



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN
Y SERVICIO EN SUELOS**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**PÉRDIDA Y PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS
Y BIOLÓGICAS DE UN SUELO PARA LA PRODUCCIÓN
DE MAÍZ BAJO SISTEMAS AGROFORESTAL Y MONOCULTIVO**

TESIS

**Como requisito parcial para
Obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA
PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

PRESENTA:

Andrés Camilo Rodríguez Serrano



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



**Enero, 2015
Chapingo, Estado de México**

**PÉRDIDA Y PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE UN
SUELO PARA LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BAJO SISTEMAS AGROFORESTAL
Y MONOCULTIVO**

Tesis realizada por Andrés Camilo Rodríguez Serrano Bajo la supervisión del comité asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado
de:

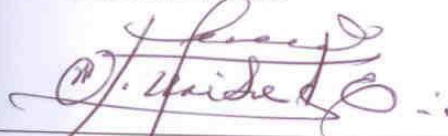
**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

Director:



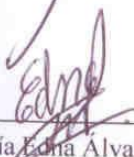
Dr. David Cristóbal Acevedo

Asesor:



Dr. Miguel Uribe Gómez

Asesor:



Dra. María Edna Álvarez

*A la familia, el amor
la libertad y lo bonito de
compartir con todos ellos la vida*
...

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo en este largo viaje.

A mi hermana Paula Andrea Rodríguez por inspirarme y brindarme todo el amor del mundo.

A Katha bonita por todos los días que ha estado a mi lado en este proceso y por el amor y apoyo que me ha demostrado durante estos dos años.

A CONACYT el IICA y el gobierno de México por la beca que me otorgaron, con la cual pude culminar con mis estudios.

A la universidad Autónoma Chapingo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Andrés Camilo Rodríguez Serrano

Fecha de Nacimiento: 12 de Agosto de 1987

Lugar de Nacimiento: Bogotá, Colombia

No. de cartilla militar: 1032'393,866, de Bogotá Colombia

CURP: ROSA 870812HNEDRN01

Profesión: Zootecnista

Desarrollo académico

Bachillerato: Colegio Liceo Samario, Bogotá, Colombia

Licenciatura: Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Colombia

Maestría: Universidad Autónoma Chapingo

PÉRDIDA Y PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE UN SUELO PARA LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ BAJO SISTEMAS AGROFORESTAL Y MONOCULTIVO

LOSS AND PHYSICAL, CHEMICAL AND BIOLOGICAL PROPERTIES OF A SOIL WITH CORN PRODUCTION UNDER AGROFORESTRY AND MONOCULTURE SYSTEMS

Andrés Camilo Rodríguez Serrano¹ David Cristóbal Acevedo²

RESUMEN

En el municipio de Texcoco, Estado de México, fue encontrada una plantación de olivo, en la que se siembra maíz entre las hileras de árboles desde hace 30 años, otorgando una posibilidad para estudiar la influencia de los mismos sobre la fertilidad y pérdida de suelo, además de la producción de maíz. Se establecieron dos tratamientos: Sistema agroforestal (SAF) y Monocultivo (MC), cada uno con tres repeticiones; se realizaron mediciones de: 1) Propiedades físicas; 2) Propiedades químicas; 3) Propiedades biológicas; 4) Ecurrimiento, pérdida de suelo y 5) Producción de maíz. Se observó que el sistema agroforestal influyó en las diferentes propiedades del suelo, expresadas en menores porcentajes de capacidad de campo y punto de marchitez permanente; no se observaron diferencias en cuanto a las propiedades químicas y el SAF favoreció mejores condiciones para el desarrollo de la actividad microbiana y la presencia de mesofauna; adicionalmente el SAF registró menores valores de escurrimiento y pérdida de suelo, aspectos que en general manifestaron un beneficio en la conservación del mismo. No obstante estos no se vieron reflejados en la producción de maíz, que fue de 4670 kg ha⁻¹, en el SAF, y de 6379 kg ha⁻¹ en el MC.

Palabras clave: Sistema agroforestal, Monocultivo, Propiedades físicas, químicas, biológicas, producción de maíz, escurrimiento.

ABSTRACT

In the municipality of Texcoco, Mexico, a plantation of olive tree was found among the trees, where corn has been planted for 30 years, giving a possibility to study its influence on the fertility and loss of soil, in addition to the production of corn. Two treatments with three replicates each one were established: agroforestry system (SAF) and monoculture (MC); measurements of: 1) physical properties; 2) chemical properties; 3) biological properties; 4) runoff and soil loss and 5) maize production were made. It was noted that the agroforestry system influenced the different properties of the soil, expressed in smaller percentages of field capacity and permanent wilting point; there were no differences in the chemical properties and the SAF favored better conditions for the development of microbial activity and the presence of soil mesofauna composition; additionally, SAF register lower values of runoff and soil loss, aspects that in general, expressed a benefit in the soil conservation. However, these were not reflected in the production of maize, which was of 4670 kg ha⁻¹, in the SAF, and MC 6379 kg ha⁻¹ in the MC.

Key words: Agroforestry system, Monoculture, Physical, Chemical and Biological Properties, Corn production, runoff.

¹ Tesista

² Director

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	MARCO TEÓRICO	4
2.1.	Sistemas agroforestales (SAF).....	4
2.2.	El suelo	7
2.3.	Calidad de suelo.....	8
2.3.1.	Indicadores físicos.....	9
2.3.2.	Indicadores Químicos.....	10
2.3.3.	Indicadores Biológicos.....	11
2.4.	Propiedades del suelo	12
2.4.1.	Propiedades físicas	12
2.4.1.1.	Profundidad efectiva.....	12
2.4.1.2.	Textura.....	13
2.4.1.3.	Estructura.....	14
2.4.1.4.	Características hidráulicas.....	16
2.4.1.5.	Temperatura.....	18
2.4.2.	Propiedades químicas	18
2.4.2.1.	pH	19
2.4.2.2.	Potencial redox	20
2.4.2.3.	Materia orgánica (M.O.).....	21
2.4.2.4.	Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	25
2.4.2.5.	Nitrógeno.....	26
2.4.2.6.	Fósforo.....	29
2.4.2.7.	Potasio	31

2.4.3.	Propiedades biológicas	32
2.4.3.1.	Actividad microbiana	33
2.4.3.2.	Mesofauna	35
2.4.4.	Erosión	36
2.4.4.1.	Erosión hídrica	38
2.5.	Maíz (<i>Zea mays</i>)	41
2.6.	Olivo (<i>Olea europaea</i>).....	43
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	45
3.1.	Propiedades físicas del suelo.....	48
3.2.	Propiedades químicas	48
3.3.	Propiedades biológicas	49
3.4.	Escurrimiento y pérdida de suelo	50
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1.	Propiedades físicas	53
4.3.	Propiedades biológicas	64
4.4.	Pérdida de suelo y escurrimiento.....	69
4.5.	Desarrollo y producción del maíz	73
5.	CONCLUSIONES	81
6.	Recomendaciones	83
7.	BIBLIOGRAFÍA	85

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos utilizados para monitorear cambios en la condición calidad y salud del suelo (Lal, 1999)	11
Cuadro 2. Metodologías utilizadas para las diferentes determinaciones de las propiedades físicas del suelo.....	48
Cuadro 3. Metodologías utilizadas para las diferentes determinaciones de las propiedades químicas del suelo	49
Cuadro 4. Propiedades físicas del suelo perteneciente al sistema agroforestal (SAF) y monocultivo (MC) a 20 cm de profundidad.	53
Cuadro 5. Relación de macro y micro poros en el suelo bajo los tratamientos SAF y MC	56
Cuadro 6. Propiedades químicas del suelo perteneciente al sistema agroforestal (SAF) y monocultivo (MC) a 20 cm de profundidad.	62
Cuadro 7. Ecurrimiento y pérdida de suelo en el SAF y MC, durante el tiempo de duración de estudio.	70
Cuadro 8. Producción de maíz en kg.ha ⁻¹ en los tratamientos SAF y MC.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de un sistema agroforestal, adaptado de (Escobar <i>et al.</i> , 2007).	5
Figura 2. Retención de agua en el suelo según el tipo de textura tomado de (de la Rosa, 2008).....	14
Figura 3. Relación entre el contenido de agua y pF (potencial capilar) bajo diferentes texturas tomado de (Gobat <i>et al.</i> , 2004).....	17
Figura 4. Disponibilidad de nutrientes en relación al pH del suelo tomado (Gobat <i>et al.</i> , 2004).....	20
Figura 5. Ciclo del nitrógeno. Tomado de Mengel y Kirkby (2001).	28
Figura 6. Ciclo del fósforo. Adaptado de Stevenson y Cole (1999).	30
Figura 7. Vista aérea del terreno seleccionado.....	45
Figura 8. Selección de la zona para la instalación del estudio y distribución de los tratamientos, agroforestal (en amarillo) y monocultivo (rojo) con sus respectivas repeticiones.....	46
Figura 9. Organización de las repeticiones y parcelas útiles dentro de los tratamientos agroforestal y monocultivo.....	47
Figura 10. Montaje del método Berlese modificado por Tullgren para la extracción de la mesofauna del suelo.....	50
Figura 11. Parcelas establecidas para la determinación del escurrimiento y la pérdida de suelo por erosión hídrica.....	51
Figura 12. Ubicación de las clases texturales presentes en los tratamientos SAF y MC, dentro del triángulo de texturas	54
Figura 13. Curva de retención de humedad del suelo bajo los tratamientos SAF y MC.....	55
Figura 14. Temperatura ambiental (arriba) y edáfica (abajo) registradas por los sistemas agroforestal y monocultivo.....	58
Figura 15. Humedad volumétrica del suelo registrada para los tratamientos SAF y MC en relación a la precipitación.....	60
Figura 16. Promedios semanales de humedad volumétrica registrados en los tratamientos SAF y MC.....	61
Figura 17. Actividad microbiana registrada en los tratamientos SAF y MC..	65

Figura 18. Proporción del total de individuos pertenecientes a la mesofauna del suelo encontrados en las tres determinaciones.....	67
Figura 19. Mesofauna edáfica presente en cada muestreo realizado.....	68
Figura 20. Esguerrimiento (arriba) y pérdida de suelo (abajo) en el SAF y MC en relación a la precipitación.	71
Figura 21. Relación entre la precipitación y la tasa de esguerrimiento y pérdida de suelo para los tratamientos SAF y MC.	73
Figura 22. Relación entre el esguerrimiento y la pérdida de suelo para los tratamientos MC (izquierda) y SAF (derecha).	73
Figura 23. Diferencias entre el desarrollo del maíz en el SAF (izquierda) y monocultivo (derecha).	74
Figura 24. Altura de las plantas de maíz a través del desarrollo del cultivo en los tratamientos SAF y MC.....	75
Figura 25. Síntomas de amarillamiento por exceso de humedad en las plantas de maíz, y su crecimiento con relación a la precipitación.....	77
Figura 26. Características morfológicas de las mazorcas cosechadas en los tratamientos SAF y MC.....	79

1. INTRODUCCIÓN

El suelo, es uno de los recursos más importantes en la producción agropecuaria, su estado determina el tipo de actividades que se pueden realizar y los correctivos necesarios para alcanzar los niveles productivos deseados, este, según USDA (1999), es un cuerpo natural comprendido por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que tiene la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural; haciendo del mismo el componente encargado de sostener la vida terrestre del planeta, por lo que su conservación debe ser una prioridad para productores y gobiernos.

Diversas propiedades físicas, químicas y biológicas, le confieren al suelo la calidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva de tierras agropecuarias, funciones que se ven afectadas negativamente por fenómenos de degradación como la erosión y pérdida de componentes vitales como la fertilidad y la biodiversidad (UNCCD, 1996), que en lugares con niveles de degradación avanzados han generado una disminución de hasta un 50% de la capacidad productiva de la tierra, desencadenando un riesgo importante para la seguridad alimentaria de las personas, fenómeno que se ha podido observar en el sur de Asia, donde las pérdidas anuales se estiman en 36 millones de toneladas de cereal, valoradas en 5,400 millones de dólares ó en estados Unidos donde los costos anuales por la erosión giran alrededor de los 247 dólares por hectárea de tierras de cultivo y pasturas (Eswaran *et al.*, 2001).

Para el caso específico de México, SEMARNAT y CP (2003), reportan que de la superficie total afectada por procesos degenerativos (44.9%) un 88% presenta una pérdida de suelo causada por erosión hídrica, a la vez que un 92.7% muestra una degradación química, generada específicamente por la pérdida de la fertilidad, evidenciando la necesidad e importancia de establecer medidas de conservación de suelo, que además de preservar el ambiente, contribuyan al sostenimiento y posterior aumento de la producción de alimentos demandados por una población que está en constante crecimiento.

Se sabe que la erosión hídrica se da por el impacto de gotas de lluvia, o el flujo de agua a través de la superficie del suelo, y que en este proceso se desprende, remueve y arrastra material de suelos descubiertos que contiene la materia orgánica y los nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas, generando a largo plazo una pérdida de la fertilidad (Unger, 1996; Singer y Munns, 1999). Por otro lado la reducción de la cobertura puede ser reconocida como el desencadenante de un círculo de degradación, debido al disturbio en el ciclo del agua que se genera. De este modo en un suelo que no se encuentra protegido de lluvias erráticas e intensas, el agua no puede infiltrarse, generando un escurrimiento en la superficie que acarrea procesos erosivos durante periodos húmedos, que además inducen a una reducción del almacenamiento del agua en el suelo, eventos que con la alta evaporación que se da en terrenos sin cobertura, pueden limitar la disponibilidad de agua para las plantas, durante temporadas secas (UNCCD, 2009).

Además de la pérdida de suelo, la falta de vegetación puede afectar propiedades biológicas en el mismo, ya que poblaciones de raíces, microbios y animales, son importantes para mantener su fertilidad debido a que llevan a cabo procesos como el consumo y destrucción de materia orgánica, fabricación de humus y reciclaje de nutrientes. Los organismos del suelo necesitan condiciones físicas y de nutrición favorable, que incluyen espacio disponible, especialmente en la superficie, debido a que en ésta la temperatura, agua y nutrientes afectan su crecimiento (Singer y Munns, 1999).

Existen diferentes prácticas realizadas con el fin de mantener o incrementar la vegetación del suelo, dentro de estas se encuentran la labranza de conservación, acolchados, cultivos de cobertura, barreras vivas y abonos verdes (Carrasco *et al.*, 2003; Unger, 1996), actividades que en conjunto pueden ser incluidas en sistemas agroforestales, los cuales en sí, buscan fomentar prácticas de conservación de suelo mientras se mantienen o mejoran los rendimientos productivos de las economías agropecuarias de una manera que tengan un menor impacto negativo sobre el ambiente.

La agroforestería representa el arte y la ciencia de cultivar árboles en combinación interactiva con cultivos y/o animales en la misma unidad de tierra con propósitos múltiples (Krishnamurthy y Ávila, 1999), lo cual favorece una serie de efectos positivos sobre el suelo y por ende los cultivos que se encuentran en el sistema, según Nair (1993) las

arbóreas producen biomasa que mantiene y mejora los niveles de materia orgánica, algunas especies son fijadoras de nitrógeno, otras protegen contra la erosión generada por el agua y el viento, reduciendo así la pérdida de nutrientes a la vez que favorecen un aumento de la fertilidad del suelo gracias a que pueden tomar nutrientes de las capas más profundas del mismo, también pueden mejorar diferentes propiedades físicas, generar un microclima favorable bajo el dosel de los árboles y propiciar un incremento en la actividad realizada por los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica presente. No obstante también existen efectos adversos que se generan con una mala planeación agroforestal, estos incluyen competencia por agua y nutrientes, inhibición del crecimiento debido a un sombreado excesivo y dificultad para realizar cosechas mecanizadas de cultivos (Mahecha, 2003).

En este orden de ideas, se generan diferentes hipótesis que promueven la capacidad de la agroforestería para mantener o incrementar la fertilidad del suelo, reducir sus tasas de erosión hídrica y mejorar o mantener el rendimiento de los cultivos componentes de cada sistema; lo cual hace necesaria la investigación en áreas que permitan comprobar o refutar las afirmaciones que se generan en torno a esta tecnología. Por este motivo, el presente trabajo tiene por objetivo evaluar la pérdida y propiedades físicas químicas y biológicas del suelo en un sistema agroforestal en el que se produce maíz en asociación con árboles de olivo distribuidos en callejones; al tiempo que se determina la influencia del arreglo sobre la producción del componente agrícola, en comparación con un sistema convencional de maíz en monocultivo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas agroforestales (SAF)

Son varias las definiciones que se dan al término agroforestería desde hace ya varios años, todas apuntan a la asociación de varios componentes que incluyen una especie leñosa primordialmente, una especie asociada (cultivos o pastos) y/o animales en forma secuencial, ya sea en la misma unidad de terreno o separados; con la condición de que existan interacciones de tipo biológico o económico.

Krishnamurthy y Ávila (1999) definen la agroforestería como un sistema sostenido del manejo de la tierra que aumenta su rendimiento total, combina la producción de cultivos con especies forestales y/o animales en forma simultanea o secuencial sobre la misma superficie de terreno y aplica prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local.

Young (1990), define la ciencia agroforestal como un arreglo diferenciable del componente leñoso con cultivos, pastos o animales en el espacio y en el tiempo en una misma unidad de terreno.

ICRAF (1997) la definen como un sistema dinámico basado ecológicamente en el manejo de los recursos naturales, que a través de la integración de árboles en las tierras agrícolas y pastizales, diversifica y sostiene la producción para aumentar los beneficios ambientales, económicos y sociales de los usuarios de la tierra en todos los niveles.

Lundgren y Raintree (1983) proponen definir la agroforestería como un nombre colectivo para los sistemas de uso de la tierra y tecnologías donde las perennes leñosas (árboles, arbustos, palmas, bambúes etc.) se usan deliberadamente en las mismas unidades de manejo de tierra con cultivos agrícolas y/o animales en alguna forma de arreglo espacial o

secuencia temporal. Por ultimo Somarriba (1998) define la agroforestería como una forma de cultivo múltiple en el que se cumplen tres funciones fundamentales (Figura 1):

- 1) Existen al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente.
- 2) Al menos uno de los componentes es una leñosa perenne.
- 3) Al menos uno de los componentes es una planta manejada con fines agrícolas. (incluyendo los pastos).

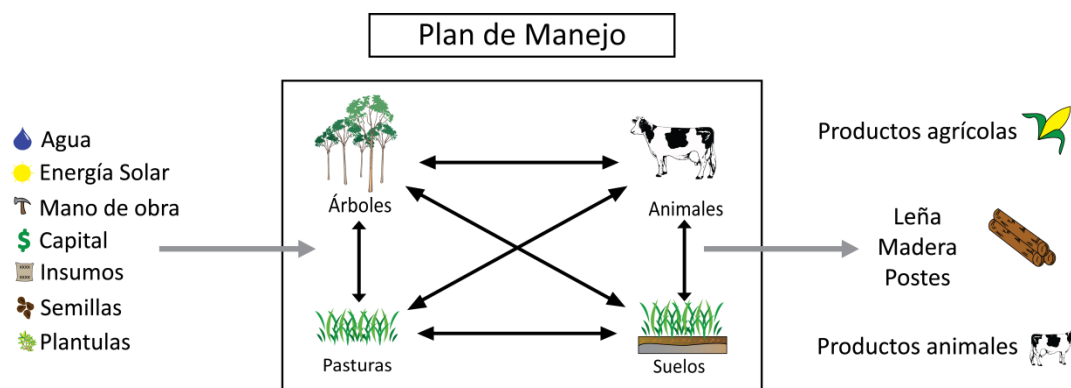


Figura 1.Diagrama de un sistema agroforestal, adaptado de (Escobar *et al.*, 2007).

El grado en que los recursos biofísicos son tomados y utilizados por los componentes de un SAF, está determinado por la naturaleza y la intensidad de las interacciones entre los componentes. El efecto neto de estas es establecido a menudo por la influencia del componente arbóreo sobre los otros componentes o sobre el sistema total, y se expresa en términos de respuestas cuantificables como: cambio en la fertilidad del suelo, modificación del microclima, disponibilidad y utilización del recurso (agua, alimentos y luz), incidencia de plagas y enfermedades y productividad de los cultivos.

Los SAF surgen como una solución sostenible, ante los problemas de degradación que vienen sufriendo los suelos en pasturas y cultivos de países tropicales, estos, otorgan múltiples beneficios a los productores y el medio ambiente ya que la incorporación de leñosas perennes permite incrementar la fertilidad del suelo, mejorar su estructura y disminuir los procesos de erosión, lo cual se da como resultado de un mayor reciclaje de nutrientes, fijación de N, profundización de las raíces, aportes de materia orgánica y mayor actividad de la macro y micro fauna (Mahecha, 2002).

En un sistema suelo – planta, los nutrientes de las plantas están en un estado continuo de transferencia dinámica. Estas los toman del suelo y los usan para procesos metabólicos. Algunas de sus partes, como raíces y hojas muertas retornan al sistema durante el crecimiento y dependiendo del tipo de uso de la tierra y de la naturaleza del desarrollo vegetal, diferentes porciones retornan en el momento de la cosecha, esta biomasa adicionada se descompone por acción de los microorganismos, y los nutrientes que fueron utilizados por las plantas son devueltos al sistema, en donde quedan disponibles para su uso por parte de las mismas. En otras palabras, el reciclaje de nutrientes involucra su transferencia continua al interior de diferentes componentes del ecosistema e incluye procesos como obtención de minerales, actividades suelo – biota y otras transformaciones que ocurren en la biosfera, atmósfera, litosfera e hidrosfera (Nair, 1993). De esta forma los sistemas agroforestales y otros sistemas basados en árboles tienen la ventaja de mejorar el reciclaje de nutrientes ya que las leñosas perennes poseen la capacidad de extraer nutrientes de las capas más bajas del suelo, para luego ser devueltos mediante aportes de materia orgánica que caen en forma de hojarasca, la cual se complementa con las excretas de los animales, productos de las podas y residuos de pastoreo (Crespo, 2008). Adicionalmente, las raíces de las leguminosas son capaces de asociarse con bacterias del género *Rhizobium*, para captar nitrógeno atmosférico y hacerlo disponible para los cultivos de interés; esta fijación de nitrógeno puede alcanzar 200-500 Kg. N ha⁻¹ año⁻¹ (Giraldo, 2000; Pezo e Ibrahim, 2008).

A pesar de las ventajas aparentes que ofrecen los SAF para los sistemas productivos, existen ciertas desventajas que limitan su implementación en campo, aunque la mayoría de estas se dan por errores al momento de implementar el sistema. La principal y más importante es la competencia que se puede generar entre los componentes que integran cada arreglo agroforestal, ya que los SAF al incluir simultáneamente diversas especies vegetales en un solo lugar, presentan ciertos grados de competitividad que se dan por: raíces, agua, nutrientes y luz (Ibrahim, 2010).

Cuando se tiene un monocultivo la competencia por luz es prácticamente inexistente, salvo aquellos casos en donde algunas arvenses de desarrollo rápido pueden superar la altura de la especie de interés (CIAT, 1989). No obstante al momento de la implementación de un SAF, la competencia entre un cultivo de plantas demandantes de elevados niveles de

radiación solar como el maíz, puede llegar a ser más importante que aquellas en que se da por nutrientes, debido a que al ser una especie de tipo C₄ la tolerancia a la sombra es muy baja, más si esta se tiene en exceso, en un estudio realizado por Kang *et al.* (1981) en el que se tenía *Zea mays* y *Vigna unguiculata*, asociados con árboles de *Leucaena leucocephala* sembrada en callejones a 4 metros de distancia que generaban un nivel de sombra del 50%, se observó que después de la poda de la *Leucaena* las especies asociadas incrementaban su desarrollo, gracias a una aumento en la radiación del 38%.

2.2. El suelo

El suelo puede ser definido desde su forma más básica como un cuerpo tri-dimensional de materiales orgánicos e inorgánicos en proporciones variables, que se ha desarrollado como resultado de las interacciones entre material original, clima, topografía, y elementos bióticos, durante un periodo de tiempo variable; generalmente se encuentra constituido por horizontes que se han formado por diferentes fenómenos físicos, químicos y biológicos, cuyo proceso de formación es extremadamente lento, por lo que se le puede considerar como un recurso no renovable. (de la Rosa, 2008). No obstante en él, confluyen componentes bióticos y abióticos que hacen del suelo un sistema, por lo cual USDA (1999) lo define como un cuerpo natural comprendido por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que se encuentra en la superficie de la tierra, ocupa un espacio, y es caracterizado por horizontes o capas, que son distinguibles del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia que tiene la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural.

Reiterando, este es un recurso vivo no renovable, cuya condición es vital tanto para la producción de alimento y fibra, como para mantener las funciones y balance del ecosistema, por lo cual su calidad determina la sostenibilidad de la agricultura, la calidad del ambiente y como consecuencia, la salud de plantas, humanos y animales (Lal, 1999).

Los suelos están compuestos por partículas minerales inorgánicas de arena, limo y arcilla, formas reactivas y estables de materia orgánica, grandes cantidades de organismos vivos como lombrices, insectos, bacterias, hongos, algas, nematodos, entre otros; agua, y gases como O₂, CO₂, N₂ y CH₄. Los atributos físicos y químicos del suelo, regulan la actividad biológica e intercambio de moléculas, entre fases líquidas, sólidas y gaseosas, que

influyen el ciclo de nutrientes, el crecimiento de las plantas y la descomposición de materiales orgánicos; conjunto de componentes que hacen del suelo un sistema vivo, complejo y dinámico, que forma parte integral de los ecosistemas mayores, participando en procesos como el movimiento y transformación del agua, carbono y nutrientes, además de dinámicas tróficas de la biodiversidad (Lal, 1999; de la Rosa, 2008).

2.3. Calidad de suelo

La calidad del suelo está ampliamente definida por su función, y representa un compuesto de sus propiedades físicas, químicas y biológicas que proveen un medio para el crecimiento de las plantas y la actividad biológica y la regulación del flujo y almacenamiento de agua en el ambiente, de esta forma permite el crecimiento de la vegetación, otorgándole soporte físico, agua, nutrientes esenciales y oxígeno para las raíces. La aptitud del suelo para el sostenimiento y desarrollo de la actividad biológica, es una función de propiedades físicas (porosidad, retención de agua, estructura y labranza), propiedades químicas (capacidad de suministro de nutrientes, pH, contenido de sales, entre otros) y propiedades biológicas que dependen del contenido de materia orgánica presente y juegan un papel clave en el ciclo de la mayoría de los elementos requeridos por sistemas ecológicos, descomposición de residuos orgánicos y desintoxicación de algunos componentes peligrosos. Teniendo en cuenta lo anterior, la calidad del suelo puede ser definida como la continua capacidad de funcionar como un sistema viviente, dentro del ecosistema y campos de producción y así mismo de mantener la salud de animales, plantas y humanos (Lal, 1999).

La calidad del suelo es dinámica y puede cambiar en el corto plazo, dependiendo del uso y prácticas de manejo, su evaluación permite entender el deterioro de sus funciones ecosistémicas y predecir el grado en el que puede sostener la productividad biológica y mantener el balance ambiental biofísico (Navarrete *et al.*, 2011). De esta manera Doran y Parkin (1994) recomiendan una calificación de la calidad del suelo basada en su funcionalidad específica, tomando en cuenta factores como productividad, biodiversidad, regulación de flujos hidrológicos, filtración y amortiguamiento de contaminantes, regulación de ciclos biogeoquímicos, soporte estructural y resistencia a la degradación y erosión; los cuales son producto del estado de diferentes propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Dichos factores deben incluirse en una serie de indicadores de calidad

que permitan tener una noción de la condición general del suelo, los cuales deben describir los procesos del ecosistema, integrar propiedades físicas, químicas y biológicas, reflejar atributos de sostenibilidad, ser sensitivas a variaciones ambientales, ser accesibles a diferentes usuarios y aplicables a condiciones de campo, ser reproducibles y ser sensibles a cambios en el suelo que se den como resultado de una degradación antropogénica (Doran y Parkin, 1994); no obstante, el rango de propiedades que se pueden evaluar es muy amplio, por lo que Larson y Pierce (1991) plantearon un conjunto mínimo de características a evaluar que incluyen diversos indicadores físicos, químicos y biológicos que permiten obtener una noción apropiada de la calidad del suelo.

