

**MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO EN SUELOS BAJO AGROSISTEMAS
DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN PUERTO RICO**

Por

Glenny Llinee López Rodríguez

Tesis sometida en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS
en

SUELOS

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ

2008

Aprobado por:

Raúl Macchiavelli, PhD
Miembro, Comité Graduado

Fecha

David Sotomayor Ramírez, PhD
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Eduardo C. Schröder, PhD
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Salvador Salas, PhD
Representante de Estudios
Graduados

Fecha

Miguel Muñoz, PhD
Director de Departamento

Fecha

ABSTRACT

The contribution of annual litter and the nitrogen mineralization rates (NMIN) in the field and in the laboratory were quantified. Three ecosystems were evaluated: 1) unshaded coffee (CSL); 2) shaded coffee (CSM), and 3) secondary forest (BQS) in the municipalities of Jayuya (Oxisol), Lares (Inceptisol) and Las Marías (Ultisol), respectively. The dry matter and N input in litterfall was quantified from monthly samples during a twelve month period and from the N concentration in litterfall. The highest litterfall input was in CSM, followed by BQS, and CSL with mean values of 2.2, 1.8, and 1.4 ton dry matter $\text{ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$, respectively. The largest litter N contribution was in CSM in the three locations with average 52 $\text{kg N ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ followed by BQS with 44 $\text{kg N ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$. Field N mineralization in Las Marías was significantly higher in BQS and CSM than CSL. The cumulative NMIN extrapolated on an annual basis was 102 $\text{kg N ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ in BQS, 96 $\text{kg N ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ in CSM, and 49 $\text{kg N ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ in CSL. Under laboratory conditions the N mineralized in 17 weeks was significantly higher in CSM and BQS than CSL with values of 42, 38, and 34 $\text{kg}^{-1} \text{N ha}^{-1}$, respectively. The N contribution from litterfall was 34, 60 and 55% of the total N mineralized in CSL, CSM, and BQS, respectively. Nitrogen mineralization was higher in the laboratory than in the field due to soil disturbance during sieving. The greater soil N mineralization in forest and shaded coffee demonstrates decreased ecosystem sustainability in sun-grown coffee.

RESUMEN

Se cuantificaron la aportación anual de hojarasca y las tasas de mineralización de nitrógeno en condiciones de campo y laboratorio. Se evaluaron tres ecosistemas: 1) café al sol (CSL), 2) café bajo sombra (CSM) y 3) bosque secundario (BQS) en los municipios de Jayuya (Oxisol), Lares (Inceptisol) y Las Marías (Ultisol), respectivamente. Se cuantificó la aportación de hojarasca y la entrada de N mensualmente durante un período de doce meses y la concentración de N en la hojarasca. La mayor aportación de hojarasca fue en CSM, seguido por BQS y CSL con valores promedios en las tres localidades de 2.2, 1.8 y 1.4 ton ha⁻¹ año⁻¹ de materia seca, respectivamente. La mayor contribución de N en la hojarasca fue en CSM en las tres localidades con promedio de 52 kg N ha⁻¹ año⁻¹, seguido por BQS con valores de 44 kg N ha⁻¹ año⁻¹. La mineralización de N (NMIN) en el campo en Las Marías fue significativamente mayor en BQS y en CSM con respecto a CSL. El valor acumulativo de NMIN extrapolado a un año fue 102 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en BQS, 96 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSM y 49 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSL. En condiciones de laboratorio el N mineralizado durante 17 semanas fue significativamente mayor en CSM y en BQS con respecto a CSL con valores de 42, 38 y 34 kg N ha⁻¹, respectivamente. La contribución de N de la hojarasca fue 34, 60 y 55% del total del N mineralizado en CSL, CSM y BQS, respectivamente. La mineralización de N fue más alta en el laboratorio que en el campo debido a que el suelo se disturbó durante el tamizado. La mayor mineralización de N en el suelo en el bosque y en café bajo sombra demuestra una menor sostenibilidad en el ecosistema de café al sol.

Copyright. © 2008. Glenny Llinee López Rodríguez
Todos los derechos reservados.

DEDICATORIA

A mis padres:
Luz María Rodríguez de López y José Ramón López Rodríguez

A mis hermanos y hermana:
Iván José, Rigoberto de Jesús y Gaudy Miropy

Con mucho cariño a:
Rafael Antonio Liranzo Collado (Tony)

A mis sobrinitos:
Rigoberto y José Rafael

A mi gran amiga:
Betty

AGRADECIMIENTOS

A Papito Dios, por ser mi fortaleza y mi refugio en los tiempos más difíciles, por ayudarme en este camino arduo de tres años de desempeño durante la maestría, por darme fuerzas al estar lejos de mi país y de los míos, por colocar en mi camino personas buenas y colaboradoras.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que me apoyaron durante el transcurso de la maestría.

Al Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales- IDIAF, al Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal- CEDAF y al Consejo Nacional de Investigaciones Agropecuarias y Forestales- CONIAF quienes fueron las entidades colaboradoras en el apoyo económico otorgado durante todo el período de estudios.

Al programa SARE (Sustainable Agriculture Research and Education-USDA (LS04-162)- por el financiamiento de la investigación.

Departamento de Agricultura de Estados Unidos- USDA-ARS-TARS- en las personas del Dr. Ricardo Goenaga, Químicos Ulises Chardón Alcázar y Delvis Pérez por ser entes consejeros y colaboradores en el trabajo arduo de procesamiento de muestras en el análisis químico.

