra es, la sostenibilidad en el tiempo tanto como en la producción y para el medio ambiente.

Ventajas ambientales:

En concordancia con el Comité Departamental de Cafeteros de Colombia, se hace un uso más eficiente de los recursos naturales; las diversas capas de vegetación proporcionan una eficiente utilización de la radiación solar, los diferentes tipos de sistemas de raíces a distintas profundidades, hacen buen uso del suelo y las plantas agrícolas de corta duración pueden

aprovechar de la capa superficial enriquecida como resultado del ciclaje mineral mediante las copas de los árboles. Además, la integración de animales puede aprovecharse para la producción secundaria y el reciclaje de nutrientes.

La función protectora de los árboles con respecto al suelo, la hidrología y la protección de las plantas puede utilizarse para disminuir los peligros de degradación ambiental. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en muchos sistemas agroforestales los componentes pueden competir por luz, humedad y nutrientes, por tanto, se deben considerar los intercambios. El buen manejo puede reducir al mínimo estas inferencias y aumentar las interacciones complementarias (CDCC 2011).

Ventajas socioeconómicas:

Mediante la eficiencia ecológica se puede aumentar la producción total por unidad de tierra. No obstante que la producción de cualquier producto individual puede ser menor que en los monocultivos, en algunos casos la producción del cultivo base puede aumentar.

Los diferentes componentes o productos de los sistemas podrían ser utilizados como insumos para la producción de otros; por ejemplo, implementos de madera, abono verde y disminuir la cantidad de inversiones e insumos comerciales.

Los productos arbóreos a menudo se pueden obtener a lo largo de todo el año, proporcionando oportunidades de mano de obra y un ingreso regular anualmente.

Algunos productos arbóreos se pueden obtener sin necesidad de un manejo muy activo, otorgándoles una función de reserva para los periodos en que fallan los cultivos agrícolas, o para necesidades sociales determinadas; por ejemplo, la construcción de una casa.

En la producción de varios productos existe un riesgo de extensión, en la medida que varios de ellos serán afectados de manera diferente por condiciones desfavorables.

La producción se puede enfocar hacia la autosuficiencia y el mercado. La dependencia de la situación del mercado local se puede ajustar de acuerdo con la necesidad del agricultor. Si se desea los productos son consumidos total o parcialmente, o son destinados al mercado cuando se dan las condiciones adecuadas. (Comité Departamental de Cafeteros de Colombia, 2011).

También se debe tener en cuenta que los sistemas agroforestales ofrecen unos servicios muy particulares para el sistema productivo y el medio ambiente natural, entre estos tenemos:

- ✓ Conservación del suelo, la fertilidad, evitar la erosión.
- ✓ Conservación y mantenimiento de la cantidad y la calidad del Agua.
- ✓ Retención del carbono y la reducción de las emisiones de gases con efecto invernadero.
- ✓ Mantenimiento y ordenación de la biodiversidad.
- ✓ Efectos ambientales en macro y micro climas
- ✓ Especies introducidas vs especies nativas, control biológico.
- ✓ Aporte de material orgánico al suelo. (Mejía, 2007).

Limitaciones de los sistemas agroforestales

Benavides, (2013) refiere la importante de tener en cuenta a la hora de implementar un sistema agroforestal, es la calidad de los suelos, ya que de esto depende una buena producción en la cosecha, la competitividad por nutrientes puede ocasionar pérdidas o estancamiento en algunas de las especies por la baja calidad de tierras. En los pequeños productores o fincas que son de personas de escasos recursos se debe tener en cuenta que otra de las limitantes que se debe tener

en cuenta son los recursos económicos del productor ya que estos sistemas requieren un tiempo de espera que en ocasiones suele ser prolongado, lo que pone en una situación incómoda para el sustento de las familias más pobres de la región, siendo esta la limitante más relevante en el tema de la producción en cuanto a diseños agroforestales se refiere. Sin embargo, las limitantes más comunes para la implementación de sistemas agroforestales son:

- ✓ Puede requerir más mano de obra. Se convierte en un factor negativo cuando la mano de obra es escasa y cara, y cuando la mecanización puede ser la mejor solución.
- ✓ Mayor complejidad puede dificultar labores de manejo
- ✓ Resistencia a la plantación de árboles en zonas con poca disponibilidad de tierra o uso muy intensivo.
- ✓ Menor conocimiento de potencialidades y manejo de los sistemas agroforestales.