2.3.1. Indicadores físicos

Las características físicas son una parte necesaria en la valoración de la calidad del suelo debido a que ellas normalmente no pueden ser fácilmente mejoradas y son esenciales en la producción de los cultivos, ya que determinan: 1) El grado en el que un suelo puede acomodar un crecimiento radicular sin obstrucciones y proveer un espacio poroso suficiente para garantizar una continuidad de la penetración y expansión de las raíces; 2) La magnitud con la cual el suelo puede resistir a la deformación y 3) la capacidad con la que se acepta, retiene y transmite agua para las plantas. Del total de propiedades físicas que presenta un suelo, se han tomado como indicadores de calidad la textura, profundidad efectiva, porosidad, estabilidad de agregados, densidad aparente, conductividad hidráulica, capacidad de almacenamiento de agua y estructura (Cuadro 1) (Doran y Parkin, 1994; Singer y Ewing, 2000; Bautista *et al.*, 2004).

La implementación de prácticas agroforestales puede tener efectos sobre las propiedades físicas del suelo, gracias a la influencia de la materia orgánica aportada por los árboles. Diversas investigaciones han observado una mejor condición estructural en áreas de bosque en relación a aquellas que están bajo cultivo, en donde se observa una mayor estabilidad de agregados, menos desprendimiento y elevada velocidad de infiltración. Bajo esquemas de monocultivo, la materia orgánica disminuye y la erodabilidad del suelo aumenta, esto se puede observar en sistemas taungya en donde la M.O. y la capacidad de infiltración disminuyen cuando se tiene el cultivo solitario o con árboles muy pequeños y aumentan cuando se tienen condiciones similares a las de una plantación forestal; sistemas como este,

o el de cultivo en callejones, pueden contribuir a un aumento en la deposición de material orgánico en el suelo, que contribuye a mejorar o mantener estable la condición estructural (Nair, 1993).

2.3.2. Indicadores Químicos

En general la importancia de las propiedades químicas de suelo que inciden en la calidad del mismo están relacionadas con la relación suelo-planta y afectan la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo y la disponibilidad de nutrimentos para las plantas; dentro de los indicadores que se proponen se encuentran; calidad del agua, capacidad amortiguadora del suelo, disponibilidad de agua, disponibilidad de nutrimentos para las plantas, pH, Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Materia orgánica, N, P y K disponibles y conductividad eléctrica (Cuadro 1) (Doran y Parkin, 1994; Navarrete *et al.*, 2011).

Los sistemas agroforestales (SAF) gracias a la presencia de los árboles, son la representación en campo del funcionamiento de los diferentes ciclos de cada uno de los nutrimentos requeridos por la producción agropecuaria, ya que en un sistema suelo – animal – planta, todos los elementos están en un estado de transferencia continua y dinámica. Las plantas toman los nutrientes del suelo, y los utilizan para sus procesos metabólicos, posteriormente, algunas de sus partes como hojas, raíces muertas y residuos de cosecha, son retornadas al suelo conformando una capa de biomasa que se descompone a través de la acción de los microorganismos, de tal manera que los nutrientes que fueron utilizados por las plantas, retornan a la solución de suelo, para estar de nuevo disponibles y así asegurar el rendimiento y producción de las especies vegetales que posee el sistema (Nair, 1993). En los SAF se puede presentar mejoramiento de la fertilidad del suelo ya que varias especies arbóreas y arbustivas aportan nitrógeno mediante el proceso de fijación desde la atmósfera en simbiosis con bacterias en su sistema radicular, adicionalmente, otras leñosas están asociadas con microorganismos como micorrizas, que intervienen en la movilización del fósforo y otros elementos fijados en los coloides del suelo; por otro lado, existen especies vegetales con un desarrollo radicular profundo que son capaces de movilizar nutrimentos de las capas más inferiores del sistema, contribuyendo de esta forma

al reciclaje de los mismos y evitando la competencia con los cultivos anuales que están en la parte superficial (Cabrera *et al.*, 2005).

2.3.3. Indicadores Biológicos

La importancia de la evaluación de las propiedades biológicas radica en la tasa de descomposición de la materia orgánica derivada de los residuos vegetales y animales, así como del reciclaje de la misma, ya que los subproductos de su acción influyen en forma directa en las propiedades físicas y químicas de los suelos. Generalmente se refieren a la abundancia y subproductos de los organismos, incluidos bacterias, hongos, nematodos, lombrices, anélidos y artrópodos. Dentro de los indicadores biológicos se encuentran: respiración del suelo, ergosterol, tasa de descomposición de residuos vegetales, N y C de la biomasa microbiana y N potencialmente mineralizable (Cuadro 1) (Doran y Parkin, 1994; Bautista *et al.*, 2004; Navarrete *et al.*, 2011).

Cuadro 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos utilizados para monitorear cambios en la condición calidad y salud del suelo (Lal, 1999)

Indicadores de la solución de suelo	Relación con la función y condición de suelo
Físicos	
Textura	Retención y transporte de agua y minerales; erosión de suelo a partir de su influencia en el tipo de estructura, la cantidad y tamaño de poros.
Profundidad del suelo	Estimación del potencial del potencial productivo y erosión, además de la profundidad fisiológica.
Infiltración y densidad aparente	Potencial de lixiviación, productividad y erosión.
Capacidad de retención de agua	Relacionado con el transporte, retención de agua y erosividad.
Químicos	
Materia orgánica	Disponibilidad de nutrientes, fertilidad de suelo y estabilidad de agregados. A mayor cantidad: disminución de la erosión y aumento de potencial productivo.
pH	Actividad química y biológica, límites para el crecimiento de plantas y actividad microbiana.
Conductividad eléctrica	Actividad microbiológica y de las plantas.
N, P y K extraíble	Nutrientes disponibles para las plantas, pérdida potencial de nitrógeno, indicadores de productividad y calidad ambiental.
Capacidad de intercambio catiónico	Almacén de nutrimentos para las plantas, retención de contaminantes y amortiguación de pH.

(CIC)

Biológicos

Biomasa microbiana	Actividad biológica, flujo de nutrientes, potencial catalizador microbiano y reposición de C y N.
N potencial mineralizable	Productividad del suelo y aporte potencial de N.
Respiración de suelo	Medición de la actividad microbiana y cantidad de C en el suelo.
Riqueza y abundancia de fauna	Relacionado con los procesos de mineralización y descomposición de residuos orgánicos y alerta temprana ante perturbaciones.

2.4. Propiedades del suelo

Los constituyentes del suelo interactúan entre ellos para conferirle diferentes propiedades. Sus proporciones, variaciones espaciotemporales, y las tasas de flujo, influyen en el funcionamiento del sistema (Gobat *et al.*, 2004). Estas propiedades al igual que los indicadores de calidad, constan de diferentes características físicas, químicas y biológicas que en conjunto complementan el sistema suelo y otorgan las cualidades necesarias para garantizar la producción agropecuaria, establecer el tipo de actividad que se puede realizar y los correctivos necesarios que se deben aplicar para alcanzar los rendimientos deseados.

2.4.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas del suelo son determinantes para establecer la capacidad de uso a la cual se es sujeta. Establecen la resistencia, rigidez y fuerza de sostenimiento, capacidad de penetración de las raíces, aireación, capacidad de drenaje, almacenamiento de agua, plasticidad y retención de nutrientes.

2.4.1.1. Profundidad efectiva

La profundidad efectiva en el suelo es aquella que la raíz de la planta puede explorar con facilidad, permitiendo la absorción de agua y nutrientes por los cultivos. El límite inferior de la profundidad útil suele ser una roca dura o un material impermeable. Desde el punto de vista edafológico, el espesor del *solum* (horizontes A y B) se suele considerar como profundidad útil, no obstante, en muchos suelos el horizonte C (no incluido en el *solum*) juega un papel decisivo en el buen desarrollo de las plantas (de la Rosa, 2008).

2.4.1.2. Textura

La textura del suelo se define como el porcentaje en peso del suelo mineral que queda comprendido entre varias fracciones de tamaño de partículas, las cuales son arena (2-0.05 mm), limo (0.05 – 0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm). Diferentes porcentajes de estas fracciones se han combinado en las doce clases texturales del triángulo convencional de texturas. La baja relación superficie a volumen de la arena, la hace sumamente porosa al agua y con poca capacidad para absorber y almacenar los elementos nutrientes. El limo, aunque más fino que la arena se presenta también en granos con mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes. La arcilla corresponde a partículas coloidales que forman suspensión en agua, con gran capacidad de retención de iones nutrientes y moléculas de agua, como consecuencia de ello, la arcilla controla las más importantes propiedades del suelo, incluyendo la plasticidad y el intercambio de iones, no obstante, un suelo muy arcilloso puede tener problemas de drenaje y agrietarse en una condición seca. La mayoría de los suelos presentan una mezcla de las clases texturales, siendo los que contienen relativamente las mismas cantidades de arena, limo y arcilla (suelos francos), los de mayor aptitud agrícola. Cuando la arena es el componente principal, los suelos presentan un buen drenaje y se cultivan con facilidad, aunque se secan rápidamente y los nutrientes se pierden por lavado. Por otro lado, los suelos arcillosos tienden a drenar bien, se compactan con facilidad, no se cultivan fácilmente, pero a la vez presentan una buena retención de agua (Figura 2) y nutrientes. Diferentes tipos de cultivos se desarrollan mejor bajo diferentes texturas por lo cual establecer aquella que sea ideal, estará directamente relacionado con el tipo de sistema productivo que se desea implementar (de la Rosa, 2008).

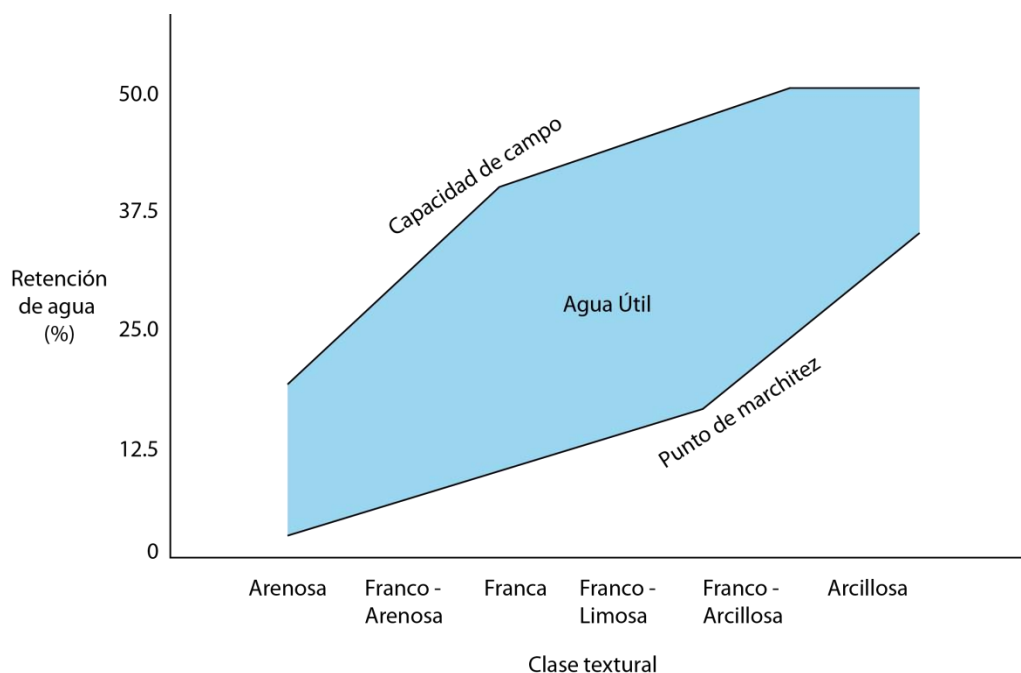


Figura 2. Retención de agua en el suelo según el tipo de textura tomado de (de la Rosa, 2008).

2.4.1.3. Estructura

Las partículas del suelo se suelen agrupar en conjuntos de diferente forma y tamaño que se conocen como agregados y determinan la estructura del suelo, los principales tipos de estructura son: laminar, prismática, columnar, en bloques, granular y grumosa. La textura es el principal determinante de la estructura, junto con el contenido de materia orgánica, la humedad del suelo, las plantas soportadas, la presencia de organismos vivos y propiedades químicas como la salinidad y el tipo de arcilla. La estructura grumosa o granular es la más beneficiosa para la agricultura, dado que se mejora la porosidad del suelo y facilita el laboreo, una buena condición estructural resulta favorecedora ya que resiste a la erosión, mantiene baja la pérdida de suelo aparente, mejorando a la vez la porosidad, la aireación, la percolación y la retención de agua. Cambios en la estructura del suelo, modifican la circulación de agua, la cual fluye rápido en suelos con estructura granular y se reduce a casi cero en suelos fuertemente compactados. En la práctica la estructura es esencial para los productores, ya que ayuda a entender la frecuencia y tipo de labores y maquinaria a utilizar (Gobat *et al.*, 2004; de la Rosa, 2008).

Dependiendo del contenido de humedad, los espacios del suelo están comúnmente ocupados por agua o aire, quienes en conjunto representan la porosidad, la cual otorga una idea de la condición estructural del suelo y se mide por la relación entre el volumen que ocupan los poros y el volumen total, expresada en porcentaje. Los poros incluyen las grietas que se desarrollan con la sequedad, los espacios entre partículas y agregados, huecos dejados por las raíces, entre otros. La estructura y la textura ejercen una fuerte influencia sobre la porosidad total, ya que determinan la relación existente entre macro, meso y micro poros (>50 , $50-0.2$ y $<0.02\mu\text{m}$, respectivamente), los cuales brindan información sobre las propiedades de retención de agua en el suelo; de esta manera, un suelo arenoso puede tener una porosidad total baja, pero la mayor proporción corresponde a poros grandes por donde se mueve con facilidad el agua y el aire, el porcentaje ocupado por poros pequeños en estos es bajo, lo que explica su reducida capacidad de retención de agua; contrario a esto, los suelos arcillosos tienen una mayor porosidad total correspondiente a una alta proporción de poros finos, favoreciendo una elevada retención de agua. Además del aire y el agua que se almacenan y mueven a través del espacio poroso, las raíces y microorganismos necesitan del mismo para vivir ya que el oxígeno presente es decisivo para el crecimiento radicular y la actividad microbiana, los cuales son altamente sensitivos al grado de anoxia (Gobat *et al.*, 2004; de la Rosa, 2008).

Como se mencionó anteriormente, la presencia de árboles puede modificar la estructura de los suelos, razón por la cual el establecimiento de SAF puede generar efectos similares que contribuyan a mantener y mejorar la condición estructural de los mismos, ejemplo de esto se observó en Colombia en donde Cardona y Sadeghian (2005), evaluaron diferentes propiedades físicas del suelo en 8 localidades productoras de café con sombrero de *Inga spp*, comparadas con cultivos a plena exposición solar, observando diferencias significativas a favor de los sistemas que contaban con la presencia de árboles, los cuales, en algunas localidades presentaron mayores valores de porosidad total en comparación al monocultivo expresados en los porcentajes de macroporos (27.56 y 15.51%), mesoporos (10.14 y 5.43%) y microporos (37.41 y 34.81%) respectivamente. Adicionalmente la densidad real del suelo en el tratamiento sin sombrero fue de 2.53 g cm^{-3} , y de 2.30 g cm^{-3} en el SAF, demostrando así un efecto positivo de la presencia de árboles sobre la compactación del suelo.

De una forma más completa, en Portugal, Nunes *et al.* (2011), evaluaron algunas propiedades estructurales del suelo, bajo 6 agroecosistemas diferentes, que incluían, cultivo de cereales, áreas de barbecho, matorral, área de recuperación forestal (bosques con *Quercus pyrenaica*), áreas aforestadas (*Pinus pinaster*) y pasturas. En el cual, las zonas que contaban con una mayor cantidad de árboles (recuperación forestal con *Quercus pyrenaica* y aforestación con *Pinus pinaster*), presentaron menores valores de densidad aparente, 0.91 y 0.81 g cm⁻³, en comparación con los presentados por los tratamientos de cultivos cereal y pasturas 1.23 y 1.22 g cm⁻³ respectivamente. En la evaluación realizada, también fue evaluada la resistencia a la penetración que siguió una tendencia similar a la observada en la densidad aparente, en donde los tratamientos con árboles (recuperación y aforestación) presentaron valores de 1.88 y 0.60 MPa, los cuales fueron inferiores a los observados en el barbecho y pasturas, con 2.86 y 3.98 MPa.

Como se mencionó anteriormente, los árboles aportan cantidades importantes de materia orgánica al suelo que tiene efectos importantes sobre las condición estructural del mismo, este aporte, aumenta conforme se incrementa el desarrollo de las leñosas, como lo demostraron Murray *et al.* (2011) en un trabajo realizado en la llanura costera norte de Nayarit, en México, en el que evaluaron los cambios en la densidad aparente y porosidad total del suelo de un sistema agroforestal compuesto por árboles maderables de *Tabebuia rosea*, *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Gmelina arborea*, *Pawlonia tomentosa*, *Tabebuia oentaphylla* y *Tectona grandis*, durante 6 años en los que se observó que del 2005 al 2010 la densidad aparente pasó de 1.43 a 1.06 g cm⁻³ y la porosidad total de 45.1 a 58%.

2.4.1.4. Características hidráulicas

Un nivel de humedad adecuado en el suelo es crucial para el desarrollo de las plantas, dependiendo fundamentalmente de la infiltración, conductividad hidráulica y capacidad de retención de agua. La infiltración se refiere a la velocidad con la que penetra el agua en el suelo, dependiendo de las características intrínsecas del mismo, la pendiente, la cubierta e incluso el tipo de precipitación. La conductividad hidráulica mide el movimiento del agua en el suelo para un gradiente determinado, lo que condiciona tanto la infiltración como la percolación del exceso del líquido hacia áreas más profundas. El movimiento de agua en el

suelo es consecuencia de múltiples variables que lo caracterizan. Textura y estructura son las más importantes, siendo los suelos arenosos y de estructura suelta los que ofrecen una mayor facilidad para el movimiento del agua, mientras que los arcillosos ofrecen una mayor retención (de la Rosa, 2008). El agua disponible o útil para la planta depende de la profundidad que exploran las raíces y de la capacidad de retención de la misma en las capas exploradas (Figura 3).

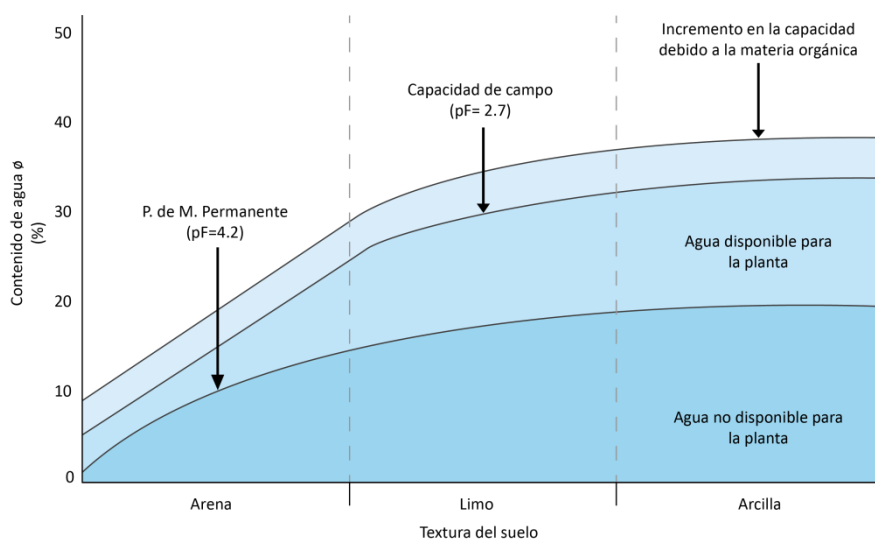


Figura 3. Relación entre el contenido de agua y pF (potencial capilar) bajo diferentes texturas tomado de (Gobat *et al.*, 2004).

La presencia de árboles en los sistemas de producción agropecuaria, gracias a los aportes de materia orgánica y la sombra ejercida, pueden modificar el comportamiento del agua en el suelo, esto se pudo observar en un estudio realizado por Jaramillo y Cháves (1999) en el que se evaluó el porcentaje de humedad volumétrica del suelo de un sistema agroforestal de café cultivado a la sombra de árboles de *Inga sp.* en comparación con un cafetal cultivado a libre exposición solar. En el trabajo se determinó que a 20 cm de profundidad, la humedad se mantuvo superior durante un año marcado por el evento cálido del pacífico más fuerte de las últimas décadas (experimento realizado en 1997), y nunca descendió a niveles por debajo de los requeridos para la producción de café (25%), contrario a lo registrado por el monocultivo (10%). Por otro lado en el experimento conducido por Murray *et al.* (2011) en Nayarit, en el que se evaluó el comportamiento de diferentes propiedades del suelo bajo un sistema agroforestal compuesto por diferentes árboles maderables, se observó que gracias al efecto de la sombra y a la incorporación de materia orgánica la capacidad de campo subió

de 24.3 a 35.9% del 2005 al 2010, mismo periodo en el que la velocidad de infiltración aumentó de 13.08 a 20.03 mm h⁻¹.

2.4.1.5. Temperatura

En el suelo, debido a su heterogeneidad y grosor, diferentes temperaturas coexisten simultáneamente, como consecuencia de varios balances de energía. La estructura, contenido de agua, color y fragmentos gruesos influyen la transferencia de calor, cuya fuente principal es el sol y por ende el calentamiento que este genera directamente en la superficie y el que se produce indirectamente a través de la fotosíntesis y cadenas alimenticias. La temperatura del suelo y sus variaciones modifican varios procesos pedogenéticos relacionados con el calentamiento de las rocas y modificación de la estructura; además de influir severamente en la vida del suelo y su superficie. Las bacterias ocasionalmente son muy sensitivas y poseen rangos definidos de actividad óptima que para la mayoría de las especies está entre 21 - 38°C por otro lado, el crecimiento de las plantas depende de la temperatura desde la germinación hasta el desarrollo de tejidos (Gobat *et al.*, 2004).

La temperatura del suelo es un factor preponderante en el metabolismo y producción vegetal ya que un calor constante, asociado a un déficit hídrico del suelo, puede afectar el desarrollo vegetal, por este motivo Zuluaga y Escobar (2000), evaluaron la temperatura de un suelo perteneciente a un SAF de *Hevea brasiliensis* y leguminosas como *Inga sp.* *Flemingia macrophylla* que eran podadas frecuentemente con el fin de aportar materia orgánica al sistema, en comparación con un monocultivo de *Hevea brasiliensis*. Se realizaron mediciones dos veces al día 10:30 am y 1:00 pm, las cuales permitieron determinar que el SAF mantiene una temperatura de 24°C, mientras que en el sistema convencional el suelo alcanza temperaturas 26 y 30°C, respectivamente, lo cual indica un efecto importante de la sombra generada por los integrantes del sistema sobre las variaciones en la temperatura edáfica.

2.4.2. Propiedades químicas

El suelo es una entidad química, todos sus materiales son sustancias que están compuestas por sólidos, líquidos y gases que pueden ser solubles o insolubles, así como orgánicos e inorgánicos; pueden ser iones y compuestos, sales, ácidos, bases, minerales y fragmentos de

rocas, también existen coloides que son muy activos químicamente y son partículas muy finas de suelo en las que se incluyen humus, arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, que tienen cargas electrónicas positivas y negativas, las cuales poseen iones que son intercambiados por iones similares en la solución de suelo, quienes junto con el pH y el potencial redox son propiedades químicas que influyen en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Osman, 2013).

2.4.2.1. pH

El cambio en la acidez es cuantificado mediante la medición del pH, según Fassbender (1982), es una relación entre los contenidos de protones y de iones OH^- , por lo cual se cumple que en agua pura $\text{pH} + \text{pOH} = 14$; lo cual implica que una solución tendrá una condición neutra ($\text{pH} = \text{pOH}$) cuando su pH sea igual a 7. Diversos suelos incrementan su acidez mediante un proceso natural de acidificación, como resultado de la pérdida de bases por lavado a través del perfil, debido a la absorción de iones nutrientes por las plantas y la producción de ácidos orgánicos por las raíces y microorganismos. El rango de pH entre ligeramente ácido y ligeramente alcalino (6.0 – 7.5) se considera óptimo para la disponibilidad de nutrientes por la mayoría de las plantas. Los efectos adversos suelen presentarse por debajo de 5.5 y por encima de 8, no obstante cada cultivo tiene sus propios requerimientos (Jaramillo 2002; Gobat *et al.*, 2004; de la Rosa, 2008). Según Hernández y Hoeft (2012) un pH bajo (acidez alta) puede generar las siguientes situaciones:

- La concentración de metales solubles, especialmente aluminio y manganeso, puede ser tóxica.
- Las poblaciones y actividad de los organismos responsables de transformar N, S y P en formas disponibles para la planta puede limitarse.
- El calcio puede ser deficiente, especialmente en suelos donde la capacidad de intercambio catiónico CIC es baja.
- La fijación simbiótica de nitrógeno en leguminosas puede afectarse severamente, debido al rango que las bacterias necesitan para realizar la simbiosis.
- La disponibilidad de los elementos minerales para las plantas puede afectarse (Figura 4).

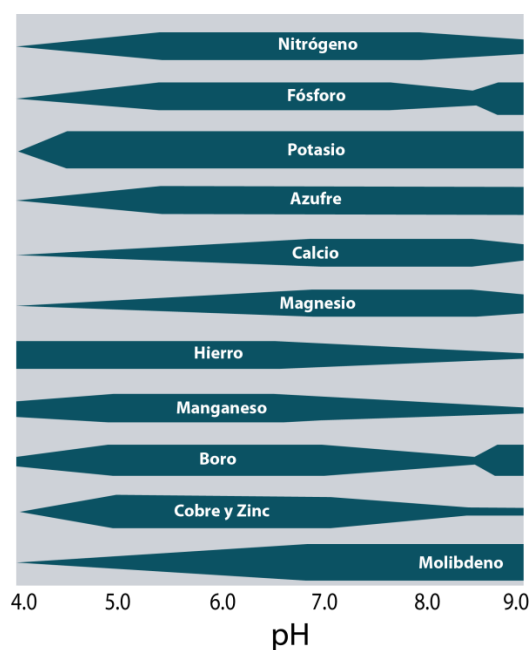


Figura 4. Disponibilidad de nutrientes en relación al pH del suelo tomado (Gobat *et al.*, 2004)

En un estudio realizado por Matoso *et al.* (2007) en Brasil, específicamente en Viçosa, se evaluaron diferentes propiedades químicas de un suelo bajo un sistema agroforestal compuesto por un cultivo de café con sombrío de árboles dispersos de *Casuarina equisetifolia*, *Eugenia uniflora*, *Licania tomentosa*, *Hovenia dulcis* y *Mangifera indica*. En comparación con un cafetal a plena exposición solar, no se presentaron diferencias significativas en cuanto al pH del suelo, el cual en el tratamiento con y sin árboles fue de 4.98 y 4.64 respectivamente. Resultado similar al obtenido por Ogunkunle y Awotoye (2011) en Nigeria quienes en tres agroecosistemas diferentes compuestos por una plantación de *Tectona grandis* de 30 años de establecida, un SAF compuesto por *Teobroma cacao* intercalado con *Cola nitida* y un área de bosque maduro intacta, tampoco encontraron diferencias respecto al pH del suelo el cual, en el mismo orden de tratamientos, fue de 5.44, 5.57 y 5.86.

2.4.2.2. Potencial redox

Se denomina potencial redox del suelo a su capacidad reductora u oxidativa, propiedad que se encuentra vinculada directamente con la aireación del sistema edáfico así como con el pH, los cuales a su vez influyen en la actividad microbiana y las reacciones que se presentan. Los suelos contienen, en promedio 18 – 20% de oxígeno, cantidad suficiente

para todos los microorganismos aeróbicos. No obstante, al presentarse saturación de agua en el suelo ya sea debido a estancamiento, inundación o ascenso del nivel freático, la difusión del oxígeno proveniente de la atmósfera queda casi anulada, ya que esta es cerca de 10,000 veces más lenta en poros llenos de agua que en aquellos llenos de aire. El oxígeno que queda es consumido en pocas horas por microorganismos aeróbicos para el desdoblamiento oxidativo de sustancias orgánicas, conllevando a que los microorganismos facultativos y los estrictamente anaeróbicos comiencen a dominar en el medio, de manera similar, éstos utilizan la materia orgánica del suelo como donadora de electrones, de tal manera que las sustancias orgánicas e inorgánicas del suelo con un nivel alto de oxidación sustituyen al oxígeno. Por la actividad de los microorganismos se presentan reducciones de NO_3 a N_2O y N_2 , lo mismos bajo condiciones fuertemente reductoras hasta ion NH_4^+ ; de manganeso de valencia 3 y 4 a manganeso de valencia 2; de hierro de valencia 3 a hierro de valencia 2; de SO_4^{2-} a H_2S ; de CO_2 a CH_4 y de H^+ a H_2 . Condición que genera que la materia orgánica sea descompuesta de una manera más lenta (Stechauner, 2003; Gobat *et al.*, 2004). A diferentes niveles de potencial redox se obtienen gradualmente cambios en la solución de suelo, de la siguiente manera:

- 800 a 450 mV: El oxígeno aún está presente y la nitrificación se mantiene activa; por lo cual la materia orgánica se descompone rápidamente.
- 450 a 0 mV: El ambiente se transforma en uno que es pobre en oxígeno, que retarda la descomposición de la materia orgánica; si el pH es bajo, los procesos de reducción comienzan rápidamente.
- 0 - -200 mV: El ambiente es anóxico, la materia orgánica es descompuesta por microorganismos anaeróbicos.
- -200 - - 300 mV: La reducción es total; la materia orgánica se descompone liberando sulfuro de hidrógeno (tóxico para organismos del suelo y plantas superiores) o metano.