Al personal del Depto. Agronomía y Suelos de la Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez por su colaboración, en especial al Dr. Miguel Muñoz.

Al Dr. Eduardo Schröder, por acogerme como su estudiante graduada, ser mi tutor y colaborar en el desenvolvimiento de esta investigación.

Al Dr. Raúl Macchiavelli y Dr. David Sotomayor por haber formado parte de mi comité graduado, por su interés y colaboración en el proceso de la investigación.

A mi gran compañero y amigo Winston Marte por cederme esta oportunidad.

A la Familia Gómez Fernández: Milagros, Fino, Jessica y Vladimir por brindarme su hogar durante el tiempo de estudios.

A Rosa Julia Alequín de Gómez, Ernesto Gómez y Lowis Ernesto Gómez.

A la Finca Buena Vista (Sr. Pedro Pons y Familia), en Lares, Finca Wendolí (Sr. William Medina y Familia), en Jayuya, Finca Serrallés (Sr. Angel Santiago), en Jayuya, Miguel Avilés y Dominga Irrizarry, en Las Marías por permitirnos realizar las investigaciones de campo en sus fincas cafetaleras.

A Betty, Jorge, Ixia Avilés, Feliciano Andújar, Melissa Matos, Javier, Gloria Aguilar, Lionel Cruz, Katherine Quiñones, Kathia Avilés, Emmanuel Feliciano, Jackeline Vega, Miguel Arango, Manuel Santana, José Miguel García, Manuel Pérez Cuevas, Edward Roa, Ronald Dorcinvil, Rocío Suárez, Alexander Recamán, Gerson Ardila, Héctor Pino, Evelyn Roselló, Floripe, Gisela, Lourdes Matos, Lourdes Cataquet y a todos que de una forma u otra colaboraron, muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Contenido	Página
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE APÉNDICES	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Origen del café.....	4
3.2 Distribución del café en el mundo	4
3.3 Cultivo de café en Puerto Rico	5
3.4 Uso de sombra en plantaciones de café.....	7
3.5 Aportación de biomasa y materia orgánica por hojarasca	9
3.6 El ciclo del nitrógeno en el cultivo de café	10
3.7 Mineralización potencial del nitrógeno en el suelo.....	13
3.8 Mineralización del nitrógeno en condiciones de campo.....	13
3.9 Mineralización neta del nitrógeno	14
3.10 Factores que afectan mineralización del nitrógeno.....	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS	17
4.1 Descripción de los lugares de estudio	17
4.2 Establecimiento de parcelas experimentales.....	19
4.3.1 Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de producción de café y bosque	20
4.3.2 Mineralización de N en un suelo Ultisol bajo dos agrosistemas de producción de café y bosque en condiciones de campo.....	25
4.3.3 Mineralización de N en condiciones de laboratorio	29
5. RESULTADOS	32
5.1 Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de producción café y bosque...	32
5.2 Mineralización de N en condiciones de campo.....	39
5.3 Mineralización de N bajo condiciones de laboratorio.....	45

6. DISCUSIÓN	53
6.1 Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de producción de café y bosque.....	53
6.2 Mineralización de N condiciones de campo.....	57
6.3 Mineralización de N en tres suelos bajo condiciones de laboratorio.....	60
6.4 Mineralización de N en condiciones de campo versus laboratorio	61
6.5 Aplicación del balance de N y porcentaje de eficiencia en café.....	63
7. CONCLUSIONES	67
8. RECOMENDACIONES	69
9. LITERATURA CITADA	70
10. APÉNDICES	80