(López, 2007)

Abono verde y compost para cultivos

Otra vía para alimentar el suelo es el uso de abono verde que puede ser utilizado como compost, especialmente las legumbres, las cuales colectan y retienen nitrógeno. Los árboles de vaina, pueden crecer junto a los cultivos alimentarios y sus ramas, ocasionalmente podadas, quedarse en el suelo como abono. Plantas leguminosas más bajas pueden ser plantadas junto a un cultivo alimentario para mejorar el suelo y mantener alejadas a las plagas (Londoño D. s.f.).

Es el más importante; porque permite las mayores transformaciones de los residuos e involucra otros procesos. Es un proceso en el cual los microorganismos aeróbicos oxidan los residuos orgánicos, pasando necesariamente por una etapa termofílica (45 a 60°C) con lo cual

desaparecen las fitotoxinas y el calor latente para dar finalmente un producto estabilizado llamado compost que puede ser utilizado en agricultura con relativa seguridad.

Abonos orgánicos

Son recursos capaces de proporcionar cantidades sensibles de nutrientes esenciales principalmente nitrógeno, fósforo y potasio, al suelo y al vegetal. El término sensible lleva a establecer un valor mínimo de la sumatoria $N + P_2O_5 + K_2O$ que, según el nivel tecnológico de la sociedad, se sitúa entre 4 y 6% en base seca. Además, se consideran fríos los abonos orgánicos con valores reducidos de N, como por ejemplo 1 a 1.5%. Por lo demás, estos tienen una pobre gestión sobre todo en climas fríos. Hay que recordar que los abonos orgánicos no solo tienen N, P y K sino también todos los demás elementos esenciales y no esenciales que últimamente han adquirido importancia. Comparado con los abonos de síntesis química, los abonos orgánicos tienen menos efectividad, pero más eficiencia y representan un seguro para la sostenibilidad ante las extremas variaciones del cambio climático.

Enmiendas orgánicas

Son recursos orgánicos con capacidad para modificar propiedades químicas del suelo que se consideren adversas para el desempeño de los cultivos, como pH, sodio intercambiable, aluminio intercambiable, exceso de calcio, exceso de manganeso disponible, excesos de metales pesados y salinidad. También eleva la capacidad de intercambio catiónico. Por ello reemplaza a las enmiendas minerales como las cales, el yeso, el azufre y otras. Un abono orgánico también hace la función de enmienda.

Los fosfocompostes

Para Stevenson (1967) el procesamiento de las rocas fosfóricas con diversos materiales

orgánicos y su compostación es una técnica promisoriosa para mejorar la solubilidad y la subsecuente disponibilidad de P de las rocas fosfóricas para las plantas. La tecnología es particularmente atractiva cuando:

- ❖ Dispone de rocas fosfóricas de reactividad media a alta pero no son adecuadas para la producción de fertilizantes enteramente acidulados como el superfosfato triple o el superfosfato simple.
- ❖ Aplican en forma rutinaria abonos orgánicos para mantener la materia orgánica del suelo y para complementar los requerimientos en elementos nutritivos (como en la mayoría de suelos tropicales).
- ❖ Practica una agricultura orgánica que excluye el uso de fertilizantes procesados químicamente.
- ❖ Deben eliminar de manera segura para el medio ambiente los residuos urbanos y de la explotación agrícola. Los productos compostados con la roca fosfórica son comúnmente llamados fosfocompostes. Principios de la fosfocompostación, la fosfocompostación está basada en el principio de que durante la descomposición de los materiales orgánicos se produce una intensa actividad microbiana. Muchos tipos de bacterias y hongos dan como resultado la producción de un gran número de ácidos orgánicos y sustancias húmicas. Algunos de los ácidos orgánicos más comúnmente producidos son: cítrico, málico, fumárico, succínico, pirúvico, tartárico, oxalacético, 2-ketoglucónico, láctico-oxálico, propiónico y butírico.