2.4.2.3. Materia orgánica (M.O.)

La materia orgánica del suelo está formada por diversos y heterogéneos componentes. El material vivo lo conforman las raíces, microorganismos y fauna del suelo; mientras que el material muerto incluye cortezas, raíces muertas, hojas, metabolitos microbianos y

sustancias húmicas. La relación entre ambos materiales, orgánico y mineral es continua, así los residuos de las plantas son rápidamente metabolizados o descompuestos, mediante dos procesos conocidos como humificación y mineralización. Los materiales orgánicos que se encuentran en el suelo se agrupan de acuerdo con su grado de transformación, de la siguiente manera: materia orgánica fresca (Hojas, tallos, raíces, flores, frutos, heces, entre otros); materia orgánica no húmica (carbohidratos, compuestos nitrogenados, lípidos y lignina) y materia orgánica húmica (ácido fúlvico, ácido húmico y humina) (Jaramillo, 2002; de la Rosa, 2008). En condiciones de aireación óptima, elevada temperatura (dentro del rango mesotérmico), buen contenido de humedad, adecuada fertilidad del suelo y residuos orgánicos poco lignificados, se favorecen los procesos de mineralización y se reduce drásticamente la acumulación de materia orgánica en el suelo, por el contrario, en situaciones con déficit de oxígeno, baja temperatura, materiales leñosos, y exceso de humedad, se favorecen procesos de humificación, aunque los dos procesos de descomposición normalmente se llevan a cabo simultáneamente.

Las sustancias no húmicas son el material parental de aquellas que son húmicas, y a la vez son la principal fuente de energía metabólica de los microorganismos del suelo, cuyos productos de degradación se convierten en los cimientos para la fabricación del humus. Como grupo, el material no húmico consta de compuestos que trascienden a través de diferentes clases bioquímicas, las cuales son requeridas para la función, estructura y reproducción de los organismos. Los carbohidratos presentes en el suelo, derivan de contenido vegetal y constan de celulosa, y hemicelulosa además de una contribución de azúcares provenientes de exudados radicales y materiales mucilaginosos, su unidad básica estructural tanto de los polisacáridos como oligosacáridos, son los monosacáridos o azúcares simples cuyas concentraciones en el suelo son relativamente bajas, debido a su disponibilidad inmediata para los microorganismos quienes los transforman en CO_2 , o los incorporan al metabolismo de lípidos y proteínas. Además de los carbohidratos, el nitrógeno, el azufre, y compuestos fosforados, son componentes de las sustancias no húmicas del suelo, aunque en menor proporción, no obstante, estas se convierten en el mayor depósito de estos elementos. El nitrógeno está presente en una gran variedad de compuestos orgánicos que son excretados por diferentes organismos o liberados después de su muerte. Los principales son, aminoácidos, péptidos, proteínas, ácidos nucleicos y

fosfolípidos, por otro lado se encuentran algunos aminoazúcares que son el principal componente estructural de hongos y artrópodos. Al igual que el nitrógeno, el azufre es un componente importante de diversos grupos de biomoléculas, incluyendo aminoácidos, coenzimas, vitaminas y sulfolípidos, de tal manera que del 95 – 99% del total del elemento en el suelo se encuentra en formas orgánicas, contrario al fósforo que en la misma forma, presenta un 1 – 3% de la materia orgánica del suelo. Los lípidos contenidos en el suelo, se derivan particularmente de residuos animales y vegetales, descompuestos o en procesos de descomposición, mientras que aquellos provenientes de microorganismos, están presentes en pequeñas cantidades. Por último se encuentran las ligninas que son el principal precursor de las sustancias húmicas y son componentes de las plantas vasculares, representando del 5-10% del peso seco de las hojas y hasta el 30% de la materia seca de la madera, siendo una de las sustancias de mayor longevidad en el suelo debido a su naturaleza aromática, especialmente en ambientes anaeróbicos donde prácticamente es inexistente su degradación, no obstante en ambientes que cuentan con la presencia de oxígeno, la descomposición es llevada a cabo por un grupo de basidiomicetos filamentosos, como *Coriolus*, *Phanaerochaete* (de raíz blanca), *Poria* y *Gloeophyllum* (de raíz marrón). Es importante aclarar, que ninguno de los anteriores organismos utiliza el metabolismo de la lignina como fuente de energía, ya que este es un proceso secundario derivado de la degradación de hemicelulosa y celulosa (Essington, 2004).

Las sustancias húmicas, según Stevenson (1994) son una serie de sustancias de alto peso molecular de color negro a marrón, formadas por reacciones de síntesis secundaria y pueden ser divididas en ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas y tienen la función de otorgarle al suelo, estructura, porosidad, capacidad de retención de agua y capacidad de intercambio catiónico. Están compuestas principalmente por carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre en cadenas complejas de carbono.

Según Jaramillo (2008) la materia orgánica en sus diferentes formas, tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo; entre los que más se relacionan con la evolución del mismo se encuentran:

- Color: la acumulación de humus en el suelo le transmite su color oscuro, este color aumenta la absorción de radiación y facilita su calentamiento, mejorando la

eficiencia de los procesos químicos que actúan en dicho suelo, así como el establecimiento y desarrollo de organismos en él.

- Humedad: Al aumentar el contenido de humus, se incrementa la cantidad de agua que puede almacenar el suelo, especialmente si es un suelo arenoso; además mejora notablemente, las relaciones hídricas, al mejorar la infiltración y reducir las pérdidas por evaporación; lo que en conjunto contribuye a aumentar la actividad química y biológica del mismo.
- Estructura: La acumulación de humus en el suelo favorece la formación de agregados esferoides de gran tamaño y estabilidad, motivo por el cual se mejora la aireación, la porosidad, la permeabilidad, la velocidad de infiltración, el drenaje y el desarrollo radicular, además de aumentar la resistencia del suelo a la erosión.
- CIC: La humificación genera un incremento en el número de grupos carboxilo (-COOH) y fenólicos (-OH) que pueden disociarse, adquiriendo cargas negativas, lo cual incrementa la CIC.
- pH: Su valor puede disminuir al aumentar el contenido de humus si el suelo tiene baja capacidad amortiguadora del poder acidificante, ya que está compuesto por ácidos orgánicos principalmente.

Para demostrar que la presencia de árboles puede incrementar los contenidos de materia orgánica conforme incrementa el desarrollo de los mismos Murray *et al.* (2011) observó un aumento del contenido de M.O. del año 2005 al 2010 en un suelo agroforestal compuesto por diferentes especies maderables en Nayarit, México del 0.51 al 3.85%, gracias al aporte de biomasa por parte de las leñosas. Del mismo modo en Quindío, Colombia, Farfán (2010) comparó la fertilidad de un suelo de café en monocultivo con aquella de cafetales con sombrío de *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* (cada especie constituía un tratamiento diferente) durante cuatro años, sin evidenciar diferencias significativas respecto a la fracción de M.O. no obstante, en el monocultivo se presentó una tendencia hacia la disminución de la misma a través del tiempo, mientras que en los tratamientos con árboles se mantuvo estable. El estudio también permitió observar la importancia de la calidad de la biomasa que cae al suelo, ya que para el último año de estudio (2005) la parcela con *Eucalyptus grandis* tuvo un contenido de materia orgánica de 6.0% mientras que en los tratamientos con *Cordia alliodora* y *Pinus oocarpa*, fueron de 6.8 y 7.3%

demostrando la mayor facilidad con la que se degradan los residuos vegetales de estas leñosas. Por último, en un estudio realizado por Ogunkunle y Awotoye (2011) en Nigeria, se evaluó el contenido de materia orgánica de un suelo bajo tres condiciones agroecológicas diferentes: 1) Una plantación de *Tectona grandis* de 30 años de establecida; 2) Un SAF compuesto por *Teobroma cacao* intercalado con *Cola nitida* y 3) Un área de bosque maduro intacta. Observando una diferencia importante en la fracción de materia orgánica presente con 3.04, 7.34 y 9.12% respectivamente.

2.4.2.4. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Solo una porción de los nutrientes se mueven libremente en la solución del suelo, ya que la mayoría son aglutinados en superficies orgánicas y minerales, en forma intercambiable. Este mecanismo actúa como un almacén de nutrientes, tanto aniones como cationes. Los minerales de arcilla, específicamente las del tipo illitas y montmorillonitas, poseen una superficie cargada negativamente en donde los cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ son retenidos y por lo tanto, protegidos en contra del lavado. La capacidad de un suelo o alguna otra sustancia con carga negativa, de retener cationes en forma intercambiable se conoce como capacidad de intercambio catiónico (CIC), la cual es una medida de la carga negativa del suelo y se expresa como cmol kg^{-1} de suelo. La CIC depende del tipo y proporción de los minerales de arcilla y la materia orgánica presente en el suelo, los suelos arcillosos presentan una mejor CIC que los suelos arenosos, similarmente los suelos ricos en materia orgánica, presentan una capacidad de intercambio mayor que aquellos con niveles inferiores. Diferentes cationes permanecen en sitios de intercambio con diferente afinidad de adsorción o fuerza de adhesión lo cual determina la facilidad o dificultad con la que estos pueden desligarse del sitio de intercambio por cationes en la solución. En general la fuerza con la que diferentes cationes son mantenidos en el complejo de intercambio se da en el siguiente orden: $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, H^+ , $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$. En donde el aluminio es el más fuerte de los cationes y el sodio el de mayor pérdida (Essington, 2004; Roy *et al.*, 2006).

En los estudios realizados con sistemas agroforestales, se ha evidenciado una diferencia en cuanto a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, influenciada por la presencia de árboles, ejemplo de esto se observó en un estudio realizado por Cardona y

Sadeghian (2005), en cafetales establecidos bajo sombrío de *Inga codonantha* en Colombia, que presentaron una CIC de 19.00 cmol kg⁻¹ a 40 cm de profundidad, la cual fue superior a la presentada por un cafetal en monocultivo (15.50 cmol kg⁻¹) en la misma profundidad. Del mismo modo, en Brasil, específicamente en el estado de Bahía, Barreto *et al.* (2006) evaluaron la CIC bajo diferentes coberturas vegetales compuestas por selva atlántica, cultivo de cacao y pasturas, las cuales presentaron valores de 16.16, 15.92 y 12.22 cmol kg⁻¹ respectivamente, evidenciando que la presencia de árboles puede afectar este parámetro positivamente. En otro experimento, Iwata *et al.* (2012) realizaron investigaciones, respecto a las propiedades químicas de un suelo, en el estado de Piauí, Brasil, bajo los siguientes tratamientos: 1) Un sistema agroforestal de 13 años, compuesto por *Zea mayz*, *Cucurbita pepo*, *Phaseolus lunatus*, *manihot esculenta*, *Ipomea batata*, *Goossypium herbaceum*, *Malpighia glabra*, *Carica papaya*, *Psidium guajava*, *Musa paradisiaca*, *Anacardium occidentale*, *Mangifera indica*, *Annona aquamosa*, *Talisia esculenta*, *Ricinus communis*, *Bixa orellana*, *Sesamun indicum*, *Enterolobium sp.* y *Tabebuia sp.*; 2) Un sistema agroforestal de 6 años, compuesto por *Zea mayz*, *Manihot esculenta*, *Carica papaya*, *Anacardium occidetale*, *Mangifera indica*, *Citrillus vulgaris*, *Cucumis anguira*, *Musa paradisiaca*, *Combretum sp.* y *Mimosa sp.*; 3) Un esquema de corte y quema compuesto por una sucesión de arroz y maíz y 4) Vegetación característica de la caatinga brasileña. Demostrando que la presencia de una mayor cobertura vegetal, puede incidir, en una mejor CIC, en donde los 4 tratamientos observados anteriormente, presentaron valores de 14.53, 8.16, 4.75 y 7.80 cmol kg⁻¹ respectivamente.

2.4.2.5. Nitrógeno

El nitrógeno es el nutriente más abundante en las plantas ya que constituye del 2-4% de su materia seca, las cuales lo absorben en forma de ion nitrato (NO₃⁻) o en forma de ion amonio (NH₄⁺). Forma parte de la clorofila y es un componente esencial de todas las proteínas, además de ser responsable del crecimiento, ramificación, producción de biomasa, tamaño y producción. El nitrógeno absorbido es transportado a través del xilema hacia el dosel de las plantas en forma de iones nitrato, o reducido en la región radicular y llevado como aminoácidos o aminos; por otro lado es móvil en el floema y como tal puede ser translocado de hojas viejas a nuevas en condiciones de deficiencia y de igual forma llevado desde las hojas para el desarrollo de semillas o frutas. La deficiencia de nitrógeno genera

una reducción marcada en la tasa de crecimiento, manifestada en una apariencia delgada y corta de las plantas, un macollaje pobre y área foliar pequeña, por otro lado ya que el elemento es un constituyente de la clorofila, un suministro deficiente genera un color amarillento o clorosis en las hojas, especialmente las viejas (Roy *et al.*, 2006).

Además de su importancia para las plantas, el nitrógeno es uno de los elementos más ampliamente distribuido en la naturaleza y después del carbono, hidrógeno y oxígeno ningún elemento está tan relacionado con las reacciones llevadas a cabo por los seres vivos. Igualmente, sus transformaciones influyen el comportamiento del ciclo del fósforo y el azufre. A pesar de su abundancia, el suelo solo cuenta con una mínima fracción del total que se encuentra en la litósfera, y de este, solo una pequeña parte está disponible para las plantas, además de ser móvil en las plantas, también es parte de la naturaleza, circulando entre la atmósfera y los organismos vivos (Figura 5), en donde intervienen procesos físico-químicos y biológicos (Mengel y Kirkby, 2001).

La dinámica del nitrógeno, ha sido ampliamente estudiada en la agroforestería, gracias a que varias especies de leguminosas utilizadas como componente de diversos arreglos agroforestales, tienen la capacidad de fijar el elemento en el suelo mediante la acción conjunta de bacterias del género *Rizhobium*; no obstante existen otros sistemas que a pesar de no contar con la presencia de leguminosas, pueden contribuir al mantenimiento o aumento de los contenidos de nitrógeno gracias al aporte constante de materia orgánica, aunque es importante aclarar que en algunos casos, a mayor cantidad de especies integrantes del sistema, puede favorecer una mayor extracción del elemento, generando así una reducción del mismo en el suelo.

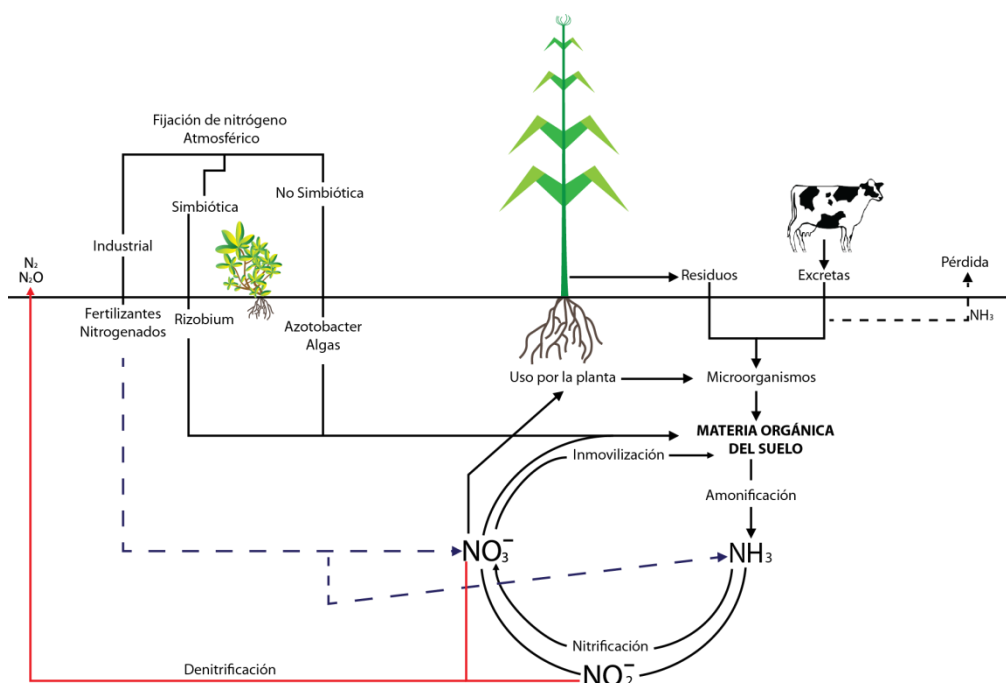


Figura 5. Ciclo del nitrógeno. Tomado de Mengel y Kirkby (2001).

En un estudio realizado por Ogunkunle y Awotoye (2011) en Nigeria, el contenido de nitrógeno fue mayor en el suelo bajo un sistema de reserva forestal intacto (95.42 ppm), en comparación con el presentado en un sistema agroforestal de *Teobroma cacao* asociado con *Cola nítida* (74.93 ppm) y por una plantación de *Tectona grandis* en monocultivo (46.12 ppm), lo cual evidencia un efecto positivo en la fertilidad del suelo, derivado de una mayor cobertura vegetal. Por otro lado Iwata *et al.* (2012) encontró una ligera variación en cuanto a los contenidos de N en un suelo forestal nativo (1.55 g kg^{-1}), un sistema agroforestal de 13 años de edad (2.25 g kg^{-1}), un sistema agroforestal de 6 años de edad (1.82 g kg^{-1}) y un manejo de corte y quema (1.82 g kg^{-1}), evidenciando que en ocasiones, la sola presencia de leñosas no genera un aumento en los porcentajes del elemento en el suelo; esto lo confirma Farfán (2010), que en cafetales bajo sombra de *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucaliptus grandis*, comparados con un cultivo de café en monocultivo, no encontró diferencias en los contenidos de nitrógeno a 30 cm de profundidad, los cuales fueron de (0.27, 0.29, 0.31 y 0.26%, respectivamente), del mismo modo no se observó ningún incremento del elemento en un periodo de 5 años (1995 – 2005) en ninguno de los tratamientos, aunque los valores se mantuvieron relativamente constantes.

2.4.2.6. Fósforo

Desde el punto de vista de la nutrición de las plantas, el fósforo puede clasificarse en fracciones de acuerdo a su accesibilidad para las mismas: El fosfato en el suelo en solución, el cual es completamente accesible, a pesar de ser solo una pequeña fracción del fósforo total; Y el fósforo virtualmente inaccesible (más del 90%) que está presente de forma insoluble y fijada; incluyendo minerales de fosfatos primarios, humus, P insoluble de Ca, Fe y Al, fósforo por óxidos hidratados y minerales de silicato; porción que puede ser descrita como no lábil, situación que favorece su reducida movilidad en el suelo. No obstante debido al crecimiento de las raíces de las plantas, que se extienden a través del suelo y entran en contacto con el fosfato en solución que posteriormente es absorbido, se produce un agotamiento de la concentración de fósforo en la vecindad de las raíces lo cual genera un gradiente entre la concentración del elemento en el área cercana a la raíz y el resto del suelo, regulando así las tasas de difusión de fosfato hacia las raíces de la planta (Mengel y Kirkby 2001).

El fósforo se localiza, entre muchos otros compuestos, en los fosfolípidos, que son derivados del ácido fosfoglicérico, que se encuentran ampliamente distribuidos en las plantas. Este grupo de compuestos presentan en su molécula, una parte hidrófila y una lipófila, característica que los capacita para actuar como eslabones en las estructuras lipófilas de la célula, participando activamente en la formación de membranas (Alcántar y Trejo, 2007)

La función del fosfato en el metabolismo, está en la formación de uniones de pirofosfato como facilitadores en la transferencia de energía. La Uridina trifosfato (UTP), la citidina trifosfato (CTP) y la guanosina trifosfato (GTP) son compuestos análogos del ATP. El ATP es requerido para la síntesis de glucanos incluyendo amilosa y amilopectina con ADP-glucosa como donante de glicosil. En una forma análoga la UTP es requerida para la síntesis de sacarosa, celulosa y calosa, con UPP-glucosa como donante de glicosil, mientras que CTP es necesaria para la síntesis de fosfolípidos. Todos estos nucleótidos trifosfatos (ATP, GTP, UTP y CTP) son también esenciales para la síntesis de ácidos nucleicos (DNA y RNA). El grupo fosfato en los ácidos nucleicos une a la ribosa o desoxirribosa con otra ribosa o desoxirribosa respectivamente. El ADN es contenedor de la información genética y la función del ARN en la síntesis de proteínas. Lo cual muestra el rol universal y esencial

del fosfato, no solo en las plantas sino también en todos los organismos vivos (Stevenson y Cole, 1999).

En la naturaleza, el fósforo del suelo es otorgado por la disolución de rocas fosfatadas, restos y deyecciones de plantas y animales, los fosfatos presentes en este, por medio de la erosión forman parte de los depósitos de fosfatos marinos, en donde a través de redes tróficas que involucran el consumo de fito y zooplancton por parte de los peces y el consumo de estos (ricos en fósforo) por aves marinas, quienes depositan el mineral por medio de sus excretas en las rocas en las que anidan. Los fosfatos del suelo a su vez son utilizados por las plantas, que son consumidas por animales, los cuales, como se mencionó anteriormente, aportan fósforo al suelo a través de sus residuos orgánicos, que son utilizados por los microorganismos e incorporan el elemento al suelo (Figura 6).

En sistemas agroforestales, la vegetación existente puede contribuir al incremento de la fracción del elemento en el suelo, gracias a los aportes de material orgánico por parte de cultivos, leñosas y animales presentes en el sistema, sin embargo, las plantas pueden realizar asociaciones con diferentes microorganismos, especialmente hongos micorrízicos, que facilitan la obtención del elemento por parte de las raíces. Por último, del mismo modo como se presentó anteriormente con el nitrógeno, las concentraciones de fósforo en el suelo pueden aumentar en función de una mayor cobertura vegetal, sin embargo puede presentarse el efecto contrario debido a la mayor demanda del elemento por parte de las especies vegetales componentes del sistema.

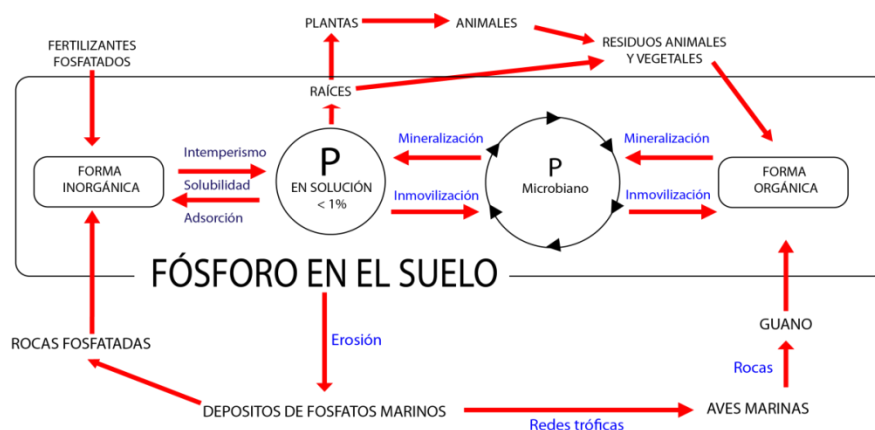


Figura 6. Ciclo del fósforo. Adaptado de Stevenson y Cole (1999).

La concentración de fósforo en el suelo bajo un sistema agroforestal varía en función de las especies que lo componen y el manejo realizado, lo cual repercute en una mayor o menor cantidad del elemento al momento de compararlo con un monocultivo. En un estudio realizado por Magalhães *et al.* (2013) en Brasil, específicamente en el estado de Rondônia, se evaluaron a 20 cm de profundidad, diferentes propiedades químicas del suelo, incluido el fósforo, bajo diferentes tipos de agroecosistemas obteniendo los siguientes resultados: 1) Bosque nativo (16.20 kg ha⁻¹); 2) SAF con *Tectona grandis* de 5 años de edad y pasto *Pueraria montana* (22.18 kg ha⁻¹); 3) SAF con *Tectona grandis* y *Shizolobium amazonicum* y *Pueraria montana* (164.69 kg ha⁻¹); 4) SAF con *Tectona grandis*, *Teobroma cacao* y *Brachiaria brizantha* (13.67 kg ha⁻¹); 5) SAF con *Tectona grandis* y *Teobroma cacao* (12.99 kg ha⁻¹); y 6) Pastura extensiva compuesta *Brachiaria brizantha* (21.23 kg ha⁻¹), evidenciando que si bien la presencia de árboles incide en un mayor contenido del elemento, una gran cantidad de especies incluidas en el sistema puede generar tasas de extracción elevadas que probablemente no se repongan mediante el aporte de biomasa, motivo por el cual la pastura extensiva presenta fracciones mayores que el bosque nativo y la Teca con cacao y pasto. Esto lo confirma Cardona y Sadeghian (2005) quienes encontraron un contenido de fósforo de 62 mg kg⁻¹ en un cafetal en monocultivo, el cual fue mayor al hallado en el cultivo de café bajo sombrío de *Inga sp.* que fue de 30 mg kg⁻¹.

2.4.2.7. Potasio

El potasio es el séptimo elemento más abundante de la tierra, encontrándose ampliamente distribuido en la corteza terrestre, a razón de 4 – 60 t ha⁻¹ en la capa arable de los suelos agrícolas, no obstante su mayor parte está en forma de minerales insolubles. Del 90 – 98% de este elemento se localiza en la estructura de varios minerales primarios y secundarios, los cuales mediante procesos de intemperización liberan potasio hidrosoluble e intercambiable que puede ser aprovechado por las plantas, no obstante su disponibilidad es tan baja que se conoce como potasio no aprovechable. Por otro lado, existe una fracción lentamente aprovechable, que representa del 1 – 10% del total contenido en el suelo que se encuentra en los espacios intermicelares de las arcillas tipo 2:1, como ilita, vermiculita y motmorillonita; mientras que del 1 – 2% se encuentra en una forma fácilmente aprovechable, constituida por el potasio hidrosoluble y el intercambiable, representando una mínima fracción del total, no obstante debido al equilibrio dinámico existente entre las

formas de potasio hidrosoluble, intercambiable y fijado, se pueden abastecer los requerimientos vegetales (si sus contenidos se mantienen constantes) (Alcántar y Trejo, 2007).

En las plantas, el potasio se absorbe en su forma iónica K^+ , es esencial y requerido en grandes cantidades para el crecimiento y reproducción, su importancia radica en la influencia que tiene sobre la calidad de los frutos y productos de los cultivos. Regula la apertura y cierre de estomas, además de ser activador de complejos enzimáticos (Mengel y Kirkby, 2001).

Contrario a lo esperado, Barreto *et al.* (2006) encontraron contenidos de potasio mayores en una pastura a plena exposición solar ($0.20 \text{ cmol dm}^{-3}$), en comparación con los registros obtenidos por una selva atlántica ($0.11 \text{ cmol dm}^{-3}$) y un SAF de Cacao ($0.12 \text{ cmol dm}^{-3}$). Resultados similares a los obtenidos por Cardona y Sadeghian (2005) quienes encontraron un contenido de potasio de $0.57 \text{ cmol kg}^{-1}$ en un SAF de café bajo sombra de *Inga sp.* el cual fue inferior al de café en monocultivo ($0.69 \text{ cmol kg}^{-1}$). No obstante en el trabajo efectuado por Magalhães *et al.* (2013) los mayores contenidos de K se presentaron en el bosque nativo (12.51 kg ha^{-1}), en comparación con el sistema que incluía Teca, cacao y pasto (4.68 kg ha^{-1}), sin embargo este fue menor al obtenido en la pastura en monocultivo (9.87 kg ha^{-1}).

2.4.3. Propiedades biológicas

El vasto grupo de microbios y animales que viven en el suelo, constituyen una red alimentaria, cuya función principal en el ecosistema es el reciclaje de la materia orgánica proveniente de los residuos otorgados por plantas y animales. Los miembros más numerosos y diversos del sistema son los microbios (hongos y bacterias), no obstante existen varias especies de animales de diferentes tamaños que viven en el suelo, incluyendo la microfauna ($< 0.1\text{mm}$; e.j. protozoos y nematodos), la mesofauna ($0.1 - 2.0 \text{ mm}$; e.j. microartrópodos), y la macrofauna ($> 2 \text{ mm}$; e.j. lombrices, termitas y cienpies). Esta fauna cruza un rango de niveles tróficos y en la red alimentaria cada categoría está localizada dentro de grupos funcionales basados en sus hábitos alimenticios (Bardgett, 2005).