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Características climatológicas de los ecosistemas bajo estudio.....	18
Cuadro 2. Intervalos de tiempo en los muestreos en el experimento de N mineralizado en campo.....	27
Cuadro 3. Índice de Valor de Importancia (IVI) de las 15 especies de árboles más importantes en el ecosistema BQS en las tres localidades estudiadas.....	32
Cuadro 4. Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies de árboles encontrados en el ecosistema CSM en las tres localidades estudiadas.....	33
Cuadro 5. Tamaño de partículas y densidad aparente de los suelos estudiados.....	33
Cuadro 6. Propiedades químicas de los suelos estudiados a una profundidad de 0-20 cm en CSL, CSM y BQS.....	34
Cuadro 7. Bases, aluminio intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CIC)	35
Cuadro 8. Aportación anual de hojarasca ($\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en CSL, CSM y BQS.....	36
Cuadro 9. Contenido anual de C, N y la razón C:N en la hojarasca proveniente de CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.....	39
Cuadro 10. Coeficientes de correlación (Pearson) de la humedad del suelo, tasa de mineralización, amonificación y nitrificación CSL, CSM y BQS.....	45
Cuadro 11. Coeficientes de correlación (Pearson) de la humedad del suelo, tasa de mineralización, amonificación, nitrificación y hojarasca en CSL, CSM y BQS.....	52
Cuadro 12. Producción de hojarasca y aportación de N en bosques tropicales del mundo.....	53
Cuadro 13. Producción de residuos naturales y de poda en sistemas de café en asociaciones agroforestales.....	56
Cuadro 14. Tasas de amonificación, nitrificación y mineralización de N reportadas en suelos tropicales del mundo.....	59
Cuadro 15. Balance de N en café al sol y café bajo sombra en Las Marías.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Zona Cafetalera de Puerto Rico.....	5
Figura 2. El ciclo del Nitrógeno.....	11
Figura 3. Mapa de Puerto Rico identificando los municipios donde se establecieron los experimentos.....	17
Figura 4. Zonas de vida de Holdridge aplicado a Puerto Rico.....	20
Figura 5. Canasta para la recolección de hojarasca.....	24
Figura 6. Muestras incubadas en tubos (a) y no incubadas (b), respectivamente.....	26
Figura 7. Método de saturación (a) y recipientes usados en la incubación de suelos (b).	30
Figura 8. Promedio mensual de hojarasca en la localidad de Jayuya ($\text{ton ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$). ...	37
Figura 9. Promedio mensual de hojarasca en la localidad de Lares ($\text{ton ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$). ...	37
Figura 10. Promedio mensual de hojarasca en Las Marías ($\text{ton ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$).....	38
Figura 11. Tasas de amonificación (a) y nitrificación (b) en CSL, CSM y BQS en el tiempo.....	40
Figura 12. Tasa de N mineralizado en CSL, CSM y BQS en condiciones de campo. ...	42
Figura 13. Promedio de la tasa de mineralización neta de N cuantificada en un período de veinticuatro semanas en ecosistemas de CSL, CSM y BQS en campo.	42
Figura 14. Valores cumulativos basados en la tasa de mineralización neta de N en ecosistemas de CSL, CSM y BQS en condiciones de campo.....	43
Figura 15. Porcentaje de humedad gravimétrica del suelo en dos agrosistemas de café (CSL y CSM) y un bosque secundario (BQS).....	44
Figura 16. Tasa promedio de mineralización de N en un Oxisol bajo CSL, CSM y BQS con y sin la adición de hojarasca.....	45
Figura 17. N mineralizado en un Inceptisol bajo CSL, CSM y BQS con y sin la adición de hojarasca.....	46
Figura 18. N mineralizado en un Ultisol bajo CSL, CSM y BQS con y sin la adición de hojarasca.....	46
Figura 19. Mineralización de N en hojarasca proveniente de CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.....	47

Figura 20. Tasa neta de mineralización de N en CSL, CSM y BQS en un Oxisol.	48
Figura 21. Tasa neta de mineralización de N en CSL, CSM y BQS en un Inceptisol...	49
Figura 22. Tasa neta de mineralización de N en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.	49
Figura 23. Valores cumulativos de mineralización de nitrógeno en suelos con adición de hojarasca bajo ecosistemas de café cuantificada en un período de diecisiete semanas en condiciones de laboratorio.....	50
Figura 24. Cálculo de balance de N en café al sol y café bajo sombra	63

ÍNDICE DE APÉNDICES

Contenido	Página
Apéndice 1. Descripción general de las fincas donde se establecieron las parcelas experimentales bajo estudio.....	81
Apéndice 2. Formulario de inventario de la flora en las zonas estudiadas.....	82
Apéndice 3. Lista general de la vegetación encontrada en las zonas de estudio.....	83
Apéndice 4. Características generales del suelo Oxisol (Los Guineos- LgE).....	85
Apéndice 5. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSM y BQS en Jayuya (Suelo Oxisol).....	86
Apéndice 6. Características generales del suelo Oxisol (Los Guineos- LgF).....	86
Apéndice 7. Mapa de suelos y localización de parcela experimental CSL en Jayuya (Suelo Oxisol).....	88
Apéndice 8. Características generales del suelo Inceptisol (Anones- AoF2).....	88
Apéndice 9. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSL y BQS en Lares.....	89
Apéndice 10. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSM en Lares.....	90
Apéndice 11. Características generales del suelo Ultisol (Humatas- HmE2).....	91
Apéndice 12. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSL y BQS en Las Marías.....	92
Apéndice 13. Mapa de suelos y localización de parcela experimental CSM en Las Marías.....	93
Apéndice 14. Croquis No. 1. Aportación anual de hojarasca en suelos bajo dos agrosistemas de producción de café y un bosque secundario.....	95
Apéndice 15. Croquis No. 2. Mineralización de N <i>in situ</i> en dos agrosistemas de producción de café y bosque secundario en un Ultisol.....	96
Apéndice 16. Croquis No. 3. Mineralización de N en suelos bajo dos agrosistemas de café y un bosque en condiciones de laboratorio.....	97
Apéndice 17. Mineralización de N en un Ultisol bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de campo.....	98

Apéndice 18. Mineralización de N en un Oxisol con y sin adición de hojarasca bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de laboratorio.....	99
Apéndice 19. Mineralización de N en un Inceptisol con y sin hojarasca bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de laboratorio.	100
Apéndice 20. Mineralización de N en un Ultisol con y sin adición de hojarasca bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de laboratorio.....	101
Apéndice 21. ANOVA. Aportación promedio anual de hojarasca en CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.....	102
Apéndice 22. ANOVA del contenido de Carbono en la hojarasca proveniente de en CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.....	102
Apéndice 23. ANOVA del contenido de Nitrógeno en la hojarasca proveniente de en CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.....	102
Apéndice 24. ANOVA de tasa de amonificación en CSL, CSM y BQS en un Ultisol..	103
Apéndice 25. ANOVA de tasa de nitrificación en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.....	103
Apéndice 26. ANOVA de tasa de NMIN en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.	103
Apéndice 27. Prueba de Tukey (5%) para la tasa de NMIN acumulativa en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.	104
Apéndice 28. ANOVA de NMIN suelo sin hojarasca (control) CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.	104
Apéndice 29. ANOVA de NMIN suelo con adición de hojarasca en CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.	104
Apéndice 30. ANOVA de NMIN de hojarasca en CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.....	105
Apéndice 31. Prueba de Tukey (5%) para la tasa de NMIN acumulativa en CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.....	105
Apéndice 32. Humedad del suelo (A) Oxisol, (B) Inceptisol y (C) Ultisol incubados en condiciones de laboratorio.....	106