La inoculación de plántulas con endomicorrizas

Principios básicos El término micorriza se refiere a la asociación simbiótica entre las raíces de las plantas y los hongos. En la naturaleza, la mayoría de las plantas forman asociaciones de

micorriza de un tipo u otro con los hongos del suelo, donde el hongo ejecuta la función de los pelos radiculares. El tipo de micorriza que mejora la absorción de P por las plantas es la micorriza vesículo-arbuscular y las micorrizas comúnmente utilizadas son *Glomus fasciculatum*, *G. mosseae*, *G. etunicatum*, *G. tenue* y *Gigaspora margarita*. Las micorrizas vesículo-arbusculares infectan las células de la corteza radicular y forman una red interna y un crecimiento exterior de hifas. Poseen estructuras especiales conocidas como vesículas y arbusculos.

Mosse et al., 1981; Bagyaraj (1990) aluden que los arbusculos son altamente ramificados y ayudan en la transferencia de los nutrientes del hongo hacia las células de la raíz de la planta mientras que las vesículas son estructuras en forma de bolsas que almacenan el fósforo como fosfolípidos. Las micorrizas vesículo-arbusculares se hallan geográficamente en todas partes y ocurren en un amplio rango ecológico, desde los ambientes acuáticos hasta los desérticos. Las micorrizas vesículo-arbusculares colonizan las plantas que pertenecen a las familias de la mayoría de los cultivos agrícolas.

Las familias que raramente forman micorrizas vesículo-arbusculares son las crucíferas, las quenopodiáceas, las poligonáceas y las ciperáceas. Miyasaka y Habte (2001) han revisado la integración de las micorrizas vesículo arbusculares en los sistemas de cultivo a fin de mantener los rendimientos y reducir los aportes de insumos fosfóricos.

Compactación de la roca fosfórica con fertilizantes fosfatados solubles en agua

Fertilizantes de composición química similar a las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas pueden ser preparados indirectamente mediante la compactación de la roca fosfórica seca con los fertilizantes fosfatados solubles en agua tales como el superfosfato simple o el superfosfato triple (Chien et al., 1987a; Chien y Menon, 1995a; Menon y Chien, 1996).

Finalmente, Chien et al., 1987a; Kpombrekou et al., (1991) señalan que el contenido de P soluble en agua de los productos dependerá de la relación entre la roca fosfórica y el fertilizante fosfatado soluble en el agua utilizada. La tecnología de la compactación ofrece la ventaja de emplear las rocas fosfóricas que no son adecuadas para la acidulación parcial directa con el (H_2SO_4) debido a sus altos contenidos de sesquióxidos de Fe y Al. Existe evidencia de que se incrementa la efectividad de las rocas fosfóricas, aún aquellas de baja reactividad, después de compactarlas con los fertilizantes fosfatados solubles en agua.

Bajo estas condiciones, la compactación de la roca fosfórica con los fertilizantes fosfatados solubles en agua en una relación de alrededor 50:50 puede hacer atractivo, agronómico y económicamente, el empleo de las rocas fosfóricas locales en los países en vías de desarrollo. Sin embargo, la eficiencia agronómica de los fertilizantes compactados con relación a los fertilizantes fosfatados solubles en agua dependerá de un cierto número de factores, similar a la de las rocas fosfóricas parcialmente aciduladas.

Granulación de rocas fosfóricas con azufre

Diversos estudios Swaby, 1975, Kucey et al., (1989) han demostrado que la efectividad agronómica de las RF puede ser mejorada, cuando estas son aplicadas en mezcla o granuladas con azufre (S). En algunos casos, los productos fueron inoculados con las bacterias oxidantes del azufre *Thiobacillus* spp. El principio básico del uso de mezclas de RF y el azufre elemental, es que la población nativa o inoculada de las bacterias del suelo, oxide el azufre (S) a ácido sulfúrico (H_2SO_4), cuando el producto es aplicado al suelo. Este ácido reacciona a su vez con las partículas de la RF, las que se hallan cercanas al S, formando los fosfatos mono cálcico y dicalcico. La disolución de las RF en el suelo, es de esta forma ayudada por la acidulación localizada, además de aquella causada por la acidez ambiental del suelo.

Las más importantes especies de las bacterias oxidantes del azufre son *Thiobacillus thiooxidans* y *Thiobacillus thioparus*. La inoculación de los suelos que poseen abundantes *Thiobacillus* spp, puede ser no esencial (Rajan ,1983), pero se prefiere la inoculación para obtener una rápida multiplicación de las bacterias y la disolución de la RF, después de su aplicación al suelo en el menor tiempo posible. Las mezclas de RF y azufre son atractivas debido a que:

- Su producción no requiere una gran inversión de capital.
- Permiten combinaciones flexibles de la relación RF: azufre.
- Permiten utilizar RF de baja calidad, que pueden no ser adecuadas para producir fertilizantes solubles.
- Se comportan como fertilizantes de liberación controladas de P y de S.