De esta forma cada componente (raíces de las plantas, microorganismos y animales) de la biota del suelo, tienen diferentes dependencias en el ambiente del mismo para obtener su

energía y nutrientes. Las plantas y microbios fotoautotrófos obtienen su energía de la luz del sol, y también junto con aquellos que son quimioautotrófos, adquieren su carbón directamente de la atmósfera en forma de dióxido de carbono. Adicionalmente, diferentes organismos especializados y microorganismos asociados a las raíces son capaces de fijar en el suelo el nitrógeno atmosférico. Por último, el resto de la biota presente, obtiene su energía y nutrientes directamente de los recursos de suelo específicamente de minerales, materia orgánica u otros componentes de la biomasa viviente del suelo (Killham, 1994).

2.4.3.1. Actividad microbiana

El suelo desempeña un importante papel en el ciclo del C y puede representar una fuente importante de CO₂ y de otros gases invernadero de la atmósfera ya que la cantidad total de C que contiene el suelo es dos o tres veces superior a la del CO₂ atmosférico. En el suelo este gas se produce fundamentalmente a través del metabolismo de la microflora y de las raíces de las plantas, siendo la descomposición microbiana de compuestos orgánicos el proceso más importante que lo genera. Los flujos de CO₂ entre la atmósfera y el suelo cumplen una función clave en el funcionamiento global del C, por lo que la perturbación de los procesos que los regulan puede modificar la concentración del gas en la atmósfera, un ejemplo de esto se da con el cambio en el uso del suelo y su sobreexplotación, entre ellas, la deforestación y las labores agrícolas. El manejo intensivo del suelo altera considerablemente sus propiedades y condiciones ambientales, repercutiendo en la actividad de los microorganismos y por consiguiente la descomposición de la materia orgánica y dinámica del CO₂ del suelo (García *et al.*, 2003).

La actividad microbiana se mide mediante una metodología denominada respiración de suelo, que refleja el desprendimiento de CO₂, o el consumo de O₂ resultante del metabolismo de los microorganismos heterótrofos de suelo (bacterias, algas, hongos y protozoos) que tienen la propiedad de degradar la materia orgánica, para obtener la energía necesaria para su desarrollo a través de la descomposición de compuestos orgánicos tales como celulosa, proteínas, nucleótidos y compuestos humificados (Parkin *et al.*, 1996; García *et al.*, 2003).

Según Ramos y Zuñiga (2008) la actividad microbiana varía en función de diversos factores, como el uso del suelo, mineralogía, cobertura vegetal, prácticas de manejo,

calidad de los residuos que entran al sistema y factores ambientales como temperatura, pH, humedad y disponibilidad de oxígeno además de accesibilidad al sustrato y presencia de nutrientes inorgánicos (Jenkinson, 1992).

En los sistemas agroforestales, la presencia del árbol, es el principal factor que afecta la actividad microbiana, debido a la sombra ejercida y a la biomasa aportada, por tal motivo Álvarez y Anzueto (2004) evaluaron la actividad microbiana mediante la respiración de suelo en diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México, dentro de los cuales se encontraban barbecho largo (con la presencia de acahual arbóreo), barbecho corto (con la presencia de acahual arbustivo) en un esquema de año y vez, y cultivo anual continuo. Observando que la presencia de un componente arbóreo o arbustivo tiene una influencia positiva sobre el grado en que se da la actividad de los microorganismos ya que en las parcelas con barbecho largo y corto se registraron 0.23 y 0.16 mg C-CO₂ g⁻¹ respectivamente, mientras que en las zonas en las que se tenía maíz en cultivo anual continuo la respiración del suelo fue 0.14 C-CO₂ g⁻¹. En otro estudio llevado a cabo por Cardona y Sadeghian (2005b) en Caldas, Colombia, la actividad microbiana del suelo en un cafetal con sombrío de *Inga sp.* fue en promedio menor a la observada en monocultivo (1600 y 1700 mg CO₂ m⁻²h⁻¹.) evidenciando que la sola presencia del árbol no necesariamente incide en una mayor actividad, ya que en caso de generarse un sombreamiento excesivo, la temperatura del suelo puede reducir al punto de limitar el grado con el que los microorganismos actúan sobre la materia orgánica.

Para comparar la actividad microbiana influenciada por la presencia de árboles Notaro *et al.* (2014) evaluaron la actividad microbiana, mediante la respiración de suelo, en diferentes sistemas agroforestales del estado de Pernambuco, Brasil que constaban de cultivos de café bajo la sombra de especies maderables, un bosque nativo y cafetales en monocultivo, determinando que a 20 cm de profundidad el bosque presenta una mayor actividad de los microorganismos (53.8 mgC-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) en comparación al café con sombrío de *Inga cylindrica* (42.7 mgC-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), al sistema agroforestal de café con sombrío de *Musa paradisiaca*, *Anacardium occidentale*, *Leucaea leucocephala* y *Mimosa tenuiflora* (19.7 mgC-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹) y al café en monocultivo (17.8 mgC-CO₂ kg⁻¹ h⁻¹), demostrando así que no necesariamente, ante una mayor presencia de árboles, se obtiene una mayor actividad de los microorganismos ya que factores como la temperatura del suelo, son determinantes.

2.4.3.2. Mesofauna

La mesofauna está conformada por animales cuyo tamaño de cuerpo oscila entre 0.2 y 2.0 mm, dentro de los que se encuentran ácaros (Acari), colémbolos (Collembola), proturos (Protura), paurópodos (Pauropoda) y algunas larvas de especies de macrofauna que debido a su tamaño inicial pueden ser incluidas en este grupo. Actúan como transformadores de hojarasca y micropredadores, contribuyendo con procesos orgánicos de trituración a pequeña escala y como reguladores de la biota del suelo (Karyanto *et al.*, 2012).

Según Socarrás (2013) la mesofauna del suelo interviene en los procesos de descomposición de la materia orgánica, aceleración y reciclaje de nutrientes y en particular, la mineralización del fósforo y el nitrógeno. Los grupos que la integran son reguladores del proceso trófico del medio edáfico, al ayudar en la formación de su microestructura con sus aportes de deyecciones, excreciones, secreciones y con sus propios cadáveres. También facilitan la diseminación de esporas, hongos y otros microorganismos, por lo que son conocidos como catalizadores de la actividad microbiana, además de ser mejoradores de las propiedades físicas del suelo gracias a que las galerías que construyen en el medio incrementan la porosidad y por ende la aireación e infiltración del agua.

Desde una especie en particular hasta comunidades enteras y sus procesos biológicos, son indicadores de la calidad del suelo, ya que son sensibles a perturbaciones antropogénicas y a los cambios climáticos en escalas de tiempo relevantes para el manejo del suelo; factores que generan cambios en su composición específica y abundancia que pueden llevar a la pérdida de especies y su diversidad, influyendo negativamente en la estabilidad y fertilidad del suelo (Scheu, 2002, Socarrás y Rodríguez, 2007 y Socarrás e Izquierdo, 2014).

Los ácaros y los colémbolos son los invertebrados más relevantes de la mesofauna, ya que la pulverización del material orgánico realizada por sus piezas bucales expone un área superficial mayor y más susceptible a la actividad microbiana, la principal contribución de estos microartópodos al proceso de descomposición, es la promoción del crecimiento y distribución de microorganismos y el transporte de aquellos productos descompuestos hacia estratos inferiores y zonas radicales del perfil de suelo desempeñando, el papel más importante en el acarreo vertical de la materia orgánica (Cabrera y Crespo, 2001).

La presencia de leñosas en sistemas agroforestales, puede influenciar la presencia y diversidad de distintos organismos del suelo, tal y como fue observado por De Moraes *et al.* (2010) quienes en la Amazonia Brasileña, encontraron una mayor cantidad de individuos en un bosque secundario (29,776 individuos m²), en comparación con una pastura en monocultivo (11.232 individuos m²), la cual a su vez tuvo una mayor cantidad que los presentados por un sistema agroforestal (8,272 individuos m²), los grupos dominantes en el estudio fueron los pertenecientes a las familias Acari y Collembola, probablemente, debido a la gran capacidad que tienen de adaptarse a ambientes alterados, sin embargo su rol en el suelo sigue siendo de vital importancia, ya que este grupo de individuos de la mesofauna es importante a la hora de descomponer la materia orgánica presente. En otro estudio realizado en Bahía, Brasil, Pereira *et al.* (2012) encontraron una mayor cantidad de individuos en una parcela agroforestal con varias especies de árboles (maderables, frutales y maíz) (1,407 individuos m²) y en una plantación con *Artocarpus heterophyllus* (1,227 individuos m²) en comparación con los presentados en una plantación de eucalipto (199 individuos m²) evidenciando que además de la presencia de árboles, la diversidad y calidad de la biomasa influyen en la población de organismos.

2.4.4. Erosión

La erosión es un proceso de desprendimiento y arrastre de las partículas de suelo, causado por el agua, el viento y el hielo sobre condiciones de medio ambiente natural en términos de clima y vegetación, la cual es geológica cuando se produce sin perturbaciones provocadas por el hombre. Entre los factores que influyen la magnitud del proceso erosivo, están las lluvias, la infiltración, la topografía del terreno, la cobertura vegetal y la naturaleza del suelo (Bertoni y Lombardi, 2005; Grilo y Enami, 2008). Cuando la erosión es natural o geológica se manifiesta de forma muy lenta, siendo perceptible solamente con el pasar de largos periodos de actividad. Por el contrario la erosión antrópica o acelerada es la resultante de la ocupación inadecuada de suelos por actividades agrícolas o urbanas que aceleran e intensifican los procesos erosivos debido a las condiciones inducidas o modificadas por el hombre al suelo.

Los factores que controlan la erosión son: la naturaleza de las plantas de cobertura, la erosividad del agente erosivo y la pendiente presente (Morgan, 1995). La función de la

vegetación del suelo es la intercepción de las gotas de lluvia, ya que su energía cinética es absorbida por la planta, evitando que estas golpeen directamente el suelo; en este caso el pasto es considerado como la mejor protección en contra de la erosión causada por las salpicaduras y de aquella que es provocada por la escorrentía, esto se da, debido a que este otorga una cobertura densa cercana a la superficie. Los árboles también contribuyen con la disminución del daño causado por agentes erosivos, ya que además de proteger al suelo de precipitaciones intensas, una correcta sombra cubre a la vegetación baja de la radiación y reduce la pérdida de humedad edáfica causada por evaporación, lo cual, disminuye la intensidad con la que el viento puede desprender y arrastrar, partículas de suelo.

El tiempo más vulnerable para la erosión se tiene en la etapa temprana de la temporada de lluvias, cuando estas son altas pero la vegetación no ha crecido lo suficiente para proteger el suelo. Generando así el punto máximo de la erosión causada por este agente. La intensidad es en general considerada como la característica más importante de la lluvia, cuando se está calculando la erosión, la cual en las zonas semi-áridas y subhúmedas secas es considerada como bastante errática y en ocasiones se da con una intensidad muy alta (Stocking y Murnaghan, 2000).

A causa de la erosión, la estabilidad de los agregados puede decrecer, al igual que la distribución de los poros y la disponibilidad de agua para los microorganismos. De esta manera, todo lo que ha sido aceptado como una buena calidad de suelo se reduce cuando la erosión es intensa, lo cual tiene un impacto negativo sobre la productividad de los cultivos presentes, en especial cuando la fértil superficie del suelo se ha perdido (fracciones de humus y arcilla) dejando fracciones menos fértiles de arena, grava y en algunos casos roca (Lal, 1999). El hecho de que se pierda la fracción más fértil del suelo, hace de la erosión un proceso mucho más destructivo, ya que la pérdida de la materia orgánica, conlleva a una menor estabilidad de agregados, especialmente aquellos con una gran cantidad de limo, generando así una reducción de la infiltración y aireación del suelo y un incremento del escurrimiento, asociados a una pérdida de la macro y micro porosidad; fenómenos que favorecen el desencadenamiento de reacciones indeseadas, que incluyen la reducción del agua almacenada y un aumento significativo del efecto negativo de la erosión causada por el agua y el viento.

2.4.4.1. Erosión hídrica

La erosión hídrica se define como la remoción de partículas por acción del agua, la cual retira uniformemente pequeñas láminas de suelo. Como característica importante se destaca que se da un arrastre selectivo de las capas más finas y fértiles del mismo (Stocking y Murnaghan, 2000).

Según FAO (1985) la erosión del suelo depende de:

- La pendiente: aquellas que son más pronunciadas, están más expuestas a la erosión.
- La estructura del suelo: Suelos ligeros son más sensibles.
- El volumen o la tasa de flujo de agua: entre más rápido sea el flujo, se induce a una mayor erosión.

Existen tres tipos de erosión causada por el agua: Erosión causada por las gotas de lluvia, erosión laminar y erosión en cárcavas, las cuales en ocasiones se presentan de forma combinada. En la primera, las gotas de lluvia impactan la superficie del suelo provocando un desplazamiento de las partículas de su posición original, dejando a su paso cráteres o cavidades que varían su tamaño dependiendo de la intensidad con la que cae el agua (Blanco y Lal, 2008). Las señales que permiten identificar la segunda son: 1) sólo una delgada capa de la superficie del suelo es removida, o el subsuelo está expuesto en algunas partes, aunque en ocasiones también se expone la roca madre; 2) grandes cantidades de arena, grava y piedrecillas en la capa arable han sido removidas y 3) se presenta un depósito del material erosionado en el pie del talud. Cuando se tiene erosión de cárcavas se presenta una remoción del suelo por un flujo de agua muy concentrado, lo suficientemente grande como para formar canales o barrancos, originando la más obvia y dramática forma de erosión, el detonante de este fenómeno es la pérdida de la vegetación en áreas donde la micro-topografía resulta en flujos de corriente concentrada durante las lluvias (FAO, 1985; Campbell *et al.*, 1999).

La erosión por acción del agua es un fenómeno complejo de tres pasos que involucra, desprendimiento, transporte y deposición. El proceso se inicia cuando las gotas desprenden y liberan pequeñas partículas de suelo que generan marcas, que obstaculizan los microporos presentes y favorecen el escurrimiento y por ende el acarreo del suelo; las dos primeras fases determinan la cantidad de material erodado, mientras que la tercera define la distribución del mismo a lo largo del terreno. Los factores que controlan la erosión hídrica

son la precipitación, cobertura vegetal, topografía y propiedades físicas del suelo, quienes en conjunto establecen la magnitud y tasa del proceso degradativo (Blanco y Lal, 2008). El papel de la vegetación en la prevención de la erosión, es ampliamente reconocido, ya que la cobertura otorgada por las plantas incrementa la resistencia del suelo mediante la estabilización de la estructura, aumento de la materia orgánica y promoción de la actividad de la macro y microfauna edáficas, no obstante su efectividad, depende de las especies presentes, la densidad a la cual se encuentran, edad y patrones del área foliar y radicular.

Adicionalmente, la erosividad de la lluvia y el escurrimiento, son agentes que influyen en la pérdida y transporte del suelo. La primera se refiere a la capacidad intrínseca de la lluvia para causar erosión, ya que no todos los eventos de precipitación son erosivos, lo cual depende de la cantidad, intensidad, velocidad terminal y tamaño y distribución de las gotas de lluvia. Parámetros que afectan el potencial erosivo de cada evento pluvial. Por otro lado la erosividad del escurrimiento o flujo superficial se da solo cuando el agua aplicada que es absorbida por el suelo, llena completamente los poros y depresiones en la superficie, se ha almacenado en lugares de estancamiento y acumulado a una profundidad determinada, motivo por el cual, un suelo saturado, presenta mayores tasas de escurrimiento, que uno seco.

Al igual que la lluvia, la erosividad del escurrimiento es la habilidad que este tiene de causar erosión; ambos actúan de manera simultánea ya que las gotas de lluvia desprenden partículas, que son acarreadas por el agua llevando así a la pérdida del suelo, cuando se produce a tasas elevadas (Blanco y Lal, 2008).

La erodabilidad de un suelo es un atributo dinámico que cambia junto con sus características (Textura, estructura, materia orgánica y propiedades hidráulicas). Por lo tanto, un suelo arenoso es menos cohesivo que uno arcilloso y de la misma forma los agregados con elevados contenidos de arena son desprendidos de una manera más fácil, mientras que aquellos ricos en arcilla son más resistentes. No obstante altos contenidos de arena, favorecen la presencia de macroporos que generan una mejor infiltración ya que conducen el agua a una mayor velocidad que los microporos, abundantes en suelos arcillosos, por lo tanto, bajo lluvias de baja intensidad, un suelo arenoso produce menos escurrimiento.

La estructura también es un factor importante al momento de evaluar la resistencia a la erosión de un suelo, esta, es un término cualitativo que está relacionado con parámetros como infiltración de agua, permeabilidad del aire y materia orgánica, que influye en el proceso erosivo mediante la disposición del espacio poroso y forma, tamaño y estabilidad de agregados. Suelos con una estructura pobre son más desprendibles, inestables y susceptibles a la compactación, lo que causa una baja infiltración y mayores tasas de escurrimiento, debido a que presentan un menor número de macroporos, elevada densidad aparente y bajas tasas de infiltración, No obstante un manejo adecuado de la labranza y de los residuos de cosecha puede mejorar las condiciones estructurales y reducir el riesgo de pérdida de suelo por erosión hídrica. De hecho, la materia orgánica es un factor clave en el control de la estabilidad de los agregados ya que sus propiedades otorgan agentes aglutinantes al suelo y promueven procesos microbiológicos responsables de ligar partículas y transformarlas en agregados estables (Blanco y Lal, 2008).

Los sistemas agroforestales proporcionan una mayor cobertura vegetal sobre los terrenos de producción agropecuaria, la cual contribuye a disminuir la pérdida del suelo por erosión hídrica debido a la reducción de la fuerza con la que las gotas de lluvia impactan, desprenden y arrastran partículas. En la India, Gopinathan y Sreedharan (1987), observaron bajo una precipitación de 2,400 mm diferencias en la pérdida de suelo, bajo los siguientes tratamientos: *Eucalyptus sp.* y pasturas para la alimentación del ganado (6.77 g m^2); *Eucalyptus sp.* y plantas de *Manihot esculenta* dispuestas en 5 surcos entre los árboles (28.92 g m^2) y zona de barbecho sin cultivar (37.36 g m^2). En el Valle del Cauca, Colombia, Rodríguez *et al.* (2009), observaron bajo una precipitación de 2,600 mm una pérdida de suelo de 2.5 t ha^{-1} en un monocultivo de maíz, mientras que en bancos de proteína con *Trichantera gigantea* la erosión fue de 1.4 t ha^{-1} . No obstante, los registros de estos dos tratamientos fueron superiores a los obtenidos por una pastura de *Brachiaria decumbens* que presentó 0.2 t ha^{-1} ; evidenciando que la presencia de árboles puede reducir el grado con el que se presenta la escorrentía, aunque coberturas con pasturas pueden ser efectivas de la misma forma, lo cual permite inferir que una mezcla árbol pastura otorgaría una mejor protección del suelo.

En Veracruz, México Pérez *et al.* (2005), bajo una precipitación de 2,228 mm, en diferentes sistemas arreglos agroforestales de café a la sombra encontraron diferencias en cuanto a la pérdida de suelo, de la siguiente forma:

- SAF rusticano: 0.42 t ha⁻¹
- Policultivo Tradicional mejorado (PMT) con *Eupatorium moriflorun*: 0.41 t ha⁻¹.
- PMT con *Eupatorium moriflorun* y *Chamaedora elegans*: 1.05 t ha⁻¹.
- PMT con cobertura de *Canavalia ensiformis*: 1.95 t ha⁻¹.
- PMT con cobertura de *Arachis pintoii*: 2.02 t ha⁻¹.

El café en un SAF rusticano está compuesto por una gran variedad de vegetación, de la cual hacen parte gran cantidad de árboles de porte alto que contribuyen a la reducción de la pérdida de suelo por erosión hídrica, motivo por el cual en el estudio anterior, este presentó los menores registros de erosión.

2.5. Maíz (*Zea mays*)

El maíz es una planta alta, de ciclo biológico anual y crecimiento determinado. Sus hojas ubicadas una en frente de la otra, son largas y angostas (ancho aproximadamente de una décima parte de lo que mide el largo) que se insertan de modo alterno a lo largo de un tallo sólido. A diferencia de otras gramíneas, que producen flores bisexuales, el maíz desarrolla inflorescencias masculinas (espigas) que coronan a la planta en el ápice del tallo e inflorescencias femeninas (mazorcas), las cuales se ubican en el ápice de los primordios de las ramas laterales que emergen de las axilas foliares. La productividad elevada del maíz se debe principalmente a su considerable área foliar así como a la modificación de su ruta fotosintética conocida como el síndrome C₄ (Salvador, 2001).

Las plantas C₄ tienen la capacidad de alcanzar tasas fotosintéticas muy altas, a causa de la alta afinidad de la PEP carboxilasa por el CO₂ y de las reacciones en extremo exotérmicas de síntesis de PEP, motivo por el cual presentan mayor capacidad que las plantas C₃ de absorber CO₂ a partir de concentraciones bajas; de tal manera que pueden mantener sus procesos fotosintéticos aún con los estomas casi cerrados, representando una ventaja para las plantas que viven en climas secos y calientes. Otro aspecto importante radica en el hecho de que las C₄ requieren mucha más energía lumínica para fijar CO₂ en relación con

las C₃, por tal motivo utilizan una mayor cantidad de energía para generar ATP, para que actúe la piruvato fosfato dikinasa, no obstante esta energía demandada proviene de una fuente gratuita, la luz del sol, por lo cual, si se tiene la disponibilidad suficiente, el metabolismo C₄ otorga grandes ventajas (Bidwell, 1990).

En la producción del maíz la radiación solar es uno de los parámetros de extrema importancia ya que si esta no se presenta o es reducida en su calidad, el proceso fotosintético es inhibido y la planta no puede expresar su máximo potencial productivo, ya que gran parte de la materia seca del maíz, cerca del 90%, proviene de la fijación del CO₂, por medio de la ruta fotosintética C₄, y una reducción del 30 – 40% de la intensidad lumínica, por periodos prolongados, puede atrasar la maduración de los granos, o llegar a ocasionar caídas en la producción, ejemplo de esto se dio en una investigación realizada en Brasil en donde un grupo de maíz sembrado en octubre, tuvo una reducción en la productividad del 60% respecto a un grupo sembrado en marzo, lo cual fue atribuido al hecho de que el periodo de llenado de los granos del maíz sembrado en octubre ocurrió en enero, un mes que se caracterizó por un largo periodo de elevada nubosidad que causó una disminución en la radiación fotosintéticamente activa (Cruz *et al.*, 2006).

En México, la cultura de maíz se mantiene como una estrategia de sobrevivencia, ya que su cultivo se da principalmente en pequeñas parcelas familiares, que destinan la mayoría de la producción a su respectiva alimentación; no obstante existen nichos importantes de cultivo de híbridos altamente productivos ubicados especialmente en los estados de Jalisco y Sinaloa; que contrastan con los cultivos de la mayoría de la producción mexicana que se tienen en pequeñas poblaciones de polinización abierta, bajo esquemas de selección que buscan adaptarlos a la gran cantidad de microclimas que en donde los campesinos subsisten. Como consecuencia de lo anterior, en el país existe una alta biodiversidad genética que constituye un factor de gran importancia para el mejoramiento actual y futuro de los cultivares de la especie, ya que se tienen al menos 42 razas que integran 3 grupos raciales (Salvador, 2001).

México, cuenta con un arreglo agroforestal específico para el maíz, denominado MIAF (milpa intercalada con árboles frutales), el cual es quizá la asociación de árboles con maíz más importante del país, ya que está ampliamente difundido y gracias a sus características

logra integrar de manera agroecológica diversos componentes que en general permiten un desarrollo agrícola con un menor impacto negativo para el medio ambiente y mayores ingresos para los productores. Esto se debe a que el sistema MIAF es un sistema agroforestal intercalado, constituido por tres especies, el árbol frutal (epicultivo), el maíz (mesocultivo) y frijol u otra especie comestible, generalmente una leguminosa (sotocultivo) en intensa interacción agronómica y que tiene como propósitos, la producción de maíz y frijol como elementos estratégicos para garantizar la seguridad alimentaria de las familias rurales, incrementando o aumentando de manera significativa el ingreso neto familiar, gracias a la venta de productos de elevado valor económico como los frutales (SAGARPA, 2010).

2.6. Olivo (*Olea europaea*)

El olivo es una de las plantas cultivadas más antiguas, cuyos orígenes se remontan a unos 4,000 años antes de Cristo en la zona de palestina. Pertenecce a la familia *Oleaceae*, un grupo formado por árboles, arbustos y plantas trepadoras que comprende entre 20 a 29 géneros principales siendo *Olea europaea* la única especie con frutos comestibles. Es un árbol prennifolio con una altura que oscila entre 3 y ocho metros. La copa natural es redonda y posee hojas lanceoladas, coriáceas. (Romero, 2012). El cultivo del olivar ocupa una vasta diversidad de suelo, no obstante prefiere aquellos de texturas francas que suministran una aireación y permeabilidad adecuadas para el crecimiento radical, por otro lado, se desarrolla en suelos con un rango de pH de 5.5 hasta 8.5, demostrando su gran capacidad de adaptación. La especie se caracteriza por ser longeva y rustica, que en estado adulto desarrolla un potente y extenso sistema radical confinado principalmente al primer metro del suelo, que lateralmente excede el área de goteo y explora normalmente hasta unos 17 m³ (Barranco *et al.*, 2008).

El olivo, como el resto de las plantas, necesita dieciséis elementos esenciales para completar su ciclo vital: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio, azufre, hierro, manganeso, zinc, cobre, molibdeno, boro y cloro. La esencialidad de estos elementos se basa en que la planta no puede completar su ciclo vital sin ellos, que ningún elemento puede sustituir a otro y que el elemento debe ejercer su efecto sobre el crecimiento o el metabolismo. Los tres primeros (C, H y O) constituyen

aproximadamente el 95% del peso seco del olivo, pero no son objeto de fertilización pues el árbol los toma del CO₂ atmosférico y del agua del suelo, cuya combinación mediante la fotosíntesis forma los hidratos de carbono (Gómez, 2010). El cultivo de olivo se realiza esencialmente para la obtención de aceitunas, por tal motivo los requerimientos nutricionales están basados en las necesidades que tiene la especie para producir 1 kg de fruto; de esta forma Gómez (2010) y Pérez y Ortiz (2011) reportan que las extracciones de nitrógeno por la cosecha son bajas si se comparan con otros cultivos anuales, ya que los requerimientos están alrededor de los 4 -15 g de N kg⁻¹ de aceituna de tal manera que las fertilizaciones con este elemento no llegan a superar los 150kg ha⁻¹. Por el contrario, el potasio, es un elemento que se requiere en mayor cantidad para la producción de frutos (en el caso del olivo) el cual se extrae del suelo a razón de 4.5 – 25 g de K kg⁻¹ motivo por el cual se recomiendan fertilizaciones a razón de 1 kg/árbol. Por último, el fósforo a pesar de ser un elemento importante en la fertilización de cultivos anuales, no presenta un requerimiento elevado para los olivos que llega a extraer cifras entorno a los 0.7g de P/kg de fruto.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La Presente investigación fue desarrollada del 25 de marzo al 30 de octubre en un sistema agroforestal en callejones compuesto por árboles de olivo (*Olea europaea*) y maíz, ubicado en Texcoco, Estado de México, a 19°28'15.17" latitud Norte y 98°52'26.02" longitud oeste. El municipio se encuentra a una altura de 2,265 cuenta con una temperatura media de 15.9°C y una precipitación media anual de 650 mm y un clima que se caracteriza por ser templado semi-seco (Moreno, 2007). Fue seleccionado un predio de 6 hectáreas en el que se tienen árboles de olivo con una edad de 60 años (que ya no producen aceituna), bajo los cuales se siembra maíz criollo como cultivo principal, que en ocasiones se rota con frijol y avena a modo de sistema agroforestal; el predio también cuenta con una zona caracterizada por la ausencia total de árboles, en la que igualmente se siembra maíz en forma de monocultivo (Figura 7); el terreno en su totalidad recibe las mismas labores de manejo y los mismos tratamientos de fertilización, situación ideal para establecer el experimento y evaluar el efecto de los árboles sobre la producción de maíz, ya que sus rendimientos gracias a la homogeneidad del lugar y la cercanía de las zonas con y sin árboles, presenta condiciones similares que permiten inferir que las posibles diferencias en producción sean efecto de la presencia o no, de los árboles.