MINERALIZACIÓN DE NITRÓGENO EN SUELOS BAJO AGROSISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) EN PUERTO RICO

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de café es uno de los cultivos más importantes para varios países de América Latina y El Caribe. En más de una docena de países es el producto agrícola que representa la mayor generación de divisas (Quintero y Ataroff, 1998). Para Puerto Rico, es el cultivo agrícola de mayor importancia social, económica y ecológica en la zona montañosa. Hoy en día cuenta con aproximadamente unas 22 mil hectáreas dedicadas a la siembra del cultivo (Alvarado y Monroig-Inglés, 2007). En Puerto Rico se encuentra entre los rubros agrícolas de mayor producción se encuentra en el tercer lugar en importancia económica. La producción de café oro en el período 2006-2007 fue de 19,075.50 toneladas con un valor de \$53,471 millones de dólares, aportando a la economía puertorriqueña un 7.3% del ingreso bruto agrícola (Cifras preliminares, DAPR, 2008).

En el año 1828 Puerto Rico contaba con unas 7 mil hectáreas dedicadas a la producción de café bajo sombra y para inicios del siglo XX el número incrementó a alrededor de unas 77 mil hectáreas. A partir del año 1916 esta cifra disminuyó hasta llegar a unas 57 mil hectáreas cerca del año 1948 (Weaver y Birdsey, 1986). Muchos caficultores renunciaron a esta práctica y abandonaron las plantaciones de café debido a diversos factores, tales como: las plantaciones tenían más de 30 años, no había una buena distribución de sombra en el cultivo y en algunos casos los árboles de café se encontraban con un sobre-crecimiento de sombra o las fincas estaban cubiertas de densa cobertura y con disponibilidad de poca mano de obra (Weaver y Birdsey, 1986).

En los años 60's, el Departamento de Agricultura de Puerto Rico incentivó el cambio de plantaciones de café con sombra a plantaciones de café al sol. Promovieron el uso de plantas provenientes de germoplasmas mejorados y el aumento de la densidad de siembra con la finalidad de obtener mayor producción en las cosechas (Borkhataria, 1993). La plantación como monocultivo demanda la aplicación intensiva de plaguicidas para el control de plagas y enfermedades y aplicaciones de fertilizantes inorgánicos (Babbar y Zak, 1995). En Puerto Rico se han recomendado aplicaciones desde 170 hasta 340 kg de N ha⁻¹ año⁻¹ en plantaciones mayores de cuatro años de establecidas (Vicente-Chandler *et al.*, 1968).

El nitrógeno (N) es uno de los nutrimentos esenciales en el cultivo. El N en forma de NH₄⁺ y NO₃⁻ ingresan al suelo por medio: (a) del N orgánico que se ha mineralizado en el suelo, (b) de la descomposición de residuos de plantas y enmiendas orgánicas o (c) de la aplicación de fertilizantes nitrogenados. El uso ineficiente de fertilizantes pueden causar daños al medioambiente tales como: escorrentía, lixiviación del N en forma de nitrato (NO₃⁻-N) o pérdidas en forma gaseosa por denitrificación y/o volatilización, entre otros (Rice y Havlin, 1994). Actualmente existe un marcado interés en buscar alternativas que minimicen el impacto ambiental, aumenten la biodiversidad, pero sobre todo que mejoren la calidad y fertilidad del suelo, reduzcan la erosión y los costos de producción por uso de fertilizantes. Por ende, se hace necesario buscar alternativas que disminuyan las entradas de N inorgánico al suelo para la producción del cultivo.

2. OBJETIVOS

Esta tesis tiene como objetivos:

1. Cuantificar la aportación anual de hojarasca y su contribución de N en suelos bajo dos agrosistemas de producción de café (café al sol y café bajo sombra) y un bosque secundario.
2. Cuantificar las tasas de N mineralizado ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ y $\text{NO}_3^-\text{-N}$) en suelos bajo dos agrosistemas de producción de café (café al sol y café bajo sombra) y un bosque secundario en condiciones de campo y laboratorio.

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 : Hay una mayor cantidad de N mineralizado en ecosistemas de café bajo sombra que en café al sol.

H_a : No hay una mayor cantidad de N mineralizado en ecosistemas de café bajo sombra que en café al sol.

Estas hipótesis se plantearon debido a que en los ecosistemas de café bajo sombra y bosque secundario hay una mayor contribución de hojarasca. Las especies leguminosas en el café bajo sombra mejoran la disponibilidad de N para las plantas a través de la fijación y reciclaje de N.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Origen del café

La planta de café (*Coffea arabica* L.) es oriunda de Etiopía, en donde creció bajo sombra de árboles y en regiones con altitudes entre los 1600 y 1800 msnm, a una temperatura media anual de 20°C y precipitaciones entre 1600 y 2000 mm por año (Maestri y Barros, 1981). En el siglo XIV, los árabes fueron los primeros en descubrir las posibilidades económicas del café. Ellos cultivaron la primera planta de café y aprendieron la manera de tostar el café para venderlo e introducir la bebida a los europeos en el año 1600. Después de viajar a través de la península arábiga y Europa, fue traído a las islas del Caribe desde Francia. Se introdujo a Puerto Rico alrededor del año 1736 donde creció siempre bajo árboles de sombra y se estableció como cultivo en el año 1755 (Mondoñedo, 1957).