¿qué sistema de producción recomendaría para el establecimiento en estos suelos considerando su requerimiento nutricional y el manejo agronómico?

Recomendaría el cultivo de cacao como arreglo agroforestal con plátano y maderables. Bajo el manejo técnico apropiado del cacao se pueden alcanzar altos niveles de producción, plantaciones duraderas y sustentables. Como una alternativa de recuperación de suelos y de liberación y producción de nutrientes.

El cacao [*Theobroma cacao*, L.], es una especie del género *Theobroma*, de la familia de las Malvaceae, la cual cuenta con más de 22 especies. Es originaria de Sudamérica y domesticada en Mesoamérica. (IICA, 2017).

La actual oferta de materiales para la siembra del cacao proviene de las investigaciones realizadas durante años en mejoramiento genético, que consiste en la selección de individuos

(árboles de cacao) con comportamiento superior en cuanto a productividad, calidad y resistencia a enfermedades. Luego son propagados (reproducidos) con la intención de tener hijos (descendientes) que mantengan las características que los hacen mejores respecto a un factor específico. Por ejemplo, la resistencia a una enfermedad (JC. 2016).

Los sistemas agroforestales cacaoteros proporcionan una excelente alternativa para la reforestación parcial de las tierras agrícolas degradadas y en la protección de algunos estratos y espacios ambientales, donde otras alternativas pueden requerir la completa reforestación.

Los agroecosistemas se convierten en elementos claves para la conservación de la biodiversidad. Los sistemas asociados con el cultivo de cacao, por ejemplo, por su estructura boscosa, son una herramienta valiosa para este propósito, especialmente en zonas de amortiguamiento de áreas protegidas. El diseño y manejo de los árboles de sombra del cacao determina en gran medida el valor del cacaotal para conservar y manejar la biodiversidad. (Parrish et. al., 1999).

Fedecacao (2006) refiere el cultivo de cacao dentro de la concepción moderna, se concibe como un sistema agroforestal, el cual se combina especies agrícolas, con especies forestales, en una sucesión de cultivos donde el cacao, durante los primeros 6 meses, se combina con especies de ciclo corto, luego con cultivos de ciclo medio que le proporcionan sombreado y, finalmente, con árboles de mayor porte que le proveen el sombreado definitivo, como es el caso de los maderables y algunos frutales.

Por otra parte, la producción de cacao permite el asocio con otras especies vegetales, incluido en sistemas agroforestales (SAF), principalmente con especies que aportan sombrero como: plátano, frutales y maderables, debido a que el cultivo requiere sombrero transitorio y permanente; éste último se requiere con alrededor del 50% de sombra en cultivos en fase

productiva (Paredes, 2004). Los beneficios que prestan éstos sistemas acompañantes son los de generar sombra al cacao, protegerlo contra fuertes corrientes de aire y ofrecer al productor otras alternativas de ingresos económicos (Paredes, 2004; Espinal et. al., 2005; Rojas et. al., 2009 y Pinzón et. al., 2012).

De acuerdo con Batista (2009), el árbol de cacao, al igual que otras especies del género *Theobroma*, presenta un crecimiento dimórfico de sus ramas: a) unas son de crecimiento vertical (hacia arriba), denominadas ramas de crecimiento ortotrópico, y constituyen el tallo y/o los chupones, b) otras son de crecimiento oblicuo (hacia fuera), denominadas ramas plagiotrópicas. Por otra parte, el cacao desarrolla un tallo principal de crecimiento vertical que puede alcanzar 1 a 2 m de altura a la edad de 12 a 18 meses; en este momento, emite un verticilo u horqueta, es decir un grupo entre 3 y 5 ramas laterales; las cuales, presentan, entre ellas, un espacio bien marcado entre cada uno de sus puntos de origen; los que en conjunto conforman un solo anillo cuando estos órganos llegan a la madurez. Con mucha frecuencia hay formación de chupones que emergen por debajo de la horqueta, donde se puede presentar por reiteración, alrededor de cuatro verticilos.