Figura 7. Vista aérea del terreno seleccionado en la que se muestran, la zona cubierta de árboles (en amarillo) y aquella con producción en monocultivo (en rojo).

Una vez seleccionado el terreno para el desarrollo de la investigación, fueron elegidos dentro del mismo dos lugares para el establecimiento de los dos tratamientos a evaluar: Sistema agroforestal (SAF) y Monocultivo (MC). Como condiciones para la selección de cada lugar, se tuvo en cuenta que ambos fueran similares en cuanto a pendiente (2°) y profundidad efectiva (30 cm), en el caso del tratamiento con árboles, se consideró una distribución homogénea de los mismos, y para el monocultivo fue tomada en cuenta, una distancia adecuada de los árboles para evitar un efecto de borde, y la posible influencia de los mismos. Definido esto, se establecieron los dos tratamientos, cada uno con tres repeticiones (Figura 8), bajo un diseño experimental completamente al azar.

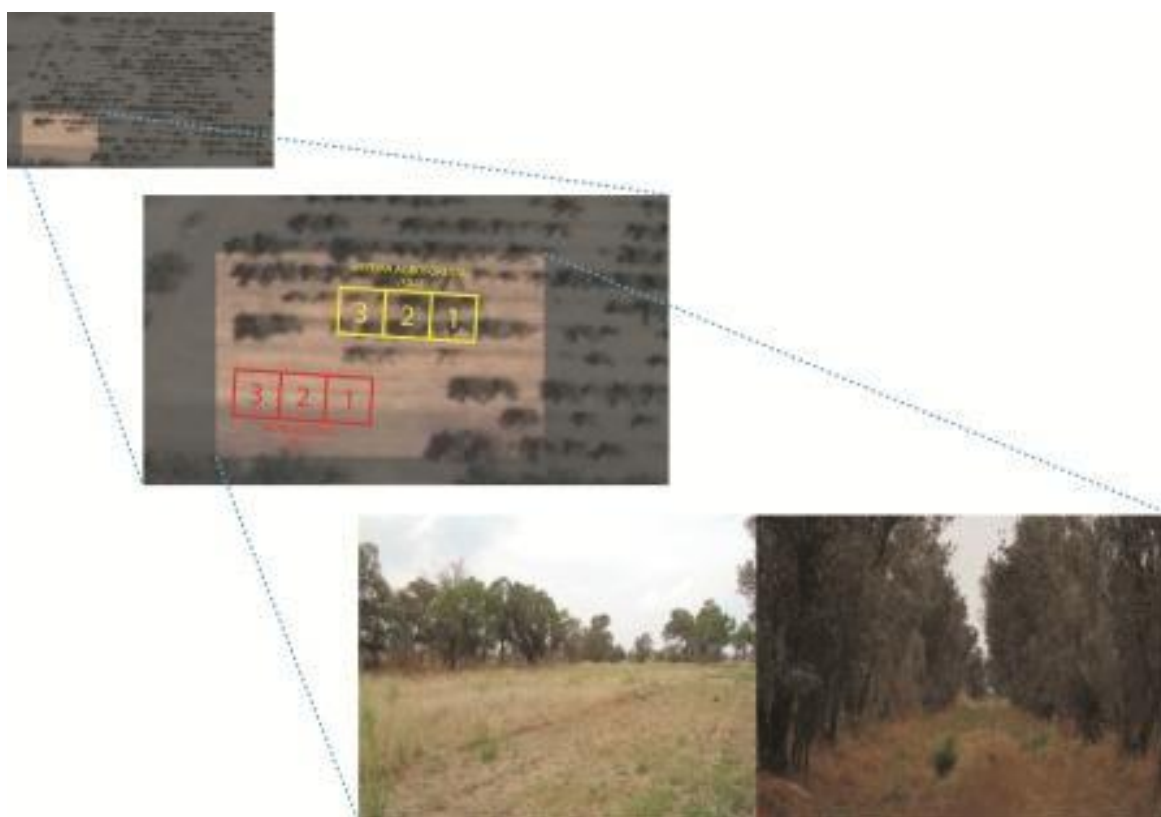


Figura 8. Selección de la zona para la instalación del estudio y distribución de los tratamientos, agroforestal (en amarillo) y monocultivo (rojo) con sus respectivas repeticiones.

El sistema agroforestal está caracterizado por filas de árboles, sembradas a una distancia de 8 x 8 m que dejan un callejón en el cual se instalan 7 surcos de maíz, sembrado a 80 cm, está dispuesto en una dirección norte-sur, motivo por el cual se genera una sombra permanente sobre el cultivo.

Como se mencionó anteriormente, todo el predio se manejó bajo las mismas labores agrícolas, las cuales constaron de una fertilización manual a razón de 92 kg ha⁻¹ de nitrógeno y 46 kg ha⁻¹ de P realizada el 7 de junio. Labores mecanizadas de labranza, que para el presente año se realizaron en las siguientes fechas: Barbecho (13 de mayo); Siembra (24 de mayo) y Aporque (7 de Junio). Y una aplicación manual de herbicida (HIERBAMINA[®]) realizada el 16 de junio.

Establecido esto, en cada tratamiento se ubicaron tres repeticiones compuestas por parcelas útiles de 16 m² (Figura 9), en las cuales se midieron diferentes variables para evaluar la influencia del sistema agroforestal sobre la fertilidad (propiedades físicas, químicas y biológicas), pérdida de suelo y producción de maíz. Adicionalmente se realizaron mediciones diarias de la precipitación y temperatura ambiente, bajo los árboles y en monocultivo.

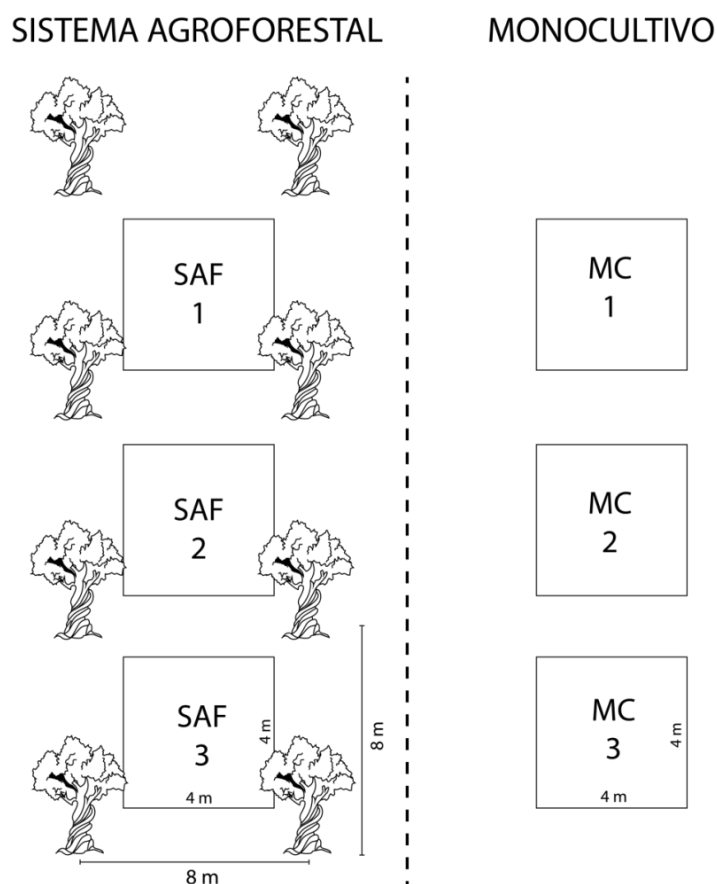


Figura 9. Organización de las repeticiones y parcelas útiles dentro de los tratamientos agroforestal y monocultivo.

3.1. Propiedades físicas del suelo

Del 25 al 31 de marzo, fueron realizadas las determinaciones de diferentes propiedades físicas del suelo, con el objetivo de caracterizar el sistema, estas fueron llevadas a cabo en el laboratorio de física de suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, bajo los estándares y metodologías de la norma oficial mexicana (Cuadro 2) NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). Por último, los registros de temperatura del suelo fueron obtenidos durante todo el tiempo de duración de la investigación (25 de marzo – 30 de octubre)

Cuadro 2. Metodologías utilizadas para las diferentes determinaciones de las propiedades físicas del suelo

Determinación	Metodología Utilizada
Densidad aparente	Parafina
Densidad real	Picnómetro
Capacidad de campo (CC)	Plato y membrana de presión
Punto de marchitez permanente (PMP)	Plato y membrana de presión
Conductividad hidráulica	Permeámetro de carga constante
Textura	Bouyoucos
Temperatura	Termómetro a 20 cm de profundidad

Adicionalmente, se realizó una determinación de la humedad volumétrica del suelo, mediante el uso de reflectometría de dominios de tiempo (TDR) específicamente con el uso de un TDR 300, del 7 de agosto al 4 de septiembre, con el fin de establecer la capacidad de conservación de agua en cada tratamiento, conforme al comportamiento de la precipitación.

3.2. Propiedades químicas

Se realizó una medición de los parámetros químicos del suelo, para caracterizar el sistema y establecer las condiciones nutrimentales disponibles para las plantas (Cuadro 3). Las determinaciones fueron realizadas en el mes de agosto en el laboratorio central de la

Universidad Autónoma Chapingo, bajo las metodologías establecidas por la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000).

Cuadro 3. Metodologías utilizadas para las diferentes determinaciones de las propiedades químicas del suelo

Determinación	Metodología Utilizada
pH	Potenciómetro
Materia orgánica	Walkley and Black
N total	Arrastre de vapor por Kjeldahl
Amonio	Oxidación con óxido de Mg y destilado por arrastre de vapor
Nitratos	Reducción con aleación de devarda y destilación por arrastre de vapor
P	Olsen
K	Extracción con acetato de amonio 1.0N y espectrofotometría de emisión de flama
Ca, Mg y CIC	Extracción con acetato de amonio 1.0N y espectrofotometría de absorción atómica
Fe, Cu,Zn y Mn	Extracción con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica.
B	Extracción con CaCl ₂ 1.0 M y determinado por fotolorimetría con AZOMETINA-H

3.3. Propiedades biológicas

El muestreo para la determinación de los indicadores biológicos fue realizado en tres ocasiones, 13 de mayo, 19 de agosto y 29 de octubre, con el objetivo de evaluar su comportamiento durante el periodo productivo del maíz. Para la presente investigación fueron elegidos como parámetros a evaluar, la actividad microbiana y la mesofauna.

La actividad microbiana se determinó mediante la técnica de respiración de suelo, propuesta por (Anderson, 1982), en la cual se mide la liberación de CO₂ (expresada en mg CO₂ kg⁻¹ de suelo), proveniente de la descomposición de la materia orgánica de los microorganismos presentes en el sistema.

La mesofauna se determinó mediante el método de Berlese modificado por Tullgren (Karyanto *et al.*, 2012) en el cual un foco de 60 W calienta 500 g de suelo tamizado por una maya de 2mm (tamaño máximo de la mesofauna) que se disponen en un embudo, provocando que los individuos presentes, desciendan hacia la punta del mismo, buscando zonas más frescas, para luego caer en un frasco con alcohol etílico al 70% (Figura 10). Los individuos obtenidos fueron cuantificados y clasificados, estableciendo así el número y tipo de organismos presentes por m².



Figura 10. Montaje del método Berlese modificado por Tullgren para la extracción de la mesofauna del suelo.

3.4. Escurrimiento y pérdida de suelo

Para determinar el escurrimiento y la pérdida de suelo, fueron establecidas parcelas de 16 m² (área útil de cada repetición), que captaban el agua de esorrentía en tinas cúbicas de 144 L de capacidad, a su vez, las parcelas contaban con un bordo de 15 cm de alto, cubierto con plástico para delimitar las parcelas y mantener dentro el agua captada, y que no entrara aquella que caía fuera (Figura 11). Diariamente (del 30 de junio al 5 de septiembre), fue revisado el pluviómetro para registrar la precipitación y con cada evento pluvial se observaba la presencia o no, de agua escurrida captada en las tinas. Cuando la precipitación causaba escurrimiento, se registraba la lámina de agua captada y se tomaba una muestra de 110 ml para cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica.



Figura 11. Parcelas establecidas para la determinación del escurrimiento y la pérdida de suelo por erosión hídrica.

Con cada lámina captada se calculó el escurrimiento expresado en $m^3.ha^{-1}$, utilizando la siguiente formula:

$$Esgurrimiento (m^3 ha^{-1}) = \frac{V \cdot 10,000m^2}{AP}$$

Dónde:

- V= Volumen presente en la tina en m^3
- AP=Área de la parcela de escurrimiento en m^2

Cada muestra de agua con sedimento recolectada, fue filtrada y secada en laboratorio para establecer la cantidad de suelo erosionado por parcela y por ende la pérdida de suelo por hectárea, expresada en $kg.ha^{-1}$, usando la siguiente fórmula:

$$Pérdida de suelo (kg ha^{-1}) = \left(\frac{V \cdot PS \cdot 10,000m^2}{MA \cdot AP} \right) \div 1000$$

Dónde:

- V= Volumen presente en la tina en ml.
- AP=Área de la parcela de escurrimiento en m^2 .
- PS=Peso del suelo seco en g.
- MA=Volumen de agua recolectado en la muestra en ml.

3.5. Desarrollo y producción del maíz

Para determinar la influencia de la presencia de los árboles sobre el desarrollo y producción de las plantas de maíz, se registró semanalmente la altura de 20 plantas seleccionadas al azar dentro de cada parcela útil a partir de la quinta semana de edad, cuando presentaban una altura promedio de 42 cm, hasta que se dio la floración en el 100% de las plantas de cada tratamiento. Posteriormente, cuando el grano estaba completamente seco, se cuantificó la producción del total de plantas presentes en cada parcela útil (16 m²). Las mazorcas recolectadas fueron desgranadas y secadas a la intemperie, durante 6 días, para después pesar la producción de grano de cada repetición, la cual fue extrapolada a kg de grano ha⁻¹.

3.6. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados con el software estadístico SAS 9.1 mediante análisis de varianza de un factor (ANOVA) y pruebas de tukey para determinar diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Adicionalmente, con el uso del mismo software, se realizaron pruebas de correlación entre la precipitación y el escurrimiento, precipitación y pérdida de suelo y escurrimiento y pérdida de suelo, para los dos tratamientos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades físicas

A pesar de la cercanía de los dos tratamientos y de la aparente homogeneidad del terreno y condiciones edáficas que a través de los resultados evidenciaron similitudes en cuanto a la densidad real y aparente, la presencia de árboles ha incidido en la modificación de características estructurales del suelo al punto de tener diferencias significativas ($p < 0.05$) en determinaciones como CC, PMP, conductividad hidráulica y humedad aprovechable (Cuadro 4). Las cuales fueron definitivas al momento de hacer una valoración de la calidad de los suelos, ya que modificaron el comportamiento de agua en el sistema y su disponibilidad para las plantas.

Cuadro 4. Propiedades físicas del suelo perteneciente al sistema agroforestal (SAF) y monocultivo (MC) a 20 cm de profundidad.

PARÁMETRO	SAF	MC
Textura	Arenosa francosa	Franco arenosa
Capacidad de campo (%)	15.00 b ^z	20.6 a
Punto de marchitez permanente (%)	7.76 b	9.88 a
Conductividad hidráulica (cm h ⁻¹)	1.44 a	0.51 b
Densidad aparente (g cm ⁻³)	1.41 a	1.40 a
Densidad real (g cm ⁻³)	2.60 a	2.63 a
Humedad Aprovechable (%)	7.24 b	10.75 a

^z valores sobre cada renglón con diferentes letras son diferentes ($p < 0.05$) mediante la prueba de Tukey.

El suelo presente en el sistema agroforestal presentó una textura arenosa francosa, y el perteneciente al monocultivo una franco arenosa, evidenciando una diferencia en los dos

tratamientos, no obstante, estas clases texturales son vecinas y ambos sistemas clasifican en áreas muy cercanas del triángulo (Figura 12), motivo por el cual las diferencias observadas respecto a la capacidad de retención de agua expresada en CC y PMP, así como en la conductividad hidráulica pueden generarse de manera indirecta por la presencia de los árboles de olivo, además de las diferencias texturales.

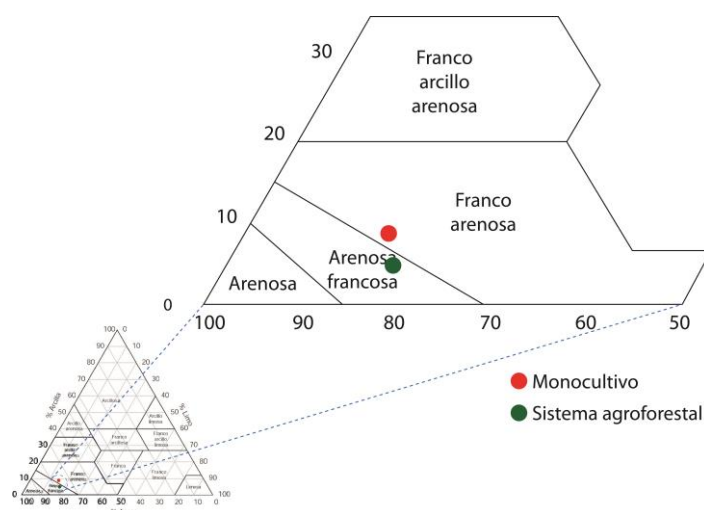


Figura 12. Ubicación de las clases texturales presentes en los tratamientos SAF y MC, dentro del triángulo de texturas

Como se mencionó anteriormente, un mayor aporte de materia orgánica al suelo, puede influir en un mejoramiento de su condiciones estructurales (Nair, 1993), no obstante al observar los resultados del análisis químico, no se encontraron diferencias importantes en los contenidos de este parámetro en los dos tratamientos, lo cual se confirma al estudiar los registros de densidad real y aparente, que son similares tanto en el SAF como en el MC, lo cual permite deducir que las diferencias en cuanto al comportamiento en el flujo y conservación del agua no se dan por un mayor aporte de materia orgánica por parte de los árboles y que son otros factores los que condicionan esta situación. Al analizar los mayores registros de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, se observó, mediante un gráfico de retención de humedad, que el sistema agroforestal presentó una menor fuerza de retención de agua respecto al monocultivo a medida que se aumentó la presión (Figura 13). Lo cual coincide con la mayor velocidad de infiltración que posee el suelo bajo la presencia

de árboles, situación que puede ser favorable para prevenir el escurrimiento ante la presencia de lluvias intensas, pero que resultaría en un riesgo para el sostenimiento de la producción vegetal, si la precipitación fuera escasa.

Dado lo anterior, y al observar la dinámica de los resultados obtenidos, es evidente una influencia de los árboles sobre condiciones estructurales del suelo que inciden en las diferencias percibidas en cuanto al comportamiento del flujo de agua dentro del sistema, al no poder atribuirse a un mayor aporte de materia, orgánica es necesario encontrar factores condicionados por las leñosas perennes que otorguen una explicación al fenómeno observado.

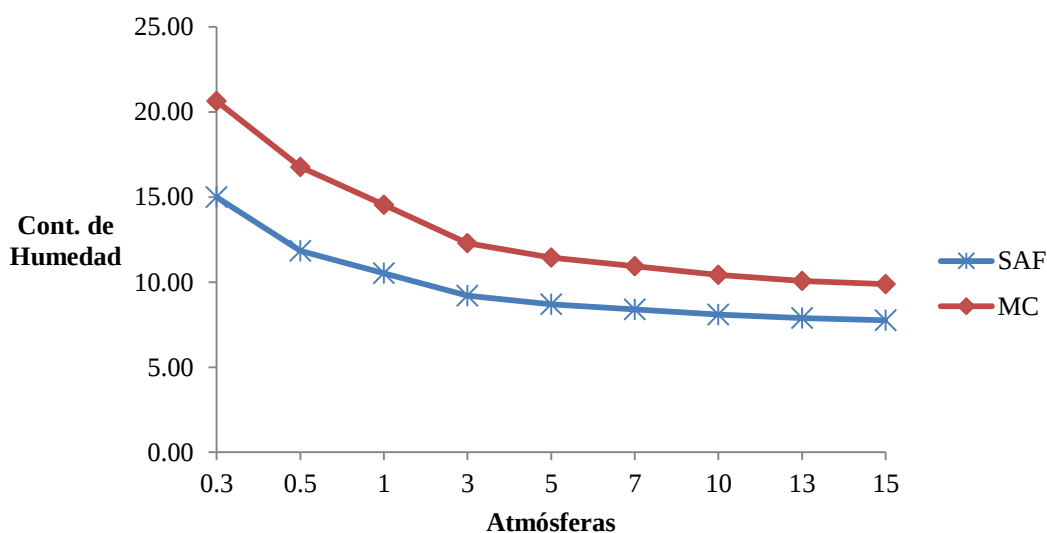


Figura 13. Curva de retención de humedad del suelo bajo los tratamientos SAF y MC.

Según de la Rosa (2008), suelos con similar densidad real y aparente, presentan valores cercanos de porosidad, no obstante, la distribución de macro y micro poros, puede variar, para cada uno, en donde aquel con una mayor proporción de espacios de gran tamaño incide en una mayor velocidad de infiltración y en una menor capacidad de retención de agua. Por este motivo se realizaron mediciones de la relación entre la macro y microporosidad para los dos tratamientos, en estas, se observó que el suelo bajo la influencia de árboles de olivo cuenta con una presencia significativamente mayor de macroporos en relación al monocultivo, situación que explica la menor capacidad de retención de agua del sistema agroforestal (Cuadro 5).

Cuadro 5. Relación de macro y micro poros en el suelo bajo los tratamientos SAF y MC

TRATAMIENTO	Porosidad (%)	Macroporosidad (%)	Microporosidad (%)
Sistema agroforestal SAF	45.50 a ^z	53.04 a	46.95 b
Monocultivo MC	46.88 a	38.15 b	61.84 a

^z valores sobre cada columna con diferentes letras son diferentes ($p < 0.05$) mediante la prueba de Tukey.

La porosidad del suelo puede ser mantenida, mediante el aumento de la cobertura vegetal, la cual protege al sistema de la disrupción, que causa el impacto de las gotas de la lluvia, mediante la anulación o disminución de su capacidad para desintegrar los agregados del suelo y separar las partículas finas, generando así, una escasa o nula obstrucción de poros en la superficie del suelo (Shaxson y Barber, 2005). De igual manera estos autores también reportan que las raíces de los árboles o cultivos de cobertura actúan como subsoladores biológicos que penetran los diferentes horizontes, generando) canales más estables que los formados por medios mecánicos, ya que las raíces liberan sustancias orgánicas que estabilizan la superficie de los mismos. Una vez que las raíces han muerto y se han contraído, dichos poros serán lo suficientemente grandes y estables como para facilitar la infiltración del agua.

Algunos estudios han demostrado el efecto positivo de la presencia de los árboles sobre la condición estructural de los suelos, beneficio que se deriva principalmente del aporte de materia orgánica, la protección por medio del dosel y el desarrollo radicular. Melloni *et al.* (2008), registraron en un estudio realizado en Minas Gerais, Brasil, un valor de densidad aparente en un suelo cubierto por un Bosque típico de la Mata Atlántica brasilera de 0.94 kg dm³, el cual fue menor que los registrados por una plantación de *A. angustifolia*, una plantación de *Eucalyptus grandis* y una pastura en monocultivo de *Brachiaria decumbens*, que presentaron valores de 1.25, 1.06 y 1.36 kg dm³, respectivamente. Adicionalmente, la Mata atlántica obtuvo un porcentaje de macroporosidad del 34.31%, el cual fue significativamente mayor al obtenido por el tratamiento sin árboles (*B. decumbens*) que

registró un valor de 13.53%. En otro estudio Guariz *et al.* (2009) encontraron menores valores de densidad aparente en el suelo de un bosque con nivel primario de regeneración (1.35 g cm^3), en comparación con el obtenido en una pastura de *Brachiaria decumbens*, el cual fue de 1.47 g cm^3 , demostrando así un efecto positivo en presencia de una mayor cantidad de árboles, Murray *et al.* (2014) determinaron en un suelo agroforestal de Nayarit, México que la presencia de diferentes tipos de árboles maderables, mediante el aporte de biomasa, puede generar un mejoramiento en la calidad estructural de los suelos, ya que observaron un cambio entre los años 2005 y 2012 de los registros de M.O (0.51 – 3.86%), densidad aparente ($1.43 - 1.19 \text{ g cm}^3$) y porosidad total (45.1 – 58.8%), los cuales permitieron un aumento en la CC del suelo, en el mismo periodo de 24.3 – 36.0%. Demostrando así que la presencia de árboles, debido a la influencia sobre diferentes condiciones estructurales del suelo, pueden modificar el comportamiento del flujo de agua dentro del sistema.

Continuando con las propiedades físicas del suelo evaluadas, se sabe que la temperatura del suelo, depende directamente de la temperatura ambiente, y como se mencionó antes, la presencia de los árboles es capaz de generar un microclima bajo su dosel que puede influir el grado con el que el suelo gana o pierde calor; en el presente estudio, los registros más altos de temperatura ambiente y temperatura del suelo para el monocultivo fueron 35 y 28°C respectivamente, mientras que el sistema agroforestal presentó temperaturas ambientales y edáficas máximas de 33 y 28°C, lo que permite inferir que la sombra generada por las leñosas perennes incidió directamente sobre el calentamiento del suelo a 20 cm de profundidad; al momento de agrupar las determinaciones de temperatura, en promedios semanales, se observó un comportamiento similar en las variaciones de la misma para los dos tratamientos; sin embargo el SAF nunca sobrepasó los registros del monocultivo, especialmente a las 14:00, horas ya que en la mañana (9:00 horas) la temperatura, tanto ambiental como edáfica es similar (Figura 14).

Un cultivo de maíz representa por sí mismo, sin la presencia de árboles, un filtro adecuado para la luz solar que incide directamente sobre el suelo, en especial cuando el cultivo está maduro, puesto que el tamaño de sus hojas y la amplia densidad de siembra, hacen que se genere una sombra permanente sobre el suelo que impide un aumento drástico de la temperatura del mismo, lo cual es comprobado por Oliveira *et al.* (2005), quienes

compararon la temperatura del suelo bajo un cultivo de maíz con un suelo cubierto por *Stizolobium spp.* y uno sin vegetación, en donde encontraron que a 7.5 cm de profundidad, en el cultivo de maíz la temperatura a las 16:30 horas era significativamente inferior a la del tratamiento sin cobertura y similar a la del cultivo de *Stizolobium spp.* (26.4, 31.0 y 24.7°C respectivamente). En otro estudio realizado por de Rossi *et al.* (2007) se demostró que la temperatura de un suelo a 5 cm de profundidad en un sistema agroforestal de árboles de manzana en asociación con *Avena strigosa* fue significativamente afectada en comparación con el pomar sin cultivo asociado, el cual presentó una temperatura del suelo cercana a los 25°C, mientras que en el SAF fue de 21°C.

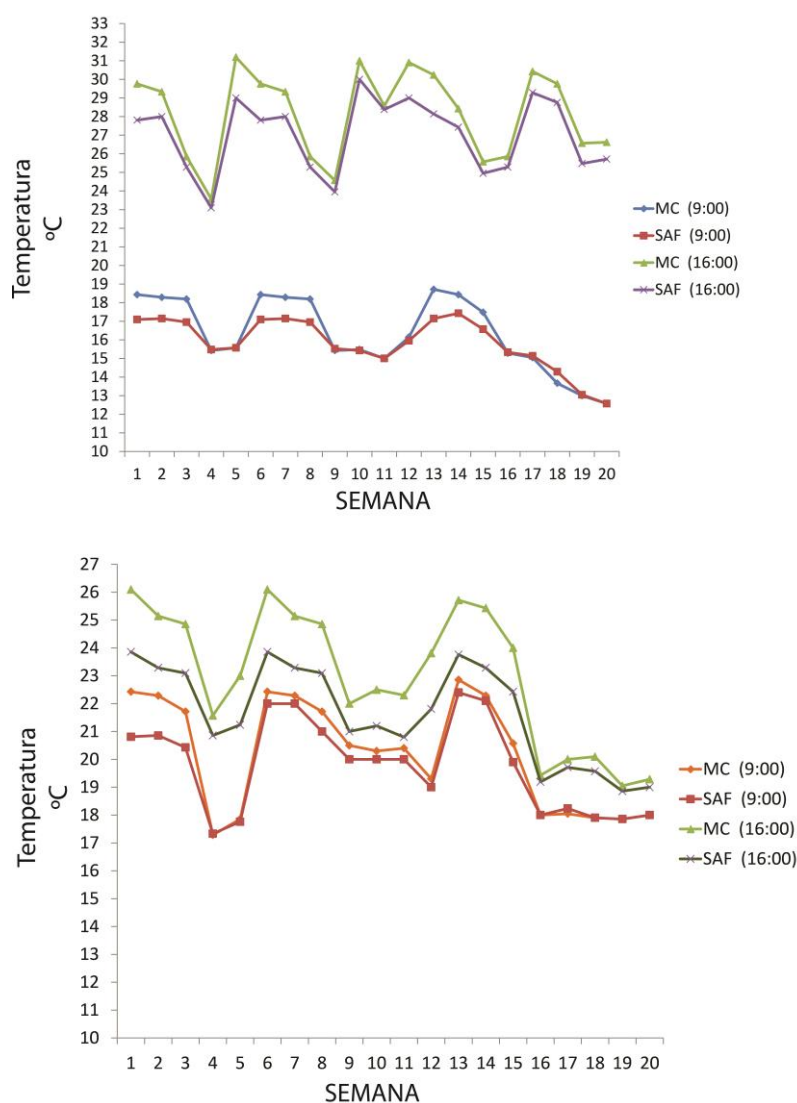


Figura 14. Temperatura ambiental (arriba) y edáfica (abajo) registradas por los sistemas agroforestal y monocultivo.