3.2 Distribución del café en el mundo

Al presente la producción mundial de café está influenciada en distintos sentidos por el comportamiento del mercado mundial. Para el período 2006-2007 habían 54 países productores de café (ICO, 2008). Los principales países productores de café son Brasil, Vietnam, Colombia e Indonesia. Brasil produce casi el 31% del café mundial, mientras Vietnam se acerca al 15%. La producción mundial de café para el período 2006-2007 fue alrededor de 118 millones de sacos de 60 kg de café oro (ICO, 2008).

3.3 Cultivo de café en Puerto Rico

A pesar de los altos costos de producción por insumos, escasez de mano de obra, regulaciones ambientales y fenómenos climáticos, muchos agricultores producen café en Puerto Rico a mediana y pequeña escala y con recursos limitados (USDA, 2004; Alamo, 2005). La región cafetalera comprende los municipios de: Adjuntas, Ciales, Jayuya, Lares, Maricao, Las Marías, San Sebastián y Utuado. Además, incluye barrios de los municipios de: Añasco, Guayanilla, Juana Díaz, Mayagüez, Moca, Orocovis, Peñuelas, Sabana Grande, San Germán, Villalba y Yauco, como indica la figura 1 (Muñiz-Torres y Monroig-Inglés, 1994).

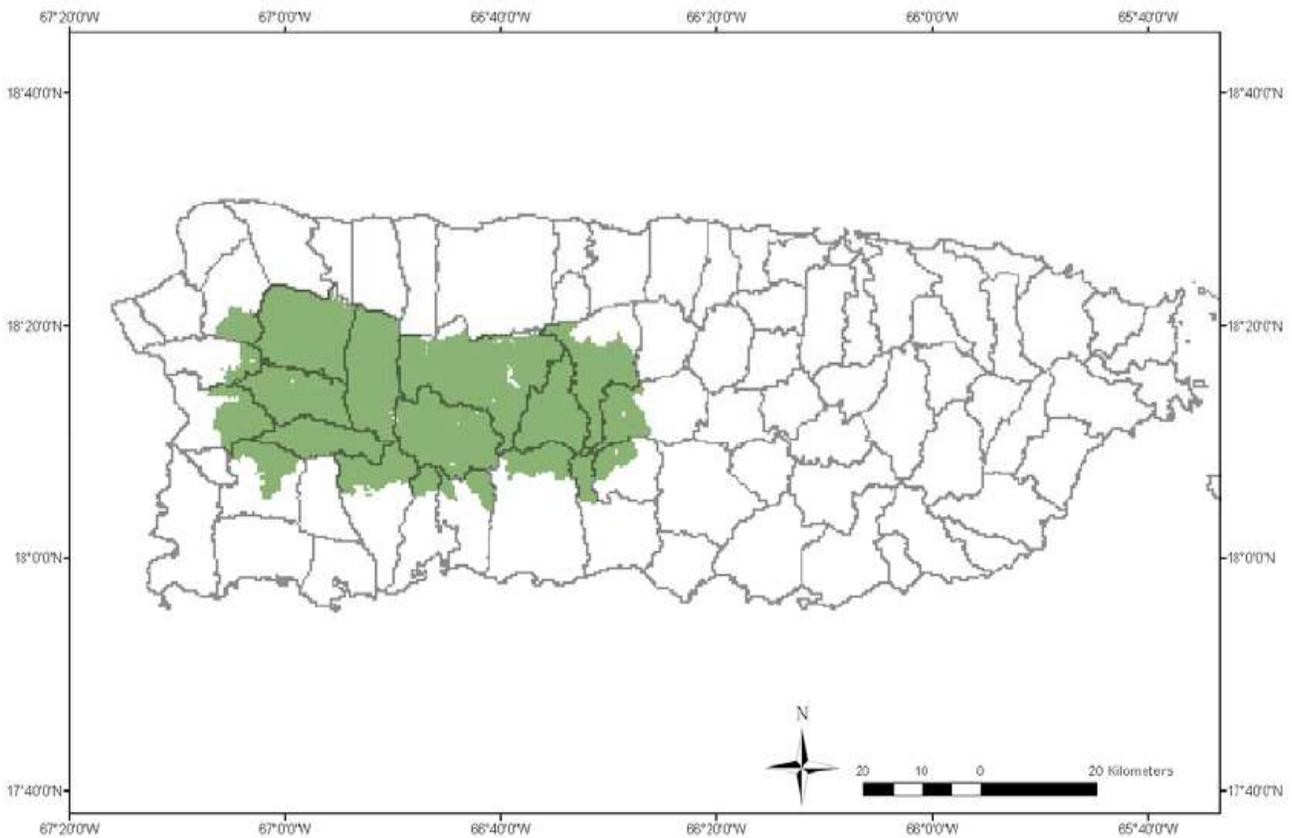


Figura 1. Zona Cafetalera de Puerto Rico (Muñiz-Torres y Monroig-Inglés, 1994).