Paredes (2004) y Pinzón et. al., (2012), describen que, el cacao es una planta umbrófila o especie del sotobosque, que requiere sombra tanto en la fase de establecimiento como en la productiva, pero, especialmente en los primeros años de vida, debido a que la radiación solar excede a la que pueden utilizar en la fotosíntesis, lo cual, incrementa la temperatura y transpiración, excesivamente, y aumenta la posibilidad de detener el crecimiento y entrar en senescencia (Somarriba, 2004).

Por tanto, el cacao no se adapta a altas intensidades de luz, reflejado en el daño o foto inhibición del aparato fotosintético (Serrano y Bhiehl, 1999).

Las plantas que proveen la sombra que el cacao requiere para regular la cantidad e intensidad de radiación, en la fase inicial del cultivo, se denominan sombra provisional; la cual, comúnmente, se realiza con especies del género *Musa* (plátano y banano), mientras que la sombra permanente cumple la misma función, pero con menor severidad, luego de 3 a 5 años de establecida la plantación de cacao, utilizando para ello especies arbóreas como *Erythrina spp.* (Batista, 2009 y Pinzón et. al., 2012).

Material vegetal

Se plantea en un sistema agroforestal (SAF), donde se propone utilizar especies semiperennes y perennes y la especie agrícola, así:

Semiperennes: Plátano (*Musa AAB* Simmonds), variedad Hartón, recomendada para la zona Perennes (maderables de ciclo largo):

- Caucho (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.), sembrados por medio de *stumps*.
- ABARCO (*Cariniana pyriformis* Miers). presenta buena adaptación a la region.

Cultivo agrícola principal: Cacao (*Theobroma cacao* L.). Propagado por enjertación, a partir de cuatro clones de alto rendimiento: ICS - 60, TSH – 565, ICS – 95, CCN – 51, elegidos con base en su buen comportamiento, en cuanto a productividad, alta tolerancia a enfermedades, precocidad y buena intercompatibilidad en las zonas cacaoteras del País.

Conclusiones y Recomendaciones

Para el departamento del Caquetá según los análisis de suelos se determina que, la textura del suelo es franca arcillo arenosa y franca arenosa que según la clasificación son suelos livianos y medios. Las texturas arenosas finas y limosas son propensas a la erosión. Por otro lado, la textura arenosa presenta baja capacidad de retención de agua y baja capacidad de suministro de nutrientes.

Se pudo establecer que esta zona se encuentra un pH muy ácido muy desfavorable para el establecimiento de cultivos, ya que es un factor determinante para los demás nutrientes esenciales.

Alto contenido de aluminio Al, las altas saturaciones de Al intercambiable favorecen la pérdida del nutriente fósforo en el suelo por fijación irreversible, alcanzando valores hasta del 90%, especialmente del fosforo proveniente de fuentes fertilizantes altamente solubles.

Según los datos analizados con un pH de 4,16 aproximadamente, nos indica que el fosforo no se encuentra de forma soluble en los suelos.

Estudios realizados muestran que las rocas fosfóricas en asociación con micorrizas otorgan beneficios que se reflejan en la producción de biomasa, aumento de altura en las plantas, mayor cobertura, además de se puede enmarcar en los principios de la ciencia agroecológica, y provee una fuente de fosforo y calcio (FAO, 2007).

Se recomienda primero corregir la acidez del suelo y posteriormente aplicar la roca fosfórica micorrizada, debido a que la alta acidez del suelo puede limitar la absorción del fosforo.

El producto para corregir la acidez debe ser el adecuado teniendo en cuenta las características y forma de incorporación del producto al suelo.

Para el manejo adecuado del suelo es necesario conocer las cantidades de los diferentes minerales que éste contiene, para así fertilizar los terrenos de manera adecuada y compensar la degradación de éste debido a la erosión y mala rotación de los cultivos.

Las causas más importantes de la degradación química de los suelos han sido las malas prácticas agrícolas como la deforestación, la siembra de monocultivos, la praderización de la amazonia, las quemadas y las siembras en pendientes pronunciadas sin prácticas de conservación de suelos.

Se recomienda la implementación de sistemas agroforestales sobre los monocultivos, porque estos sistemas de usos del suelo mejoran el contenido de materia orgánica y nutrientes en el suelo, incluyendo el mejoramiento del contenido de fósforo disponible para las plantas.