Los resultados obtenidos por los diferentes investigadores descritos, son similares a los registrados en la presente investigación, estos, comprueban lo mencionado por Wang *et al.* (2012), quienes reportan que la temperatura edáfica está ampliamente influenciada por el índice de área foliar de la vegetación existente. Por lo tanto esta cobertura, debe ser tomada en cuenta al momento de analizar la humedad del suelo ya que este control sobre la temperatura incide directamente en su pérdida o conservación.

Al momento de observar el comportamiento de las propiedades hídricas de los diferentes tratamientos, fue fácil establecer que el monocultivo presentó una mayor capacidad de conservación del agua, sin embargo, la ciencia agroforestal exige la realización de análisis más profundos, que incluyan el comportamiento de diferentes variables bajo condiciones de campo, en donde sea posible evaluar *in situ* la influencia de los árboles en relación sistemática con el suelo; por este motivo, durante un mes fue evaluada la humedad volumétrica del mismo en los dos tratamientos, determinación que permitió observar una menor pérdida de agua en el SAF, condicionada principalmente por la menor temperatura ambiental y edáfica presente en este tratamiento (Figura 15), en esta se puede notar que ante una recarga del sistema mediada por la precipitación, el contenido de humedad en el SAF y MC fue similar, no obstante, cuando la precipitación disminuyó, la sombra generada por los árboles, evitó que el agua del suelo se perdiera con mayor velocidad en relación al monocultivo, favoreciendo así, una mayor conservación y disponibilidad de la misma para las plantas.

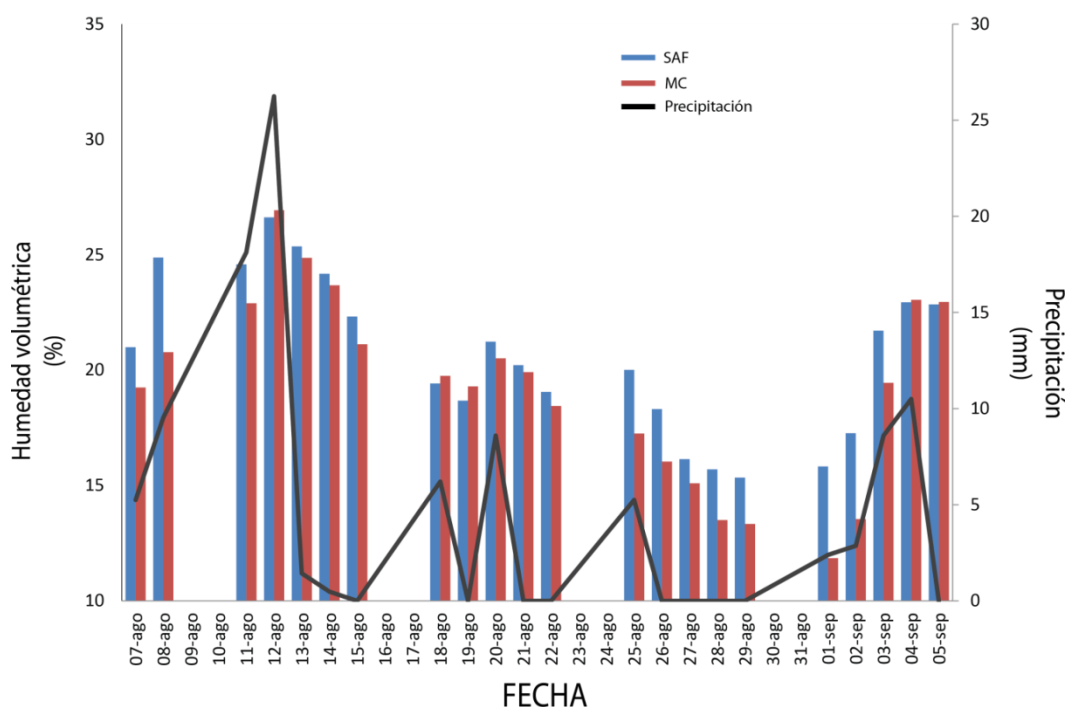


Figura 15. Humedad volumétrica del suelo registrada para los tratamientos SAF y MC en relación a la precipitación.

Al agrupar la humedad del suelo registrada, en promedios semanales, se encontraron diferencias significativas en la primera y última semana, influenciadas por la precipitación (Figura 16), ya que una semana antes de iniciar con las respectivas mediciones, esta fue 12.40 mm lo que favoreció una mayor pérdida de agua en el MC, motivo por el cual en la gráfica anterior, para los días 7 y 8 de agosto se observa un mayor porcentaje de humedad volumétrica en el SAF. Posteriormente, debido a la lluvia registrada, no se observaron diferencias, salvo en la última semana, que fue precedida por 6 días sin eventos pluviales (del 26 – 31 de agosto).

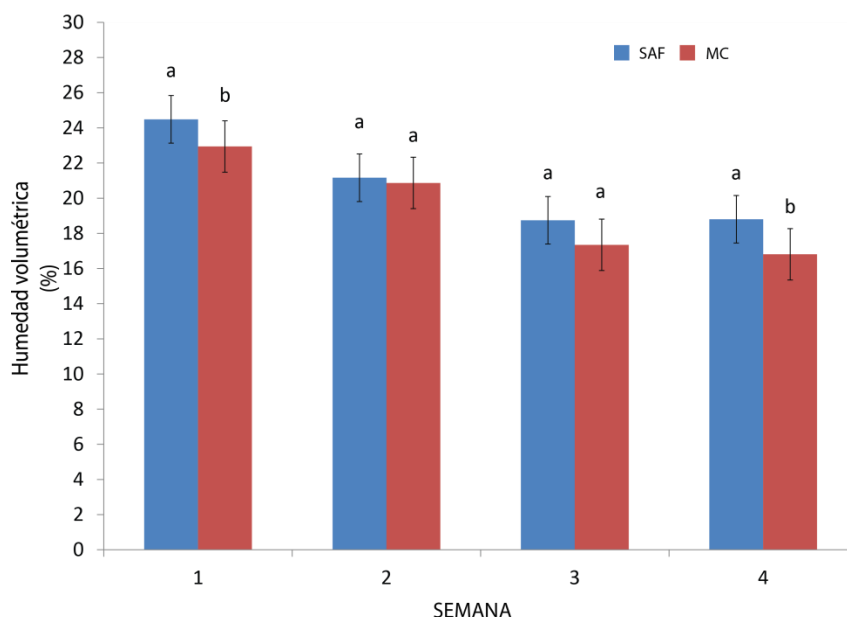


Figura 16. Promedios semanales de humedad volumétrica registrados en los tratamientos SAF y MC. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$) mediante la prueba de Tukey.

Estos datos coinciden con los obtenidos por Matoso *et al.* (2007) quienes encontraron en un cultivo de café a la sombra de diversos árboles maderables, un contenido de humedad que desde el mes de mayo al mes de septiembre de 1999 se mantuvo entre de 0.5 a 2% superior, en relación al café en monocultivo, a una profundidad de 20- 40 cm, evidenciando una elevada conservación de la humedad cuando el suelo se encontró bajo la sombra de una mayor cobertura vegetal, incluso en cultivos que debido a las características morfológicas de las plantas, contribuyen con una mayor conservación de la humedad, esto lo comprueban Oliveira *et al.* (2005) en un estudio en el que los contenidos de agua en un monocultivo de maíz a 7.5 cm de profundidad, fueron menores (35%) a los de un suelo con un desarrollo de vegetación espontanea (37.5) la cual poseía un mayor índice de área foliar. Por otro lado, en Colombia Cardona y Sadeghian (2005) desarrollaron un estudio en ocho localidades, de producción de café a la sombra de *Inga sp.* y en monocultivo en donde evidenciaron que en ocasiones, la sola presencia de árboles no incide en un mayor contenido de agua en el suelo ya que en tres de estas, el suelo presente en el café a plena exposición solar mostró mayores registros de humedad volumétrica; no obstante, estos en ningún momento fueron estadísticamente superiores, contrario a las localidades en las que el contenido de humedad

fue mayor bajo la sombra de los árboles, en donde, en 3 de estas se presentaron diferencias significativas en relación al monocultivo.

4.2. Propiedades químicas

El análisis de las propiedades químicas del suelo fue realizado con el objetivo de caracterizar el sistema en cuanto a su condición nutrimental en los dos tratamientos, a fin de establecer diferencias que pudieran afectar tanto las propiedades físicas y biológicas del suelo, así como la producción de maíz. Según los resultados obtenidos tanto el SAF como el MC presentaron contenidos similares (sin diferencia estadística) en el total de parámetros evaluados (Cuadro 6), destaca que a pesar de la presencia de árboles el porcentaje de materia orgánica fue similar en los dos tratamientos, lo cual indica que los olivos no aportan la suficiente biomasa, como para incrementar su contenido en el suelo, por ende los nutrientes incluidos en la evaluación no evidenciaron diferencias significativas.

Cuadro 6. Propiedades químicas del suelo perteneciente al sistema agroforestal (SAF) y monocultivo (MC) a 20 cm de profundidad.

Parámetro	Tratamiento		Parámetro	Tratamiento	
	SAF	MC		SAF	MC
pH	7.33 a ^z	7.62 a	Cu (mg kg⁻¹)	1.40 a	1.54 a
Materia Orgánica (%)	1.25 a	1.20 a	Fe (mg kg⁻¹)	10.99 a	16.31 a
Fósforo (mg kg⁻¹)	18.67 a	20.96 a	Zn (mg kg⁻¹)	1.4 a	2.0 a
Potasio (mg kg⁻¹)	567.3 a	416.0 a	Mn (mg kg⁻¹)	5.4 b	7.74 a
Amonio (mg kg⁻¹)	8.20 a	9.10 a	B (mg kg⁻¹)	0.90 a	1.24 a
Nitratos (mg kg⁻¹)	11.30 a	8.33 a			
Nitrógeno total	0.070 a	0.066 a			
CIC (Cmol₍₊₎Kg⁻¹)	13.56 a	14.16 a			

^z valores sobre cada renglón con diferentes letras son diferentes (p<0.05) mediante la prueba de Tukey.

A pesar de la no significancia estadística de la mayoría de los nutrientes, algunos como el amonio, fósforo, zinc, hierro y boro presentaron un mayor contenido en el monocultivo, mientras que el manganeso fue estadísticamente superior en el monocultivo, lo anterior explica porque el olivo no es una especie demandante de una gran cantidad de nutrientes, su presencia durante todo el año genera una extracción de los mismos en épocas en las que el monocultivo está inactivo, motivo por el que es necesario establecer dosis de fertilización que tengan en cuenta la presencia de la leñosa para evitar una reducción drástica de la fertilidad del suelo, en especial en sistemas que cuenten con la presencia de árboles como el olivo, que como se mencionó anteriormente no aportan grandes cantidades de biomasa al suelo; aunque es importante anotar que este aporte contribuye con un mantenimiento de la fertilidad química ya que el sistema soporta la presencia del árbol sin verse reducidos drásticamente los contenidos de cada nutriente en el suelo, en comparación con el monocultivo.

En diferentes sistemas agroforestales evaluados, la presencia de árboles no ha sido causante de una mayor concentración de nutrientes en el suelo, ejemplo de esto lo otorgan Ávila *et al.* (2004), quienes en un sistema agroforestal de *Eucalyptus deglupta* asociado con café, en Costa Rica, evidenciaron un menor contenido de nitratos ($68 \text{ kgNO}_3 \text{ ha}^{-1}$) en comparación con un cafetal en monocultivo ($115 \text{ kgNO}_3 \text{ ha}^{-1}$) indicando que los árboles reducen la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de café; en otro estudio Barreto *et al.* (2006) encontraron mayores contenidos de potasio en una pastura en monocultivo ($0.20 \text{ cmol dm}^{-3}$), en comparación con un SAF de cacao asociado con árboles maderables ($0.12 \text{ cmol dm}^{-3}$); por último en un estudio realizado por Bertalot *et al.* (2014) no se encontraron diferencias significativas en la fertilidad de un SAF compuesto por árboles de *Leucaena diversifolia* y maíz en comparación con un monocultivo de maíz, en este estudio el análisis nutrimental determinó lo siguiente: un pH idéntico en los tratamientos (5.2); materia orgánica de 17 y 16% para el SAF y MC respectivamente; Contenido de Fosforo de 17 y 14 mg dm^{-3} en el mismo orden y por último, una concentración de potasio similar en los dos tratamientos SAF ($0.4 \text{ mmolc dm}^{-3}$) y MC ($0.3 \text{ mmolc dm}^{-3}$).

Los resultados anteriores evidencian que no necesariamente, la presencia de árboles conduce a una mayor fertilidad del suelo a causa del reciclaje de nutrientes y los aportes de biomasa, ya que estos, son un organismo vivo que demanda recursos, tales como

nutrimentos, agua y luz; por lo cual es necesario incluir en la planificación agroforestal dosis de fertilización, química u orgánica que tenga en cuenta tanto las necesidades del cultivo como de las leñosas.

4.3. Propiedades biológicas

La actividad microbiana es determinante al momento de la descomposición de la materia orgánica que cae al suelo, por lo tanto, un suelo con mayor presencia y acción por parte de los microorganismos puede repercutir en una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas. En el presente trabajo, fueron realizadas tres mediciones de este indicador, para determinar su comportamiento a través del ciclo productivo del maíz. En estas, se pudo observar una tendencia hacia una mayor actividad expresada en mg kg de CO₂, en el sistema agroforestal, sin embargo, no se presentó una diferencia significativa entre tratamientos para los primeros dos muestreos (Figura 17). Lo cual se deba probablemente a que en el primero, el suelo se encontraba completamente desnudo, ya que no comenzaba aún la temporada de lluvias (0 mm de precipitación, 2 semanas antes de la realización del análisis), posteriormente, en la segunda determinación, el cultivo de maíz se encontraba a la mitad de su ciclo productivo y a pesar de la existencia de una mayor cantidad de vegetación, los días anteriores a la realización del estudio estuvieron marcados por altas precipitaciones (78.56 mm, durante las 2 semanas anteriores al análisis), lo que generó una saturación del suelo que limitó en gran medida la actividad de los microorganismos; por último, en el tercer análisis realizado, el agua precipitada dos semanas antes de su realización fue de 14.79 mm, la cual generó condiciones ideales; para el aumento de la actividad microbiana, en el sistema agroforestal.

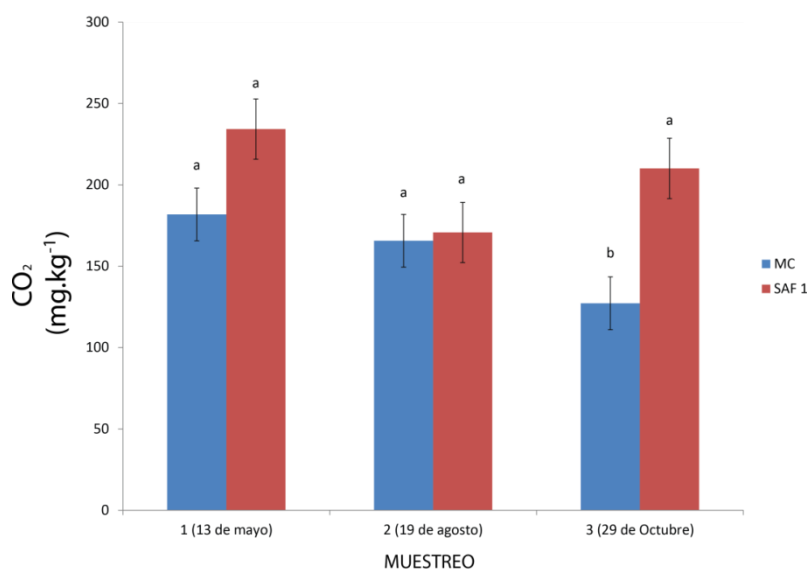


Figura 17. Actividad microbiana registrada en los tratamientos SAF y MC. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$) mediante la prueba de Tukey.

Según Jenkinson (1992) la actividad microbiana está fuertemente influenciada por factores como la humedad, pH, disponibilidad de O_2 , nutrientes inorgánicos y accesibilidad al sustrato. Anteriormente, se observó, mediante los análisis realizados, que la presencia de árboles influyó directamente sobre el contenido de agua y la temperatura del suelo, los cuales condicionaron directamente el grado con el que los microorganismos degradaron la materia orgánica, como lo demostró Ramos y Zúñiga (2008), quienes encontraron, diferencias significativas en el CO_2 producido por los organismos sometidos a humedades de 5, 10, 15 y 18%, siendo superior la producción a medida que aumentaba la temperatura (0.0007, 0.0038, 0.071 y 0.097 $mgCO_2\ g^{-1}\ h^{-1}$ respectivamente). Jenkinson (1992), encontró que en suelos desecados hasta un potencial hídrico de -10 MPa liberaron CO_2 a una tasa 50% menor que la observada en suelos con un contenido óptimo de humedad (entre -20 y 50 Mpa), en condiciones de saturación, la liberación de CO_2 disminuye debido a una menor cantidad de aire disponible para la difusión de gases, no obstante aumenta la actividad de la deshidrogenasa influenciada por el incremento en las condiciones de hipoxia (Subhani *et al.*, 2001). Adicionalmente en el estudio realizado por Ramos y Zuñiga (2008), se demostró que un aumento de la temperatura incide en una mayor respiración del suelo, en su estudio, determinaron que ante temperaturas de 8, 21, 27.5 y 37 °C la actividad de los microorganismos es de 0.021, 0.066, 0.140 y 0.128 $mg\ CO_2\ g^{-1}\ h^{-1}$ respectivamente. Además

de lo anterior, Suhani *et al.* (2001) reportaron que una mayor cantidad de raíces en el suelo, favoreció una mayor cantidad de microorganismos en la vecindad de las mismas, gracias a que en estas regiones se cuenta con una mayor proporción de nutrientes, que en el conjunto de suelo. Ferro *et al.* (2014), evaluaron la actividad microbiana en suelos con diferentes usos y coberturas vegetales: 1) Bosque: Usado como grupo control, debido a su estado de equilibrio; 2) Sistema agroforestal compuesto por las especies *Euterpe precatoria*, *Theobroma grandiflorum*, *Psidium guajava*, *Pouteria caimito* y *Caesalpinia férrea*; 3) Pastura en monocultivo y 4) policultivo de *Zea mayz*, *Passiflora edulis*, *Ananas comosus* y *Arachis pinto*i. En el cual no encontraron diferencias significativas en cuanto a la respiración del suelo entre ninguno de los tratamientos, evidenciando que no en todos los casos una mayor cobertura vegetal favorece mayores tasas de actividad ya que el CO₂ liberado por el bosque (59 mg.CO₂ g⁻¹ h⁻¹) fue menor, aunque no de manera significativa a los tratamientos SAF y policultivo (70.16 y 70.77 mg.CO₂ g⁻¹ h⁻¹ respectivamente); resultados similares a los de la presente investigación, en donde en dos de los muestreos no se presentaron diferencias significativas. No obstante, en otros estudios como en el realizado por Muñoz *et al.* (2007) se ha evidenciado una mayor actividad microbiana ante una mayor cobertura vegetal, ya que registraron una producción de 80 µm CO₂.g⁻¹ de suelo en un bosque nativo de Chile, la cual fue superior a la observada en ecosistemas de espinal con diferentes grados de preservación y porcentajes de cobertura vegetal: Bien preservado (80-51%); Buen espinal (50 – 26%); Espinal degradado (25- 11%) y Espinal muy degradado (<10%), los cuales presentaron registros de respiración del suelo de 19, 19, 16 y 17 µm CO₂ g⁻¹ respectivamente, a una profundidad de 10 cm.

Paralelo al desarrollo de los análisis de actividad microbiana, se realizó una medición de los organismos componentes de la mesofauna edáfica, cuya presencia y población presentó un comportamiento similar al observado anteriormente por el metabolismo de los microorganismos ya que estos igualmente son susceptibles a las condiciones de temperatura y humedad del suelo. Las poblaciones observadas en los dos tratamientos están dominadas por ácaros y colémbolos, mientras que organismos como larvas de insectos, nematodos, quilópodos, tisanópteros, entre otros, se presentan en menor proporción (Figura 18).

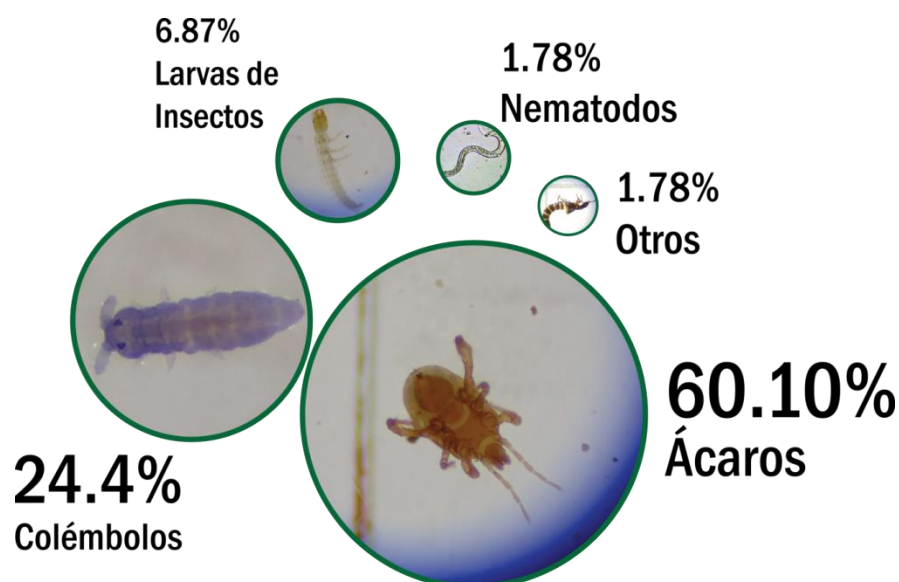


Figura 18. Proporción del total de individuos pertenecientes a la mesofauna del suelo encontrados en las tres determinaciones.

La presencia de individuos fue alta en el primer muestreo, cuando aún no daba inicio la temporada de lluvias, en este caso, la población estaba representada en su mayoría por ácaros, que abundaron tanto en el MC como en el SAF, y colémbolos que tuvieron una presencia significativamente mayor en el SAF; para el segundo muestreo, la presencia de individuos por m^2 descendió drásticamente, pasando de cerca de 16,000 ácaros m^2 en el MC a 4,682 ácaros m^2 , en el mismo tratamiento, situación que probablemente se dio por el elevado porcentaje de agua en el suelo y las bajas temperaturas del mismo, que obligan a los individuos a buscar zonas más cálidas, motivo por el cual, la presencia de estos organismos fue mayor en el MC ya que sin la influencia de la sombra de los árboles la temperatura del suelo era de 0.5 - 1.5°C mayor que en el SAF. Para el tercer muestreo, las condiciones edáficas en cuanto a temperatura y humedad, permitieron la presencia de una mayor cantidad de individuos m^2 , salvo que en esta ocasión se caracterizó por una mayor presencia de colémbolos y ácaros en el SAF (Figura 19).

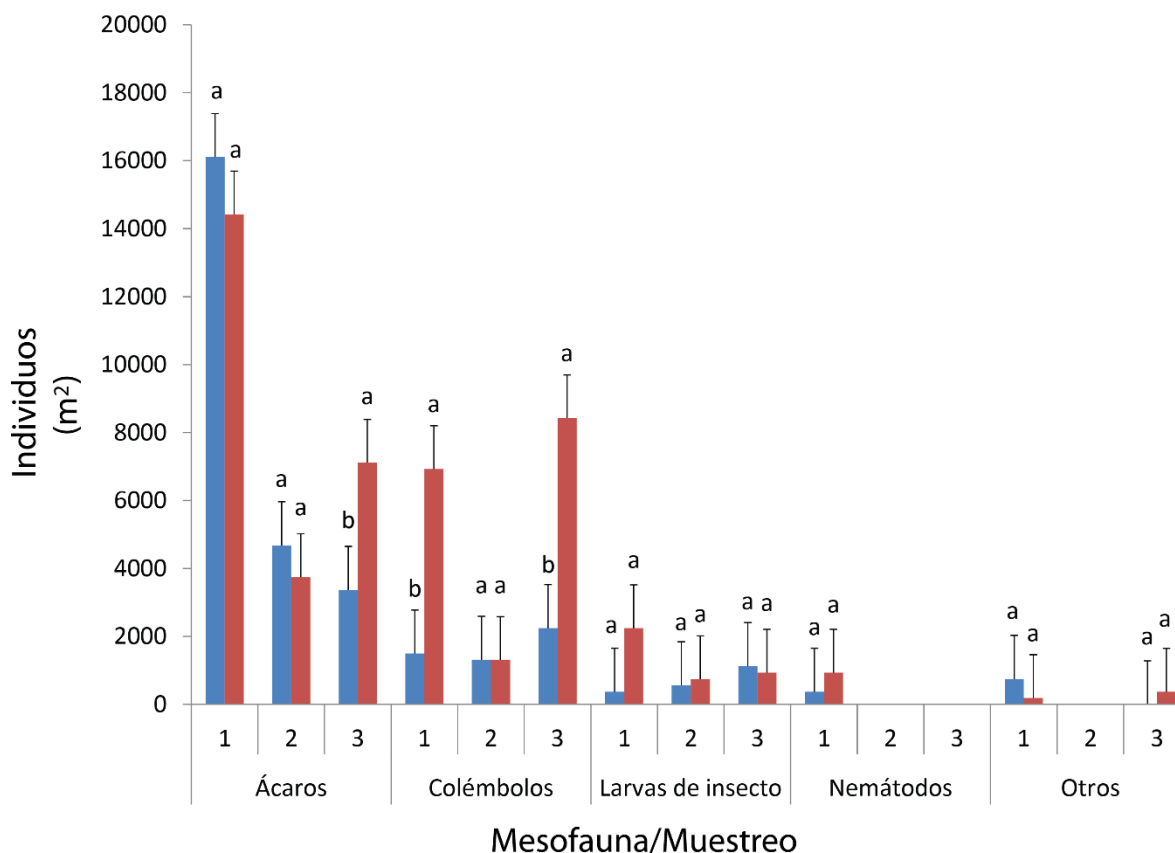


Figura 19. Mesofauna edáfica presente en cada muestreo realizado. Letras diferentes representan diferencias significativas ($p < 0.05$) mediante la prueba de Tukey.

La sobresaliente presencia de ácaros y colémbolos, coincide con los datos obtenidos por Carneiro *et al.* (2008), quienes en una evaluación de la mesofauna presente en un suelo semiárido del estado de Paraíba, Brasil, encontraron una prevalencia del 53.49% de ácaros y 12.44% de colémbolos, evidenciando la prevalencia que estos microartrópodos tienen en el suelo, ya que en ningún momento, ni siquiera en la época en la que las poblaciones redujeron drásticamente sus poblaciones fueron superadas por otras especies, no obstante, es importante anotar que algunas poblaciones de diferentes especies de ácaros, ante las alteraciones del ambiente, reducen rápidamente su número y no se recuperan con la misma velocidad (Behan-pelleiter, 1999), situación que explica, que para el tercer muestreo, a pesar de una mejoría en las condiciones edáficas su número no incrementaron en gran medida, en especial en el monocultivo, en donde propiedades como la humedad y temperatura, presentaron alta variación. En otro estudio Bedano *et al.* (2011) reportaron una mayor presencia de ácaros, en lugares con una menor intensidad de uso o con estados de conservación elevados, en la evaluación realizada, la presencia de estos individuos, fue

mayor en pasturas naturales y pasturas sometidas al pastoreo de ganado (11800 y 2,200 individuos m^2), que en suelos utilizados para la producción intensiva de maíz y soya los cuales registraban en promedio, menos de 500 individuos m^2 ; indicando que tierras sometidas a una menor intensidad de uso pueden generar un ambiente favorable para el incremento de la mesofauna, inclusive, Paoletti (1999), reportaron que lugares en los que se tienen cultivos perennes acompañados de esquemas de labranza de conservación propiciaron un aumento en las poblaciones pertenecientes a la mesofauna edáfica, lo anterior puede explicar el alto número de individuos en el primer muestreo, ya que al ser una producción de maíz de temporal, el terreno permanece en descanso desde el mes de noviembre hasta que se realiza la siembra al año siguiente en mayo o junio (entre 5 – 6 meses).