La empresa de café la componen 9,800 productores en 22,617 hectáreas (aproximadamente, el 60% corresponde a café al sol y el 40% a café a sombra), 25,000 trabajadores agrícolas (representando 47% del empleo agrícola), 116 beneficiadores y 45 torrefactores con 110 marcas registradas. Involucra de manera directa o indirecta a 200,000 residentes de la zona rural de la isla (Monroig-Ingles, 2008).

Según el conjunto tecnológico para la producción de café (1999), algunas características y factores ecológicos predominantes en la zona cafetalera son:

- a) Temperatura: fluctúa entre 20°C y 27°C, con un promedio anual de 24°C.
- b) Precipitación: se encuentra bien distribuida, variando de 1900 a 2400 mm durante el año. Desde diciembre hasta principios de abril existe un periodo de sequía.
- c) Humedad relativa: el promedio oscila entre 70 y 85%.
- d) Altitud: en Puerto Rico el café se cultiva entre los 150 a 1900 metros de altura.
- e) Suelos: los suelos pertenecientes a la zona cafetalera por lo general son arcillosos, de pH ácidos y presentan baja fertilidad natural. Los órdenes de suelos predominantes en dicha zona son: Ultisoles (42%), Inceptisoles (32%) y Oxisoles (12%). Estos suelos son aptos para el desarrollo del cultivo de café, ya que presentan condiciones excelentes para el cultivo del café por ser suelos profundos con un contenido de materia orgánica de 3 a 6%, de buen drenaje, moderadamente pesados y su pH oscila entre 4.0 y 5.5.

3.4 Uso de sombra en plantaciones de café

La producción de café a plena exposición solar o bajo sombra ha sido objeto de discusión desde el siglo XIX (Beer *et al.*, 1998). En los agrosistemas de café, el suelo es uno de los componentes elementales y entre sus propiedades químicas, el contenido de materia orgánica es de fundamental importancia. Las plantaciones a pleno sol acumulan menos hojarasca que aquellas establecidas bajo sombra regulada, lo que hace que el suelo en las primeras sea más susceptible a la erosión y al crecimiento de malezas (Fournier, 1988). Muschler (1997) menciona que la producción de café, tanto a sol como bajo sombra estará en función de la fertilidad del suelo y de la elevación.

En plantaciones localizadas en suelos sin limitación de nutrimentos y humedad la máxima producción se puede conseguir con la producción de café al sol, sin embargo, en plantaciones localizadas fuera de las condiciones óptimas (elevaciones menores) la producción al sol es mucho menor por causa del estrés debido a las altas temperaturas (Monroig-Inglés, 2000).

El manejo deficiente de la sombra es uno de los problemas que más afecta los cafetales de pequeños productores (Galloway y Beer, 1997). Algunas desventajas en cuanto al uso de sombra en plantaciones de café son: producción potencial, competencia por agua y nutrientes y la incidencia de plagas y enfermedades, siendo la competencia la principal desventaja, especialmente cuando se utiliza exceso de sombra (Beer *et al.*, 1998).

En Costa Rica las especies más utilizadas para sombra permanente de café pertenecen a los géneros *Acacia*, *Albizia*, *Erythrina*, *Inga* y *Leucaena*, tratándose de leguminosas que además de la reducción de la intensidad lumínica, fijan N en el suelo y aportan cantidades notables de residuos vegetales naturales como material de cobertura (Fassbender, 1993). En ese sentido, en Venezuela se ha observado que el uso de leguminosa (*Erythrina* o *Inga*) dentro de las plantaciones de café pueden compensar las exportaciones de N requeridos en la obtención de café pergamino (Aranguren *et al.*, 1982). En Puerto Rico el árbol de sombra más utilizado con este propósito es la guaba (*Inga vera*) (Arango, 2007). En Costa Rica se ha observado que en la asociación del cultivo de café con *Erythrina* el contenido de N en las hojas es ligeramente mayor que cuando está asociado con *Cordia* (Alpizar *et al.*, 1985).

En Puerto Rico, Abruña *et al.* (1965) realizaron estudios de investigaciones en café para determinar los rendimientos de la calidad del café producido por nueve variedades de café arábica desarrollado bajo manejos intensivos de café al sol y café bajo sombra en los municipios de Adjuntas, Villalba y Jayuya. Las nueve variedades de café tuvieron un rendimiento de 60% mayor en el sistema de café al sol con respecto a café a sombra. Según los especialistas en catación de café el cultivado a pleno sol rinde más, pero el que crece bajo sombra tiene mejor sabor y es mejor pagado en el mercado internacional. Otra desventaja que representa el sistema de café al sol es que la plantación al sol tiende a agotarse de forma más rápida por que exige un manejo más intensivo (Abruña *et al.*, 1965).

3.5 Aportación de biomasa y materia orgánica por hojarasca

Los árboles de sombra contribuyen al ciclo del N y mejoran el reciclaje de nutrientes a través de la aportación de N al suelo por la fijación biológica mediante el uso de árboles de la familia Fabaceae y la producción de residuos de raíces e incorporación de hojarasca (Aranguren *et al.*, 1982). La hojarasca juega un papel fundamental en el ciclo de nutrientes y en la transferencia de energía entre planta-suelo. El N devuelto al suelo a través de la hojarasca es ligeramente mayor que el exportado por la cosecha (Quintero y Ataroff, 1998). La caída de hojarasca representa el mayor proceso de transferencia de nutrientes desde las partes aéreas hacia el suelo (Vitousek *et al.*, 1994) y lo protege de los cambios de temperatura y de humedad (Schlatter *et al.*, 2003). Conociendo la aportación de hojarasca en el suelo se puede determinar la contribución de los nutrientes al suelo y por ende el ciclo de los mismos (Palma *et al.*, 2000).