6.1. Referencias Bibliográficas

- ACAMAFRUT. (2018). Estadísticas cacaoteras del departamento del Caquetá durante el periodo 2018. *Documento Interno de trabajo*.
- Agropecuaria, C. C. (2002). *Los sistemas silvopastoriles en la ganadería bovina del trópico bajo colombiano*. Obtenido de Manual técnico. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Fedegan, Colciencias: <https://bit.ly/2WZXXiY>
- Aguilar, J. &. (1992). Metodología de capacidad de uso agrícola de los suelos. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. *III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, 281-286.
- Alvarado L., B. R. (2005). Minerales Naturales utilizados en Colombia como fuentes en fertilizantes o enmiendas de suelo. *CYTED, Brasil*.
- Ansorena, J. (1995). *El Suelo en la Agricultura y el Medio Ambiente. Laboratorio Agrario. Departamento de Agricultura y Medio Ambiente*. Obtenido de Diputación Foral de Gipuzkoa. Vol. IV, N°38 - 3 er trimestre.: http://www.fraisoro.net/articulos/38_34_38.pdf
- Arango, P. &. (2005). Determinación de nitratos y amonio en muestras de suelo mediante el uso de electrodos selectivos. *Facultad Nacional de Agronomía Medellín* .
- Aránzazu Hernández F, M. G. (2009). Materiales de Cacao en Colombia, su compatibilidad sexual y modelos de siembra. *FEDECACAO, CORPOICA*, 28.
- ASOHECA. (2018). *Informe de resultados del equipo técnico durante el periodo*. 96: Documento interno de trabajo.

- ASOHECA. (2018). *Resultados preliminares del análisis de suelos de las fincas caucheras del departamento del Caquetá*. 55: Documento Interno .
- Badia V, D. (1995). *Biología del Suelo*. Geórgica . 235-259.
- Becerra-Ordoñez, L. C.-P.-P. (2014). *Evaluación del nivel de degradación de suelo y pastura en tres geoformas de Florencia Caquetá*. Obtenido de Momentos de Ciencia,:
<https://bit.ly/3dSMKaG>
- Bertsch, F. (1987). *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos en Costa Rica*. 2ª Editorial Universidad de Costa Rica , 78.
- Bertsch, F. (1987). *Manual para interpretar la fertilidad de los suelos en Costa Rica*. Editorial Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. , 78.
- Codazzi, I. G. (2014). *Estudios de suelos y zonificación de tierras Departamento del Caquetá*. Bogotá: mprenta Nacional de Colombia.
- Codazzi, I. G. (s.f.). *Guía de muestreo*. Obtenido de Estudio general de suelos y zonificación de tierras departamento de Caquetá, escala 1.100.000:
<https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/guiademuestreo.pdf>
- Corrales Maldonado, C. G. (2014). Deficiencia de azufre en suelos cultivables y su efecto en la productividad. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, 8-44. Obtenido de Biotecnia. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*,.

- Evaluaciones agropecuarias-EVA. (2017). *Estadísticas Agropecuarias del Departamento del Caquetá*. . Caquetá: Secretaria de Agricultura Departamental, documento interno de trabajo.
- FAO. (2007). “Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible “. *13 Boletines FAO*.
- Fernández L., Z. P. (2005). Bacterias solubilizadoras de fosfato inorgánico aisladas de suelos de la región sojera. *Cienc. Suelo. Vol 23, N°1*.
- Fernández, M. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. *ICIDCA*, 51-57.
- Fernandez, M. T. (2007). *Redalyc.org*, 51-57.
- Fernández, M. T. (4 de 05 de 2007). *Amigo o enemigo*. Obtenido de Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XLI (2).: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223114970009>
- Fernandez, M. T. (2007). ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. *Redalyc.org*, 51-57.
- Forero, A. G. (2020). Diseño de rutas para el fortalecimiento de sectores económicos para la promoción del desarrollo endógeno sostenible del departamento de Caquetá. 34-64.
- García Arboleda, M., & Gómez Z., J. (2012). Manejo de la materia orgánica en la Amazonia. . *Servicio Nacional de Aprendizaje, Tropenbos Internacional Colombia, NUFFIC-NPT*.
- INTAGRI. (2017). *Síntomas Visuales de Deficiencia de Fósforo en los Cultivos. Serie Nutrición Vegetal.103*. México : Artículos Técnicos de INTAGRI.