La humedad juega un papel importante en la cantidad de individuos presentes en el suelo, los resultados obtenidos, son contrarios a los reportados por Gergócs y Hufnagel (2009) quienes documentaron que en regiones tropicales, tanto en bosques primarios como secundarios, las poblaciones de ácaros son mayores en la temporada de lluvias, en comparación con la temporada seca, aunque sus valores pudieron ser influenciados por el contenido de materia orgánica, carbono y nitrógeno del suelo. Sin embargo en el presente estudio, se observaron niveles de humedad excesivos que saturaron el suelo, lo cual limita la disponibilidad de O_2 afectando así el libre desarrollo de la mesofauna edáfica.

4.4. Pérdida de suelo y escurrimiento

La evaluación se realizó del 29 de junio al 4 septiembre, periodo que presentó 35 eventos pluviales, de los cuales 15 (42%) causaron escurrimiento y de estos, el 100% fueron erosivos, la precipitación mínima que causó un flujo de agua superficial con arrastre de partículas fue de 7.63 mm, y la máxima precipitación registrada dentro del análisis fue de 26.24 mm, aunque en dos ocasiones se presentaron eventos con una mayor intensidad que causaron escurrimiento, no obstante la magnitud de los mismos rebasó la capacidad de las tinajas de agua, por lo que fue imposible realizar una medición de la lámina presente, lo que llevó a que dichas precipitaciones no se tomaran en cuenta dentro del estudio, por lo tanto el número de eventos pluviales analizados bajó de 15 a 13. En términos generales, el sistema agroforestal, gracias a la protección que otorgan los árboles incidió en menores

tasas de escurrimiento y pérdida de suelo a lo largo del estudio, en comparación con las observadas en el monocultivo las cuales fueron estadísticamente mayores (Cuadro 7).

Cuadro 7. Escurrecimiento y pérdida de suelo en el SAF y MC, durante el tiempo de duración de estudio.

Tratamiento	Escurrecimiento (m ³ ha ⁻¹)	Pérdida de suelo (kg ha ⁻¹)
Sistema Agroforestal (SAF)	252.90 b ^z	1079.3 b
Monocultivo (MC)	331.58 a	1594.3 a

^z valores sobre cada columna con diferentes letras son diferentes (p<0.05) mediante la prueba de Tukey.

Al momento de analizar el comportamiento del escurrimiento y la pérdida de suelo en los dos tratamientos, se puede determinar a través de cada evento pluvial, que el SAF favorece menores tasas de flujo superficial de agua y por ende un menor arrastre de suelo, el cual se evidencia en la (Figura 20), en donde con cada muestreo realizado se observaron un menor escurrimiento y una menor pérdida de suelo en el tratamiento con árboles. No obstante, las diferencias entre cada uno, se redujeron con el crecimiento del cultivo del maíz ya que el incremento del tamaño de las plantas aumenta la cobertura vegetal que puede proteger al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia.

Los datos obtenidos en cuanto a escurrimiento, fueron inferiores a los obtenidos por Medina *et al.* (2008), quienes reportaron valores de escurrimiento de 199 mm año⁻¹ y una pérdida de suelo de 2.70 t ha⁻¹ año⁻¹, para un cultivo de maíz bajo un esquema año y vez en un suelo arcilloso de Michoacán, México; y a los obtenidos por Kisic *et al.* (2002) quienes en un cultivo de maíz, ubicado en un suelo subsolado a 60 cm y una precipitación de 275.7 mm, registraron una pérdida de suelo de 2.94 t ha⁻¹ y un escurrimiento de 22.8 mm. Estos resultados son bastante útiles al momento de comparar el comportamiento de la erosión hídrica bajo un cultivo de maíz, no obstante, para hacer comparaciones más precisas, es necesario identificar investigaciones que evalúen el proceso erosivo bajo diferentes coberturas vegetales, como las otorgadas por un sistema agroforestal. De esta manera, Pinese *et al.* (2008) evaluaron la erosión laminar en un suelo bajo diferentes coberturas

vegetales en Minas Gerais, Brasil, sometidos a una precipitación de 457.5 mm, en donde evidenciaron una escurrimiento de 19.5 L. m⁻² en un monocultivo de maíz, el cual fue mayor al observado por un bosque nativo, el cual presentó 0.5 L/m², relación que se mantuvo en cuanto a la pérdida de suelo la cual fue mayor en el cultivo de maíz respecto al bosque nativo (144.30 y 0.08 g m⁻²); Resultados que permiten inferir que ante una mayor cobertura vegetal, el escurrimiento así como la magnitud del proceso erosivo se presentan en menor cuantía.

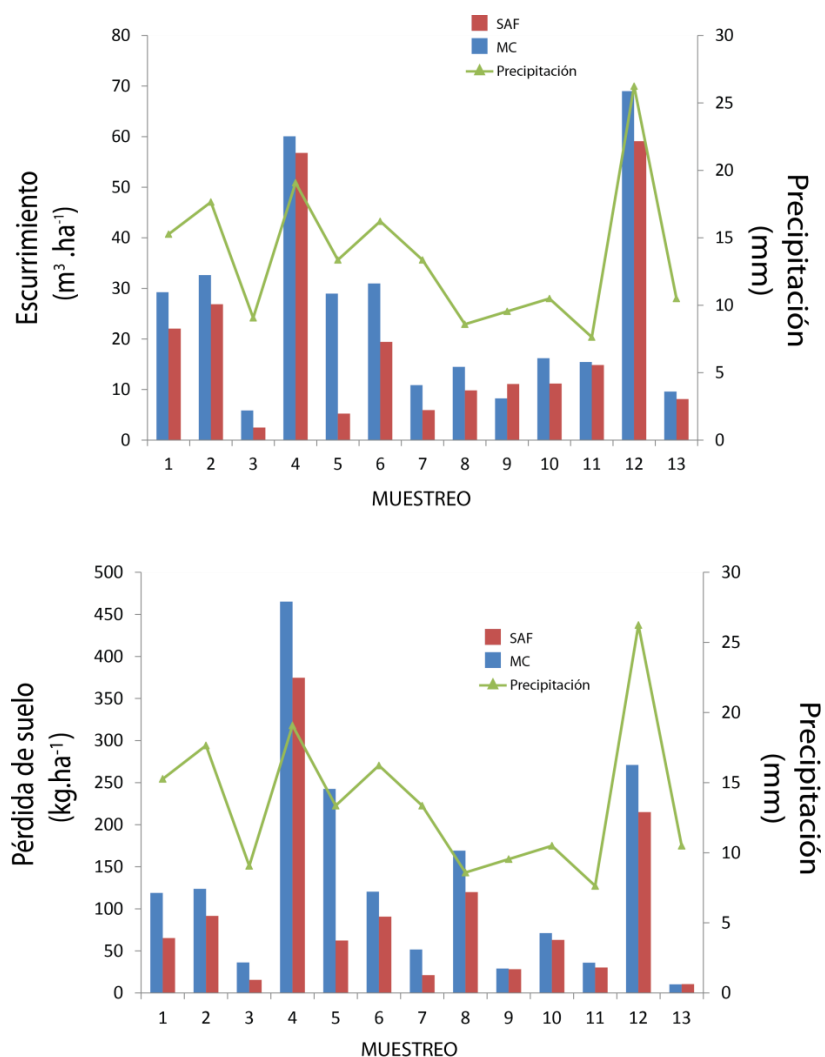


Figura 20. Escurrecimiento (arriba) y pérdida de suelo (abajo) en el SAF y MC en relación a la precipitación.

En un sistema agroforestal, específicamente un banco de proteína, compuesto por árboles de *Trichantera gigantea* y caña forrajera (*Saccharum officinarum*) Rodríguez *et al.* (2009) encontraron una menor pérdida de suelo (1.5 t ha^{-1}) en relación a un monocultivo de maíz (2.5 t ha^{-1}), en la zona andina de Colombia, demostrando que ante una mayor cobertura vegetal, los daños por erosión hídrica disminuyen, otorgando así una ventaja para la implementación de sistemas agroforestales que permitan la conservación del recurso suelo y evidenciando de igual forma, la importancia de mantenerlo bajo algún tipo de cobertura, debido a que las tasas de erosión se potencializan si este está desnudo, como fue demostrado por Chirino *et al.* (2003) quienes en un sistema agroforestal de *Pinus halepensis* en asociación con un pastizal seco registraron un escurrimiento y un arrastre de suelo de 5 mm y 0.1 kg ha^{-1} respectivamente, los cuales fueron significativamente menores a los obtenidos por un suelo desprovisto de vegetación (22 mm y $1,901 \text{ kg ha}^{-1}$, en el mismo orden).

Tanto en el monocultivo como en el tratamiento con árboles, fue observada una relación directa entre la intensidad de la precipitación y la cantidad de agua escurrida, las cuales presentaron un R^2 de 0.844 y 0.727 respectivamente, sin embargo la magnitud con la que se presenta este proceso, fue mayor en el sistema a plena exposición solar. Por otro lado, la relación entre la precipitación y la pérdida de suelo, es menos evidente tanto en el SAF como en el MC (R^2 de 0.42 y 0.44 respectivamente) (Figura 21) indicando, que ante una misma cantidad de precipitación se puede generar un arrastre de suelo diferente, debido a la influencia de factores como la intensidad de la lluvia y la humedad presente en el suelo, antes del evento.

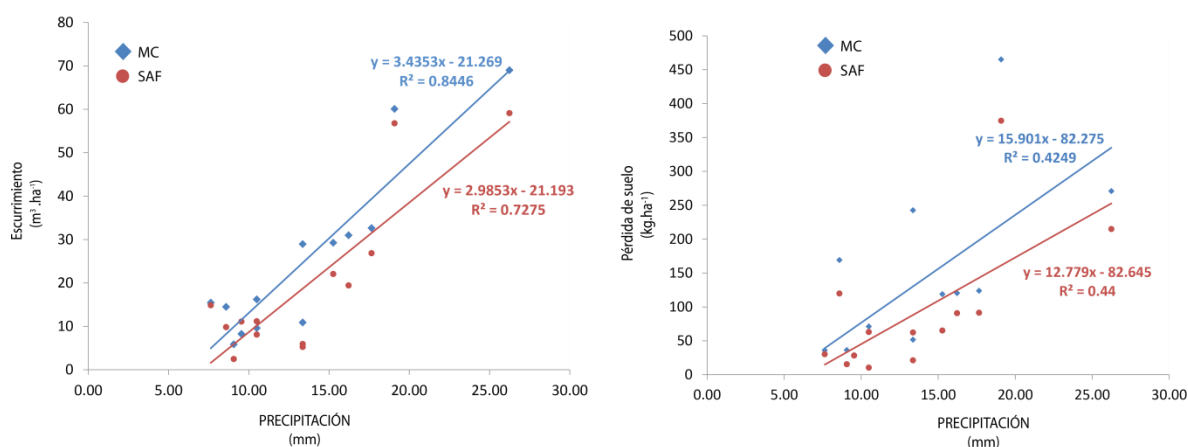


Figura 21. Relación entre la precipitación y la tasa de escurrimiento y pérdida de suelo para los tratamientos SAF y MC.

Del mismo modo existe una relación casi lineal, entre el escurrimiento y la pérdida de suelo para los dos tratamientos la cual, para el caso del SAF y el MC, presenta un R^2 de 0.77 y 0.71 respectivamente (Figura 22).

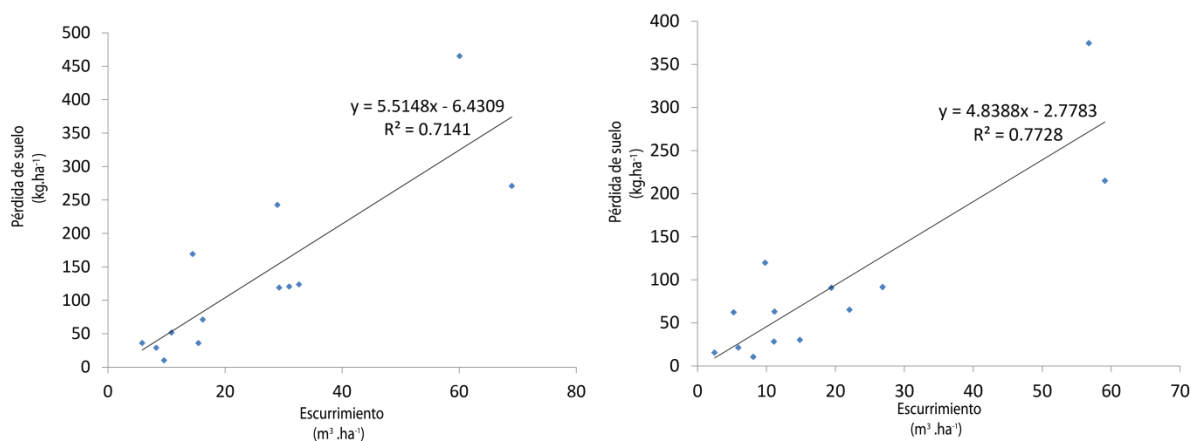


Figura 22. Relación entre el escurrimiento y la pérdida de suelo para los tratamientos MC (izquierda) y SAF (derecha).

4.5. Desarrollo y producción del maíz

Contrario a lo esperado, tanto la producción como el desarrollo del maíz fueron inferiores en el sistema agroforestal, en el cual las plantas presentaron un crecimiento más lento y manifestaron una menor altura en relación con las presentes en el monocultivo, situación que radica en el hecho de que los árboles de olivo generaban una sombra intensa y constante sobre el cultivo, lo que dificultó en gran medida su desarrollo. En general, el

componente agrícola del SAF presentó distintas limitantes para manifestar su capacidad productiva; en primer lugar, a pesar de que la siembra de los dos tratamientos se efectuó el mismo día, las semillas bajo los árboles, en promedio, tardaron más en germinar, posteriormente su crecimiento se dio a una menor velocidad; el exceso de humedad del suelo, generó síntomas de amarillamiento por deficiencia de oxígeno y las plantas al ser más débiles que las del monocultivo se acamaron en distintas ocasiones (Figura 23).



Figura 23. Diferencias entre el desarrollo del maíz en el SAF (izquierda) y monocultivo (derecha).

Las diferencias en cuanto a crecimiento y desarrollo observadas en la figura anterior, se confirman mediante las determinaciones de altura que se realizaron semanalmente; a partir de la quinta semana de edad del cultivo (Figura 24), en esta se puede observar que desde la primera medición, hasta la floración del 100% del cultivo las plantas sembradas a plena exposición solar presentaron una mayor altura, que las ubicadas a la sombra de los árboles de olivo.

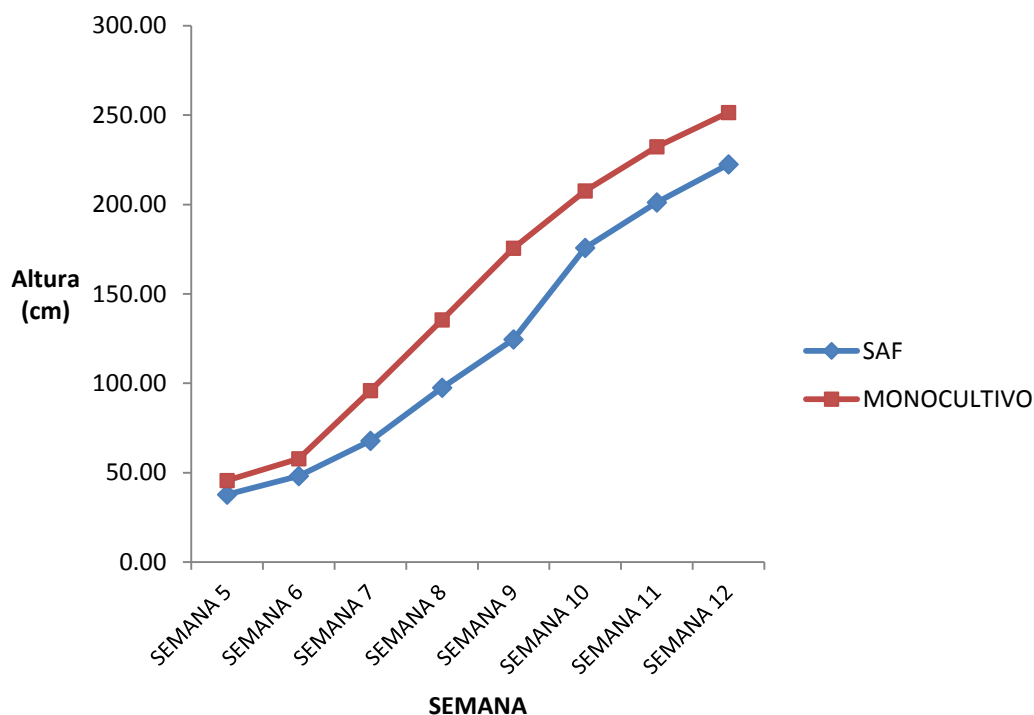


Figura 24. Altura de las plantas de maíz a través del desarrollo del cultivo en los tratamientos SAF y MC

Anteriormente se mencionó que al ser una planta de tipo C_4 , la radiación solar es un parámetro vital para el desarrollo y producción del cultivo de maíz, y que una reducción en la radiación fotosintéticamente activa del 30 – 40%, por periodos prolongados puede atrasar la maduración de los granos, retrasar el crecimiento y ocasionar caídas en la producción (Cruz *et al.*, 2006). Por este motivo, los sistemas agroforestales tienen que ser establecidos en un dirección este – oeste, y de esta forma permitir una entrada de luz sobre el componente agrícola que garantice el desarrollo óptimo de la fotosíntesis (Nair, 1993).

Los resultados anteriores coincidieron con los obtenidos por Martins *et al.* (2013) quienes en un SAF, compuesto por árboles de *Gliricidia sepium* asociados con maíz, comparado con una producción en monocultivo, encontraron un mayor desarrollo del componente agrícola, expresado en producción de biomasa, en el sistema sin árboles, mientras que en el SAF esta redujo conforme avanzaba la edad de las arbóreas, en consecuencia, la producción de maíz en el SAF y en el MC para el primer año de estudio fue 4,390 y 3,795 kg ha⁻¹, en el segundo año fue 233 y 254 kg ha⁻¹, para el tercero, cuando las arbóreas tenían más altura, la producción fue 5,195 kg ha⁻¹ en el MC y 4,644 kg ha⁻¹ en el SAF y por último en el cuarto año el desarrollo del maíz en el sistema a plena exposición solar superó significativamente al agroforestal 11,616 y 3,646 kg ha⁻¹, respectivamente. Indicando la importancia de la luz para el buen desarrollo de las plantas de maíz. En este orden de ideas, Macedo *et al.* (2006) evaluaron el desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz establecido en un sistema agroforestal bajo diferentes clones de *Eucalyptus sp.* en donde establecieron la primera línea del componente agrícola a diferentes distancias de los árboles, puesto que en un tratamiento el maíz estaba de 1.8 - 2.7 m retirado de la base del árbol y en el otro de 4.5 – 5.4 m, influyendo en el desarrollo de las plantas, ya que en promedio, las sembradas a una menor distancia registraron una altura de 167.85 cm, mientras que las más retiradas midieron en promedio 182.08 cm, siendo estas últimas similares en tamaño a las del monocultivo que presentaron una altura de 180.33 cm.

A pesar de que la producción de maíz demanda una gran cantidad de radiación solar, existen arreglos agroforestales bien establecidos que favorecen las interacciones que hacen de la agroforestería un sistema productivo y sostenible, en primer lugar Verinumbe (1987) demostró que la presencia de arbóreas, tiene el potencial de mejorar condiciones edáficas que repercutirán en un mejor desarrollo de los cultivos asociados, en su estudio, recolectó muestras de suelo pertenecientes a plantaciones de *Azdiracta indica*, *Eucalyptus sp* y *Prosopis sp.* de 12 años de edad, sembrando en cada uno semillas de maíz para cuantificar la biomasa aérea seca de cada una bajo los diferentes tratamientos a los 60 días de edad, en donde las plantas sembradas en un suelo de producción convencional (control) presentaron un rendimiento de 5.94 g/planta, el cual fue estadísticamente inferior al registrado por las establecidas bajo *Azdiracta indica*, *Prosopis sp.* y *Eucalyptus sp.* (28.566, 14.09 y 11.07 g/planta respectivamente).

Del mismo modo, en Tlaxcala, México, Altieri y Trujillo (1987), evaluaron el crecimiento y producción de cultivos de maíz establecidos en arreglos agroforestales bajo el esquema MIAF, compuestos por árboles de *Crataegus mexicana*, *Prunus capulli*, *Juniperus deppeana*, *Malus domestica* y *Pyrus communis*, registrando una tendencia hacia una mayor altura en las plantas bajo la influencia de las leñosas, aunque sin diferencias estadísticas, en su evaluación, registraron un altura del maíz de 201 cm en asocio con *Malus domestica*, 245 y 212 cm bajo *Pyrus communis* y *Juniperus depeanna* y 192 cm en monocultivo. Determinando así que el establecimiento de cultivos como el maíz, que son demandantes de una gran cantidad de luz, en consorcio con árboles, pueden ser una alternativa viable, si los arreglos agroforestales se hacen en un forma adecuada.

Como se observó anteriormente, el sistema agroforestal conserva la humedad del suelo por más tiempo que el monocultivo, no obstante, a pesar de lo positiva que pueda llegar a ser esta propiedad, cuando se presentaron precipitaciones elevadas la influencia de los árboles condicionó una saturación del suelo que limitó el crecimiento de las plantas de maíz, las cuales manifestaron un amarillamiento a causa de la deficiencia de oxígeno por exceso de humedad, fenómeno confirmado luego de que en la semana 8, la precipitación redujera drásticamente, lo que permitió que el suelo saliera de su estado de saturación y propiciara el correcto desarrollo del maíz, el cual después de la caída en la precipitación, incrementó su crecimiento (Figura 25).

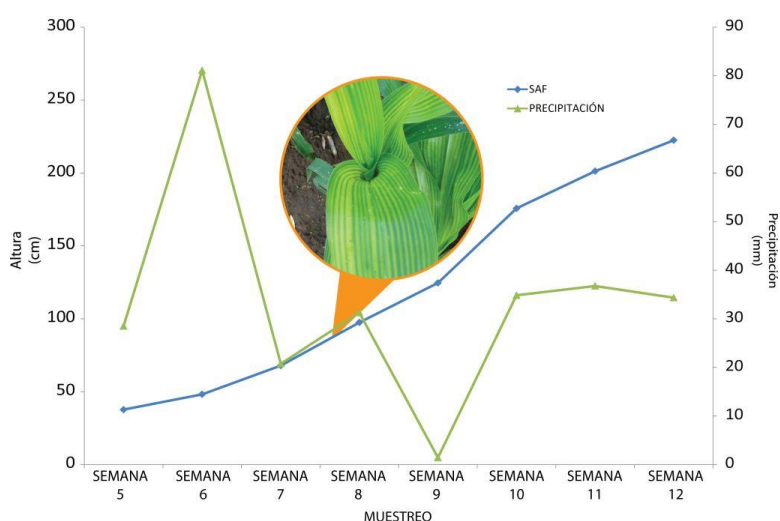


Figura 25. Síntomas de amarillamiento por exceso de humedad en las plantas de maíz, y su crecimiento con relación a la precipitación

La diferencia en crecimiento y desarrollo de las plantas de maíz en el SAF y el MC, se mantuvo al momento de evaluar su respectiva producción, en general las mazorcas obtenidas en el cultivo bajo la sombra de los árboles de olivo presentaron un menor tamaño que las cosechadas en el sistema a plena exposición solar, motivo por el cual los rendimientos totales, de producción de grano por hectárea en este tratamiento fueron mayores (Cuadro 8).

Cuadro 8. Producción de maíz en kg.ha⁻¹ en los tratamientos SAF y MC.

Producción de grano (kg ha⁻¹)	
Monocultivo MC	6,379 a ^z
Sistema Agroforestal SAF	4,670 b

^z valores sobre cada columna con diferentes letras son diferentes ($p < 0.05$) mediante la prueba de Tukey.

Las diferencias en producción se confirmaron al analizar las dimensiones y características de las mazorcas cosechadas en cada tratamiento (Figura 26), en la cual se observó que aquellas obtenidas en el sistema agroforestal, tuvieron un menor tamaño y diámetro, además de una menor cantidad de grano, en comparación con las observadas en el monocultivo.

La competencia por luz resulta ser un factor determinante al momento de evaluar la producción de maíz bajo esquemas agroforestales ya que en diferentes estudios se observan resultados similares a los obtenidos en la presente investigación, ejemplo de esto lo otorgan Macedo *et al.* (2006) quienes observaron una producción de grano en monocultivo de 4,268.73 kg ha⁻¹, la cual fue significativamente superior a la del maíz bajo diferentes clones de *Eucalyptus sp.* establecido de 1.8 – 2.7 metros de distancia de la base de la leñosa (900 kg ha⁻¹), y esta a su vez fue estadísticamente inferior a la producción obtenida por el maíz sembrado de 4.5- 5.4 metros de distancia de la base del árbol que registró en promedio 1,837.60 kg ha⁻¹, siendo esta a su vez significativamente menor a la producción en monocultivo. De esta forma se evidencia el efecto negativo de la sombra generada por las

leñosas perennes sobre la producción de grano de un cultivo que demanda grandes cantidades de radiación fotosintéticamente activa como el maíz.

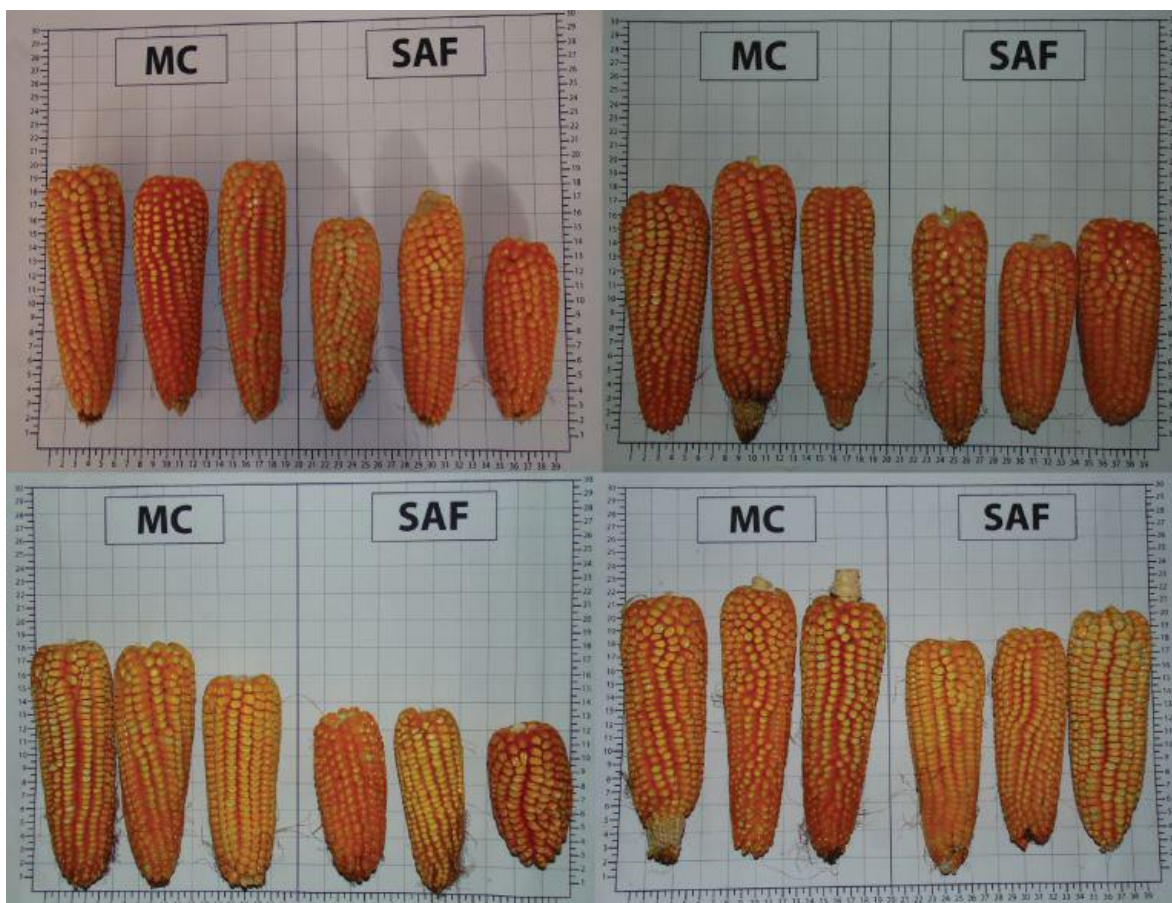


Figura 26. Características morfológicas de las mazorcas cosechadas en los tratamientos SAF y MC.