En Costa Rica, Cháves y Molina (2000) cuantificaron la extracción de N en frutos de café. En una cosecha de 2480 kg ha⁻¹ de café pergamino la extracción fue de 242 kg N para la variedad Costa Rica 95 en una cosecha de 2115 kg ha⁻¹ y la extracción fue de 174 kg N en la variedad Catuaí. Broadbent (1984) indica que el N requerido por las plantas puede suministrarse entre un 20-80% a través de la mineralización de la materia orgánica del suelo.

En estudios anteriores se han reportado diferencias de la incorporación de N al suelo en plantaciones de café bajo sombra versus plantaciones de café al sol. Los contenidos de materia orgánica y de N en la mayoría de los suelos están determinados por el clima, la vegetación, el relieve, material parental del suelo, tipo y duración de la

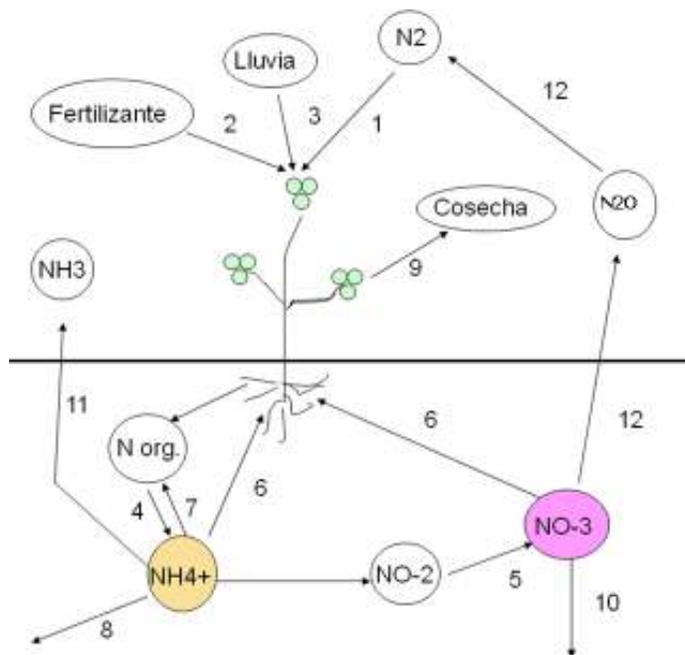
explotación de los suelos y por otras características físicas y microbiológicas (Fassbender y Bornemiza, 1987). En el trópico, la productividad del suelo depende de la conservación y el reciclaje de nutrientes dentro del sistema suelo-planta (Cody *et al.*, 2000). Por tal razón, se ha promovido el uso de especies arbóreas, que además de ofrecer sombra en el cultivo de café y aportar productos comerciales, extraen los nutrimentos desde las capas más profundas del suelo que luego se depositan en la superficie en forma de residuos orgánicos, constituyendo una fuente de reciclaje de nutrientes para los cultivos (Young, 1999).

Los árboles utilizados como sombra en los cafetales contribuyen de forma directa en el ciclo del N debido a que a través de la caída de hojarasca y su posterior descomposición en el suelo, representan un factor importante en la fertilidad de los suelos bajo este cultivo. (Mogollón *et al.*, 1998). Babbar y Zak (1994) cuantificaron una tasa de mineralización de N en suelo con café bajo sombra de $145 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la cual fue más alta que en suelo de cafetales sembrados a plena exposición solar.

3.6 El ciclo del nitrógeno en el cultivo de café

El N es uno de los elementos más abundantes de la tierra, pues en su forma gaseosa (N_2) constituye 78% de la atmósfera. Es también, indispensable para la formación de las principales biomoléculas de los seres vivos. Las plantas lo absorben del suelo en las formas minerales de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-). Sin embargo, 95% del nitrógeno total del suelo está en forma orgánica el cual queda disponible para las plantas debido a transformaciones por acción de los microorganismos del suelo (Dommergues y Mangenot, 1970).

La producción del cultivo de café, por lo general está regulada por los procesos involucrados en el ciclo del N. Este ciclo involucra una serie de reacciones y organismos con diferentes metabolismos. Los procesos principales que componen el ciclo del N son: fijación del N, mineralización, asimilación, nitrificación y denitrificación (Figura 2).



Ganancias de Nitrógeno

1. Fijación biológica de nitrógeno
2. Uso de fertilizantes nitrogenados, minerales u orgánicos
3. Suministro a través de lluvia y sedimentos
4. Mineralización (nitrógeno orgánico a amonio)
5. Oxidación de amonio a nitrito y luego nitrato (Nitrificación)
6. Absorción por raíces de plantas de nitrato y amonio
7. Inmovilización
8. Mineral en sus proteínas adsorción o aún fijación de NH_4^+ por arcillas y materia orgánica

Pérdidas de Nitrógeno

9. Extracción por cultivos;
10. Lixiviación de nitratos
11. Volatilización
12. Denitrificación (reduce nitrato y nitrito a gases (N_2O , N_2) cuando hay poco O^2).