Joaquin, M. A. (1968). *Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia*. Número 99, Volumen XXVI .

Leal Nerio, M. d. (s.f.). Compostaje de residuos orgánicos mezclados con roca fosfórica.

Universidad de Los Andes Núcleo "Rafael Rangel" Trujillo Venezuela. Agron., 335-357.

Molano A., J. (1968). *Sociedad Geográfica de Colombia*.

Munera, G. &. (2017). El fósforo, elemento indispensable para la vida vegetal. El fósforo en el suelo.

Munera., G., & Meza, S. D. (2020). *El fosforo elemento indispensable para la vida vegetal.* .

Obtenido de Universidad Tecnológica De Pereira, Facultad De Tecnología programa De Tecnología Química:

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5248/el%20fosforo%20elemento.pdf?sequence=1>

Nations, F. a. (2001). *Indicadores de la calidad de la tierra y su uso para la agricultura sostenible y el desarrollo rural. Boletín de tierras y aguas de la FAO*. Rome. Italy.

Nations, F. a. (2007). “*Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible*“. Job Number.

Peña-Venegas, C. P. (2010). *Dinámica de los suelos amazónicos: procesos de degradación y alternativas para su recuperación.* . Obtenido de Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi.:

<https://www.sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/librosuelosweb.pdf>

- Pérez López, E. (30 de 04 de 2013). *Análisis de fertilidad de suelos en el laboratorio de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica*. Obtenido de Química del Recinto de Grecia, Sede de Occidente, Universidad de Costa Rica. Revista de las Sedes Regionales, XIV (29): <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66629448001>
- Pulido L. E., M. N. (2003). La biofertilización con rizobacterias y hongos micorrízicos arbusculares en la producción de posturas de tomate (*lycopersicon esculentum mill.*) y cebolla (*allium cepa l.*). *Cultivos Tropicales*, vol. 24, N°1, 15-24.
- Rajan., S. (s.f.). *Métodos para mejorar la efectividad agronómica de las rocas fosfóricas*. Nueva Zelandia: Universidad de Waikato, .
- Reyes de Alvarez Isbelia. (1991). Dinámica del fósforo y aislamiento de algunos microorganismos en la mezcla pulpa de café-roca fosfórica. *Rev. Fac. Agron (Maracay)*, 397-408.
- Ringuelet, A. &. (2005). *Fertilizantes y abonos. Alimentos para las plantas Agencia Córdoba Ciencia*. Obtenido de <http://www.cba.gov.ar/wp-content/4p96humuzp/2013/03/Fertilizantes-y-abonos.pdf>
- Rosa, D. d. (2008). Los sistemas Evaluación Agro-ecológica de Suelos para el desarrollo rural sostenible. *Ediciones Mundi Prensa*,, 404.
- Rosas et. al. (2016). Incidencia de sistemas agroforestales con *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia. *SCIELO*, 116-122.

- Rosas Patiño, G., Muñoz Ramos, J., & Suarez Salazar, J. C. (2016). Incidencia de sistemas agroforestales con *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia. *SciELO*, 116-122.
- Rosas, G. M. (2016). *Incidencia de sistemas agroforestales con Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.). . Obtenido de Müll.Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia.: <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.45173>
- Rural, M. d. (2016). *Cierre Nacional 2016 - Ministerio De Agricultura y .* Obtenido de Información Actas de Cierre Secretarías de Agricultura Desarrollo Rural Proyecto Apoyo A Alianzas Productivas:
https://www.minagricultura.gov.co/convocatorias/Documents/Apertura_
- Solórzano P. Pedro R. (s.f.). Evaluación de Roca Fosfórica Natural y Compactada en Diversos Sistemas Suelo-planta en Venezuela.
- Tamayo, A. &. (2001). *Fertilización de la mora de Castilla en clima frío moderado del departamento de Antioquia. Suelos Ecuatoriales*. Antioquia.
- Zambrano-Yepes, J. H.-V.-D. (2020). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), e1673.
Obtenido de Concentración de los macronutrientes del suelo en áreas de pastoreo del departamento de Caquetá, Amazonia colombiana.:
https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num3_art:1673
- Zambrano-Yepes, J. H.-V.-D. (2020). Concentración de los macronutrientes del suelo en áreas de pastoreo del departamento de Caquetá, Amazonia colombiana. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria.*, 1-12.