En otro estudio realizado por Martins *et al.* (2013) se constató la tendencia observada anteriormente, ya que en un cultivo de maíz establecido en asociación con *Gliricidia sepium*, analizaron en el cuarto año de evaluación y establecimiento de las arbóreas, una influencia negativa de la sombra sobre la producción de grano, ya que en el sistema agroforestal esta fue de 802 kg ha⁻¹, siendo estadísticamente inferior a la registrada en el monocultivo (2,753 kg ha⁻¹), ratificando de esa forma la importancia de diseñar arreglos agroforestales que permitan una correcta entrada de luz para el componente agrícola, aunque el panorama para la producción de maíz en consorcio con especies arbóreas sea negativo, existen trabajos como el realizado por Bertalot *et al.* (2014) que revelan una mayor producción de grano bajo SAF. En su estudio, se evaluó la productividad de maíz en

asociación con *Leucena diversifolia*, en comparación con un cultivo a plena exposición solar, ambos bajo diferentes tratamientos de fertilización, se registraron mayores rendimientos en el SAF, de la siguiente manera: 1) Control (sin fertilización), 6.34 t ha⁻¹ en SAF y 5.76 t ha⁻¹ en el MC; 2) Fertilización química, 9.34 t ha⁻¹ bajo SAF y 8.7 t ha⁻¹ en MC; 3) Fertilización con residuos vegetales de *Leucaena diversifolia*, 9.51 t ha⁻¹ bajo SAF y 8.96 t ha⁻¹ en MC y 4) Fertilización química + residuos vegetales, 10.25 t ha⁻¹ bajo SAF y 8.94 t ha⁻¹ en MC.

5. CONCLUSIONES

Pese a tener los mismos valores de densidad aparente y real, el suelo bajo el sistema agroforestal presentó una menor capacidad de retención de agua expresada en menores valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

Es importante anotar que la menor capacidad de retención de agua observada en el SAF puede ser perjudicial, ante condiciones de escasa precipitación, ya que el agua presente en el suelo puede dejar de estar disponible para las plantas, sin embargo la presente investigación permitió reconocer que la evaluación del contenido de humedad y otros indicadores de calidad del suelo, tienen que hacerse de forma integral, de tal manera que se incluya el efecto de diferentes factores como la sombra ejercida por las arbóreas, debido a que en las evaluaciones realizadas, un análisis solitario de la curva de retención, estaría desconociendo los resultados obtenidos en cuanto a la humedad volumétrica del suelo, en donde se observó que gracias a la menor temperatura tanto edáfica como ambiental registradas en el SAF, la pérdida de agua del suelo se dio a una menor velocidad que en el monocultivo, contrario a lo indicado por los análisis de laboratorio. Esta propiedad por benéfica que pueda ser, para la precipitación presentada durante el tiempo de evaluación resultó en un detrimento del desarrollo del cultivo de maíz ya que el agua nunca fue una limitante, y su mayor retención en el suelo del SAF generó un estado de saturación del mismo, lo que redujo la circulación de oxígeno disponible para el correcto desarrollo de las plantas de maíz. No obstante se requieren hacer más investigaciones en donde se evalúe el desarrollo del cultivo bajo condiciones de escasa precipitación, en donde es probable que la mayor retención de agua evidenciada por el SAF, resulte benéfica para el crecimiento de las plantas.

La presente investigación permitió observar que condiciones similares en cuanto a la fertilidad del suelo en los dos tratamientos, lo puede generarse, ya sea por un deficiente aporte de biomasa por parte de los árboles de olivo, una sustracción constante de nutrientes,

ejercida por los mismos, o una sumatoria de los dos factores, no obstante es importante resaltar que el SAF soporta la presencia de árboles sin obtener un detrimento considerable en el contenido de cada nutriente en el suelo, aunque algunos como el fósforo y el amonio, tienen una ligera tendencia a ser menores en el sistema con árboles. Resaltando así la necesidad de implementar tratamientos con materiales fertilizantes que involucren la demanda de nutrimentos por parte de todos los componente del sistema agroforestal.

Las propiedades biológicas del suelo fueron similares en los dos tratamientos, sin embargo la actividad microbiana evidenció una tendencia a ser mayor en el SAF, en especial cuando las condiciones de humedad fueron óptimas, indicando así que los árboles generan un medio propicio para el metabolismo de los microorganismos y por lo tanto un posible aumento en la degradación de la materia orgánica. Este medio favorable, expresado en una temperatura ambiental y edáfica más constante también propició un mantenimiento de las poblaciones de individuos pertenecientes a la mesofauna edáfica, en especial de las poblaciones más relevantes (ácaros y colémbolos).

El sistema agroforestal, gracias a la mayor cobertura vegetal presente, registró menores valores de escurrimiento, y a su vez una menor cantidad de suelo erosionado, ya que como se pudo observar, estos dos están relacionados directamente, el análisis permitió observar un potencial erosivo de la lluvia en el monocultivo, en especial durante el inicio de la temporada de lluvias, en donde las plantas de maíz no eran lo suficientemente altas como para proteger el suelo por sí misma, mientras que la presencia de las arbóreas en el SAF puede cumplir con la función de reducir la fuerza destructiva de las gotas de lluvia durante los tiempos en los que no se tiene planta o estas no alcanzan a otorgar una cobertura vegetal adecuada, adicionalmente, los menores registros de escurrimiento y pérdida de suelo bajo las leñosas pueden ser producto también de la mayor velocidad de infiltración que obtuvo este tratamiento.

La producción y el crecimiento del maíz fue estadísticamente menor en el SAF, situación que se atribuye al intenso sombreadamiento que generan los árboles de olivo sobre el componente agrícola, lo cual es síntoma de un arreglo inadecuado en el que las hileras de leñosas se encuentran en dirección norte-sur, ubicación que proyectó una sombra sobre las

plantas durante la mayor parte del día, limitando la radiación fotosintéticamente activa que estas requieren para manifestar su correcto desarrollo y un mayor potencial productivo.

Por último, es importante mencionar que el sistema agroforestal manifiesta un beneficio ambiental, al contribuir a una mayor conservación de la humedad y menores tasas de escurrimiento y pérdida de suelo, ratificando así una de las ventajas que se le atribuyen a la agroforestería, no obstante este beneficio para la conservación de suelo, se vio opacado por los menores rendimientos productivos del maíz, lo cual revela la complejidad que se maneja al momento de analizar el comportamiento de la producción de cultivos y árboles en forma integrada. Sacando a flote la necesidad de crear tecnologías netamente agroforestales que permitan obtener un aprovechamiento total de los aspectos positivos que ofrecen estos sistemas y en las que se integre de manera eficaz el punto álgido de la ciencia agroforestal; las correctas interacciones de todos sus componentes.

6. Recomendaciones

Para el mejoramiento del SAF resulta necesario direccionar el cultivo de tal forma que reciba la mayor cantidad de luz posible durante los meses de producción, a fin de evitar el efecto negativo que genera la sombra de los árboles, adicionalmente, es necesario aplicar enmiendas al suelo que permitan una disponibilidad de nutrientes para los árboles y el cultivo, y de esta forma disminuir o revertir la tendencia hacia una mayor cantidad de macro y micro elementos disponibles en el monocultivo.

Las labores mecanizadas realizadas pueden ser reemplazadas por técnicas de labranza reducida, de tal manera que se permita un libre desarrollo de las raíces de los olivos y se permita de esta manera un mayor reciclaje de nutrientes y una movilización de los mismos hacia capas más superficiales del suelo, además de lo anterior, es importante la implementación de cultivos de cobertura que contribuyan a una mayor fijación de nutrientes como el nitrógeno (en el caso de usar leguminosas) y con una mayor protección del suelo, en especial en el monocultivo, donde sus tasas de pérdida son mayores. Estos cultivos también pueden ser implementados como abonos verdes que además de aportar biomasa vegetal, protejan al suelo en la temporada en la que no se encuentra cultivado.

Es importante recalcar que en los sistemas agroforestales los árboles deben aportar beneficios ambientales y productos que permitan que los productores se beneficien económicamente de ellos, logrando así un uso equivalente de la tierra, ya que es normal obtener rendimientos productivos inferiores de los cultivos que se encuentran bajo la sombra de las leñosas, pero al momento de analizar económicamente la totalidad del sistema, la venta de la producción generada por árboles y cultivos asociados puede generar un beneficio económico mayor al obtenido en un monocultivo con la ventaja de que esta ganancia se obtiene de una con menores impactos ambientales negativos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson J.P.E. 1982. Soil respiration. En: A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties. Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. pp. 837-871.
- Alcántar G.G y T.L. Trejo. 2007. Nutrición de cultivos. Colegio de postgraduados-Mundi Prensa. México. 451 pp.
- Altieri M.A. y Trujillo J. 1987. The agroecology of corn production in Tlaxcala, México. *Human Ecology*.15(2)189-220.
- Álvares S.J.D. y M. de J. Anzueto. 2004. Actividad microbiana del suelo bajo diferentes sistemas de producción de maíz en los altos de Chiapas, México. *Agrociencia* 38:13-22.
- Ávila H., J.H. Harmand, E. Dambrine, F. Jiménez, J. Beer y R. Oliver. Dinámica del nitrógeno en el sistema agroforestal *Coffea arabica* con *Eucalyptus deflupta* en la zona sur de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. 41-42:83-91.
- Bardgett R. 2005. *The Biology of Soil: A community and ecosystem approach*. Oxford University Press. Great Britain. 242 pp.
- Barranco D., R. Fernández-Escobar y L. Rallo. 2008. El cultivo del olivo. Mundi Prensa. Madrid, España. 796 pp.
- Barreto C.A., F.H. Soriano, M.B. Galvão dos Santos, Q. Reis de Araujo y F.J. Freire. 2006. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. 19(4):415-425.
- Bautista C. A., J. Etchevers, R.F. del Castillo y C. Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13(2):90-97.
- Bedano J.C., A. Domínguez y R. Arolfo. 2011. Assessment of soil biological degradation using mesofauna. *Soil & Tillage Research*. 117:55-60.

- Behan-Pelleiter B.M. 1999. Oribatide mite biodiversity in agroecosystems: role for bioindication. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 74:411-423.
- Bertoni J y F. Lombardi. 2005. *Conservação do solo*. Icone. São Paulo, Brasil. 355 p.
- Betalot M.J.A., I.A. Guerrini, E. Mendoza y M.S.V. Pinto. 2014. Productivity, leaf nutrient content and soil carbón stocked in agroforestry and traditional management of maize (*Zea mays* L.). *American Journal of Plant Science*, 5:884-898.
- Bidwell. R.G.S. 1990. *Fisiología vegetal*. AGT Editor. México D.F. 784 pp.
- Blanco H. y R. Lal. 2008. *Principles of soil conservation and management*. Springer. 240 pp.
- Cabrera G. y G. Crespo. 2001. Influencia de la biota edáfica en la fertilidad de los suelos en ecosistemas de pastizales. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 35(1):3-9.
- Cabrera C.N., R. Ramos y J. Galarza. 2005. *Sistemas agroforestales aplicables en la sierra ecuatoriana, resultados de una década de experiencias de campo*. INIAP. Quito-Ecuador. 195 pp.
- Campbell, K.L.I., N.H Hodgson. y M. Gill. 1999. *Livestock and Environment Toolbox*. CD-ROM. Livestock, Environment and Development (LEAD) Initiative. Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO. Rome.
- Cardona D. y S. Sadeghian. 2005. Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé* 56 (4):348-364.
- Cardona D. y S. Sadeghian. 2005b. Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales libre exposición solar y con sombrío de *Inga sp.* *Cenicafé* 56(2):127-141.
- Carneiro S.P., J. Silva, J.R. Paes de Miranda, R. Vital dos Santos y A. Rocha. 2008. *R. Bras. Ci. Solo*. 32:151-160.
- Carrasco J. J., F. Squella y J. Vergara. 2003. Técnicas de conservación y recuperación de suelos y aguas. En: *Métodos y prácticas de conservación de suelos y aguas*. Boletín INIA No. 103. Santiago, Chile. 132 pp.

- Chirino E., J. Bellot, A. Bonet y J.M. Andreu. 2003. Efecto de diferentes tipos de cubierta vegetal en el control de la erosión en clima semi-árido. SE – España. Edafología. 10(3):39-48.
- CIAT. 1989. Información básica sobre la competencia entre las malezas y los cultivos. Cali, Colombia. 36pp.
- Crespo G. 2008. Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales Revista cubana de ciencia agrícola. 42 (4):329-335.
- Cruz J.C., I.A. Pereira, R. Costa, M.M. Gontijo, J. Herbert, M. Fernandes y D.P. Santana. 2006. Manejo da cultura do Milho. Circular técnica No. 87. EMBRAPA. Sete Lagoas, MG. 12 pp.
- De la Rosa D. 2008. Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo sostenible. Mundi prensa, Madrid, España. 404 pp.
- De Moraes J.W., V. Oliveira, C. Dambros. S.C. Tapia y A.N.S. Acioli. 2010. Mesofauna do solo em diferentes sistemas de uso da terra no alto rio Solimões. AM. Neotropical Entomology 39(2)145-152.
- De Rossi A., L. Rufato. C.L. Giacobbo, V.B. Costa, M.R. Vitti, M.E. Gonzalez y J.C. Fachinello. 2007. Diferentes manejos da cobertura vegetal de aveia presta em pomar no sul do Brasil. Bragantia, Campinas.66(3):457-463.
- Doran J.W. y T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality: En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek y B.A. Stewart. Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA special publication No. 35. Soil Science Society of America.
- Escobar M., A. Diaz, A. Leal y A. Myrian. 2007. Principios de sistemas agroforestales y avances en la protección fitosanitaria en el departamento de Santander, Colombia. ICA/CDMB. Bucaramanga, Santander. 48 pp.
- Essington M.E. 2004. Soil and wáter chemistry, an integrative approach. CRC press. 534 pp.

- Eswaran H., R. Lal y P.F. Reich. 2001. Land degradation: an overview. En: Bridges, E.M., I.D. Hannam, L.R. Oldeman, F.W.T. Pening de Vries, S.J. Scherr, and S. Sompatpanit (eds.). Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press, New Delhi, India.
- FAO. 1985. Irrigation water management: Training manual No.1, introduction to irrigation. [disponible en] <http://www.fao.org/docrep/R4082E/r4082e03.htm#2.6> soil erosion by water.
- Farfán F. 2010. Cambios en la fertilidad del suelo con plantaciones de café y sombrío de especies forestales. *Cenicafé* 60(4):7-27.
- Fassbender H.W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 398 p.
- Ferro S.I., S. E. de Araujo y J. Ferreira. 2014. Biological activity of soils under systems of organic farming agroforestry and pasture in the Amazon. *Revista Ciência Agronômica* . 45(3):427-432.
- García C., F. Gil, T. Hernández y C. Trasar. 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Mundi Prensa. Murcia, España. 371 pp.
- Gergócs V. y L. Hufnagel. 2009. Application of oribatid mites as indicators (review). *Applied ecology and environment research*. 79-98.
- Giraldo L.A. 2000. Sistemas silvopastoriles para la ganadería en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 87pp.
- Grilo R.C. y L. Enami. 2008. Gestão de bacias hidrográficas com o uso de modelo preditivo de erosão dos solos e sistemas de informação geográfica. UNAR, Ararás, SP. 2:(1)21-3
- Gobat J.M., M. Arango y W. Matthey. 2004. The Living Soil, Fundamentals of soil science and soil biology. Science Publishers. New Hampshire. United States. 602 p.
- Gómez J.A. 2010. Sostenibilidad de la producción de olivar en Andalucía. Taguas Andalucía, España. 470 pp.

- Gopinathan R. y C. Sreedharan. 1987. Soil erosion as influenced by rainfall erosivity under different agroforestry systems. En: Reifsnnyder W.S. y T.O. Darnhofer. Meteorology and agroforestry. ICRAF. Nairobi, Kenya. pp. 407 – 418.
- Guariz R.H., W. A. Campanharo, M.H. Savoldi, R.A. Cecílio y M.P. de Holanda. 2009. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil. 25- 30 abril, INPE. 7709-7716.
- Hernández F.G y Hoefl G. 2012. Managing soils pH and Nutrients. En: University of Illinois. 2012. Illinois agronomy Handbook. 224 pp.
- Ibrahim M. 2010. Competencia en los sistemas silvopastoriles: Raíces, agua y nutrientes. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 20pp.
- ICRAF. 1997. Redefining Agroforestry – an opening Pandora’s box? Agroforestry today. 9(1):5-9
- Iwata B., L.F.C. Leite, A.S.F. Araújo, L.A.P. Nunes, C. Gehring y L.P. Campos. 2012. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Agrissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental. 16(7):730-738.
- Jaramillo D.F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Medellín, Colombia. 613 pp.
- Jaramillo A. y B. Chaves. 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica*) al sol y bajo la sombra. Cenicafé. 50(2):97-105.
- Jenkinson D. 1992. La materia orgánica del suelo: Evolución. En: Wild A. Condiciones de suelo y desarrollo de las plantas. Mundi Prensa. Madrid. España.
- Kang B.T., G.F. Wilson y L. Sipkens. 1981. Alley cropping maize (*Zea mays*) and Leucaena (*Leucaena leucocephala*) in Southern Nigeria. Plant and Soil. 63:165-179.
- Karyanto A., C Rahmadi, E. Franklin, F. Susilo y J. de Moraes. 2012. Collembola, Acari y otra mesofauna del suelo: el método Berlese. En: Moreira F.M.S., J. Huising y D.E. Bignell. Manual de biología de suelos tropicales, muestreo y

- caracterización de la biodiversidad bajo suelo. Instituto Nacional de Ecología. México. 337 pp.
- Killham K. 1994. Soil ecology. Cambridge University Press. Great Britain. 242 pp.
- Kisic I., F. Basic, O. Nestroy, M. Mesic y A. Butorac. 2002. Soil erosion under different tillage methods in central Croatia. 53(4):199-206.
- Krishnamurthy L. y M. Ávila 1999. Agroforestería básica. PNUMA. Oficina regional para América Latina y el Caribe. Serie de textos básicos para la Formación Ambiental No. 3. México, D.F. México. 340 pp.
- Larson W.E. y F.J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. En: Evaluation for sustainable land management in the developing world. Technical papers. Bangkok, Thailand 12(2).
- Lal R. 1999. Soil quality and soil erosion. CRC press, Boca Raton, Florida, USA. 329 pp.
- Lundgren O. y B. Raintree. 1983. Sustained agroforestry. En: Nestel B. Agricultural research for development: Potentials and challenges in Asia. The Hague. The Netherlands. 354 pp.
- Macedo R.L.G., R. Gomez, N. Venturin, R. Silva doVale y K. de Oliveira. 2006. Revista Árvore Viçosa –MG. 30(5):701-709.
- Magalhães S.S., O.L. Weber, C.H. Dos Santos y F.C. Valadão. 2013. Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de usos do solo de colorado do Oeste – RO. 43(1):65-74.
- Mahecha L. 2002. El silvopastoreo: Una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias. 15: 226-231.
- Mahecha L. 2003. Importancia de los sistemas silvopastoriles y principales limitantes para su implementación en la ganadería colombiana. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias. 16(1):11-18.
- Matoso C.P., R.H. Silva, G.B. de Freitas, H.E. Prieto, C. Jaramillo y S. Lages. Análise Comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea*

- arabica*) Cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na zona da mata MG. Revista Árvore. 31(5):805-812.
- Martins J.C.R., R.S.C. Menezes, E.V.S.B. Sampaio, A. F. dos Santos y M.A. Nagai. 2013. Produtividade de biomasa em sistemas agroflorestais e tradicionais no Cariri Paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 17(6):581-587.
- Medina L.E., M. Bravo, C. Prat, M. Martínez, E. Ojeda y B.E. Serrato. 2008. Pérdida de suelo, agua y nutrientes en un acrisol bajo diferentes sistemas agrícolas en Michoacán, México. Agricultura técnica en México. 34(2):201-211.
- Melloni R., E. Guimarães, M.I. Nogueira y F.B. Marcondes. 2008. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. R. Bras. Ci. Solo. 32: 2461-2470.
- Mengel K.y E.A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer academic publisher. The Netherlands. 849 pp.
- Moreno S.E. 2007. Características territoriales, ambientales y sociopolíticas del municipio de Texcoco, Estado de México Quivera 9(1):177-206
- Morgan R.P.C. 1995. Soil Erosion & Conservation. 304 p.
- Muñoz C., E. Zagal y C Ovalle. 2007. Influence of trees on soil organic matter in Mediterranean agroforestry systems: an example from the “Espinal” of central Chile. European Journal of Soil Science. 58:728-735.
- Murray R.M., J.I. Bojórquez, A. Hernández, M.G. Orozco, J.D. García, R. Gómez, H.M. Ontiveros y J. Aguirre. 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. BioCiencias. 1(3):27-35.
- Murray R.M., M.G. Orozco, A. Hernández, C. Lémus y O. Nájera. 2014. El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. Avances de investigación agropecuaria. 18(1):23-31
- Navarrete S.A., G. Vela, J. López y M de L. Rodríguez. 2011. Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad de suelo. Contactos. 80: 29-37.

- Notaro K.de A., E. Valente, G. Pereira, A. Oliveira y P.M. de Moura. 2014. Agroforestry systems, nutrients in litter and microbial activity in soils cultivated with coffee at high altitude. *Sci. Agric.* 71(2):87-95.
- Nair P.K.R 1993. An introduction to agroforestry.. Kluwer Academic. Dordrecht, The Netherlands. 499 pp.
- Nunes A.N., A.C. de Almeida y C.O.A. Coelho. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography.* 31:687-699.
- Ogunkunle C.O. y O.O. Awotoye. 2011. Soil fertility status under different tree cropping system in a Southwestern zone of Nigeria. *Not.Sci.Biol.* 3(2):123-128.
- Oliveira M.L., H.A. Ruiz, L.M. da Costa y C.E.G.R. Sxhaefer. 2005. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. *Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* 9(4):535-539.
- Osman K.T. 2013. Soils, principles, properties and management. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 271 pp.
- Paoletti M. G. 1999. Using bioindicators based on biodiversity to assess landscape sustainability. *Agriculture Ecosystems and Environment.* 74:1-18.
- Parkin T.B. y Doran J.W. Franco –Viszcaíno E. 1996. Field and laboratory tests of soil respiration. En: Doran J.W., y J.A. Jones. *Methods for assessing soil quality.* Soil Science Society of America, Madison. pp 231 -245.
- Pereira R. de C., J. Mattos y I. Paulo. 2012. Diversidade da meso e macrofauna edáfica em diferentes sistemas de manejo de uso do solo em Cruz das Almas. *Semana Entomológica da Bahia.* 03 – 09 de dezembro de 2012.
- Pérez M.D. y Ortiz B.F. 2011. Producción integral de olivar. *Consejería de agricultura y pesca.* 160 pp.
- Pérez J., E. Valdés, M.E. Hernández, V. Ordáz. 2005. Lluvia, escurrimiento superficial y erosión del suelo en sistemas agroforestales de café bajo sombra. *Afrociencia* 39:409-418.

- Pezo D. y M. Ibrahim 2008. Sistemas silvopastoriles, Colección de módulos de enseñanza agroforestal, módulo de enseñanza No. 2. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 258 pp.
- Pinese J.F., L. Moreira y S.C. Rodrigues. 2008. Monitoramento de erosão laminar em diferentes usos da terra, Uberlândia-MG. Sociedade & Natureza, Uberlândia 20(2):157-175.
- Ramos V.E. y D. Zuñiga. 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel laboratorio. Ecología aplicada 7(1-2):123-130.
- Rodríguez J.A., I.C. Cristina Sepúlveda, J.C. Camargo y J.H. Quintero. 2009. Pérdidas de suelo y nutrientes bajo diferentes coberturas vegetales en la zona Andina de Colombia. Acta Agronómica. 58(3):160-166.
- Romero B.N., L. Saadi, M. Jorratti y C. Andrada. 2012. Estudios morfológicos de variedades de olivo (*Olea europaea*) del valle central de la provincia de Catamarca. Bilogía en Agronomía. 2(1):7-15.
- Roy R.N., A. Finck, G.J. Blair y H.L.S. Tandon. 2006. Plant nutrition for food security, a guide for integrated nutrient management. FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin. No. 16. 349 pp.
- SAGARPA. 2010. Milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). [En línea] <http://www.sagarpa.gob.mx/developmentRural/Documents/fichasCOUSSA/03%20MILPA%20INTERCALADA%20CON%20FRUTALES.pdf>
- SEMARNAT. 2000. Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000. México D.F.
- SEMARNAT - CP. 2003. Evaluación de la Degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002. México.
- Salvador R.J. 2001. Maíz. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia. Publicaciones del programa nacional de etnobotánica Serie: Traducciones. No.15.
- Scheu S. 2002. The soil food web: structure and perspectives. European Journal of Soil Biology. 38(1):11-20

- Singer M.J y D.N. Munns. 1999. Soils and Introduction. Prentice-Hall Publishing. New Jersey, United States. 480 pp.
- Singer, M.J. y Ewing, S. 2000. Soil Quality. En: Handbook of Soil Science. Chapter 11 (ed. Sumner, M. E.). CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Shaxson F. y R. Barber. 2005. Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal, el significado de la porosidad del suelo. FAO. Roma, Italia. 105 pp.
- Socarrás A. 2013. Mesofauna edáfica: Indicador biológico de la calidad del suelo. Pastos y forrajes. 36(1):5-13.
- Socarrás A. e I. Izquierdo. 2014. Evaluación de sistemas agroecológico mediante indicadores biológicos de la calidad del suelo: mesofauna edáfica. Pastos y forrajes. 37(1):47-54.
- Socarrás A. y M.E. Rodríguez. 2007. Evaluación de la mesofauna del suelo en áreas rehabilitadas con casuarina y marañon de la zona minera de Moa. Centro agrícola. 34(2):69-74.
- Somarriba E. 1998. ¿Qué es agroforestería? En: Jiménez F. y Vargas A. (Eds). Apuntes de clase del curso corto: Sistemas Agroforestales. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica. Manual Técnico. 32:1-14.
- Stevenson F.J. 1994. Humus chemistry, compositions, reactions. Jhon Wiley & Sons. 512 pp.
- Stevenson F.J. y M.A. Cole. 1999. Cycles of soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, sulfur, micronutrients. Ed. Jhon Wiley & sons, Inc. 427p.
- Stocking M. y N. Murnaghan. 2000. Land degradation, guidelines for field assessment. University of East Anglia. Norwich, UK. 119p.
- Shubani A., H. Changyong, X. Zhengmiao, L. Min y M. El-gharmy. 2001. Impact of soil environment and agronomic practices on microbial/dehydrogenase enzyme activity in soil. A review. Pakistan Journal of Biological Sciences. 4(3):333-338.

- Unger P.W. 1996. Common soil and water conservation practices. En: Soil erosion, conservation, and rehabilitation. Marcel Dekker, New York. 402 pp.
- UNCCD. 1996. United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. [Disponible en] www.unccd.int/convention/text/convention.php.
- UNCCD. 2009. Benefits of sustainable land management. 16pp.
- USDA. 1999. Soli taxonomy. A basic System of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture handbook No. 436. 870 pp.
- Verinumbe I. 1987. Crop production on soil under some forest plantations in te Sahel. Agroforestry Sytems. 5:185-188.
- Wang S., B.J. Fu, G.Y. Gao, X.L. Yao y J. Zhou. 2012. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. Hydrol. Earth Syst. Sci. 16:2883-2892.
- Young A. 1990. Agroforestry for soil conservation. CAB International. Wallingford, United Kingdom,. 276 pp.
- Zuluaga J. y Escobar C. 2000. Efecto del manejo agroforestal en el desarrollo y producción del caucho *Hevea brasiliensis* en áreas del piedemonte del Caquetá. CORPOICA/PRONATTA. Florencia, Caquetá, Colombia. 19 pp.