Figura 2. El ciclo del Nitrógeno (FAO, 1995).

Muchos de los procesos que gobiernan su transformación y disponibilidad pueden ser manipulados a través de prácticas de manejo de suelo y de cultivos (Tisdale *et al.*, 1993). Estas prácticas alteran el ambiente edáfico y modifican las condiciones ambientales favorables para la actividad microbiana, organismos responsables de las transformaciones del N.

a) Fijación de nitrógeno

La fijación de N consiste en la reducción del N atmosférico a compuestos nitrogenados para formar principalmente amoníaco por medio de la enzima nitrogenasa. La fijación del N desde el estado gaseoso a la forma orgánica se lleva a cabo biológicamente por microorganismos especializados: bacterias (*Rhizobium* y *Frankia*) y cianobacterias (algas azul-verdes), que convierten el N₂ en otras formas químicas (amonio y nitratos) asimilables por las plantas. Roskoski (1982) encontró una mayor fijación de N en suelos de cafetales bajo sombra con *Inga junicuil* (40 kg ha⁻¹ año⁻¹), en comparación con suelos de cafetales bajo sombra con *I. vera*, la cual alcanzó sólo 1 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N fijado debido a su ausencia de nodulación. Estos resultados son indicativos de que la fijación de N por leguminosas adicionales al cultivo puede ser una fuente importante de N para estos agroecosistemas.

b) Mineralización del nitrógeno y nitrificación

La ciencia ha demostrado que la vía normal de ingreso de N a las plantas proviene del suelo, y para ser absorbido, se debe encontrar mineralizado, como nitrato y amonio. Sin embargo, debido a que se acumula principalmente en formas orgánicas en el suelo se hace necesaria su transformación microbiana conocida como mineralización de nitrógeno para hacerlo disponible para las plantas (Urzúa, 2000).

La mineralización de la materia orgánica es un factor de suma importancia en el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, puesto que a través de este proceso se reciclan nutrimentos como nitrógeno, fósforo y azufre y dióxido de carbono (Van Amelsvoort *et al.*, 1988 y Montagnini y Jordan, 2002).

En este proceso influyen el clima, la mineralogía de las arcillas, el estado de los nutrientes del suelo, la actividad de la biota-edáfica y la calidad de los recursos en descomposición (Vogt *et al.*, 1995 y Geissen y Brümer, 1999).

3.7 Mineralización potencial del nitrógeno en el suelo

Stanford y Smith (1972) propusieron el concepto de N potencialmente mineralizable (N_0), refiriéndose a la porción del N orgánico que puede ser convertido por la actividad microbiana a formas inorgánicas solubles (NH_4^+ y NO_3^-). Estimar el N potencialmente mineralizable mediante el N mineralizado es posible incubando una muestra de suelo en un recipiente cerrado durante un tiempo determinado y en condiciones óptimas definidas (Stanford y Smith, 1972 y Varnero, 1980).

3.8 Mineralización del nitrógeno en condiciones de campo

La mayoría de los estudios de mineralización de N han sido conducidos mediante la incubación de muestras de suelo en óptimas condiciones de temperatura y humedad (Navarro *et al.*, 1991). Por lo tanto, para cuantificar la tasa óptima de mineralización la temperatura y la humedad deben encontrarse en un nivel óptimo (Hadas *et al.*, 1986). Esta información permite determinar parámetros que caracterizan el potencial de cada suelo para producir N mineral en un tiempo determinado (Stanford y Smith, 1972 y Bachmeier *et al.*, 1993). Sin embargo, para estimar la mineralización en campo es necesario ajustar dichos parámetros a las condiciones edafo-climáticas que se producen en el campo (Echeverría *et al.*, 1994).

Actualmente existe un creciente interés en evaluar la producción de N *in situ*, mediante métodos de campo que permitan medir el proceso en condiciones ambientales reales. Por ejemplo, Hubbard *et al.* (2008) cuantificaron la mineralización de N en dos suelos (arenoso y arcilloso) sin disturbar con texturas diferentes incubados con gallinaza bajo condiciones de campo. Estos resultados muestran que en experimentos en campo la mineralización de N en muestras sin disturbar puede ser un proceso variable, ya que existe un efecto de la textura y estructura sobre la mineralización del N. El N mineralizado por incubación aeróbica (Bremner, 1965) o incubación anaeróbica (Waring y Bremner, 1964) está correlacionado con el rendimiento o el N asimilado por las plantas en condiciones de campo (Solórzano, 1997).

3.9 Mineralización neta del nitrógeno

La mineralización neta corresponde al resultado del N mineral (NH_4^+ y NO_3^-) presente en el suelo al momento de un análisis químico (Faúndez, 2005). Este término se ha utilizado como un indicador de la disponibilidad de N *in situ*. Su resultado proviene de combinaciones de tasas brutas de procesos que integran el ciclo del N particularmente amonificación, inmovilización y nitrificación (Videla *et al.*, 1996).

La mineralización neta de N en el suelo depende de muchos factores, tales como el contenido en materia orgánica, la humedad y la temperatura del suelo. Un factor importante a considerar en la mineralización de la hojarasca que se añade al suelo es su relación C/N, es decir, la proporción de carbono (C) y nitrógeno (N). Generalmente una relación en la hojarasca de 20 a 25 o menor produce una mineralización neta,

mientras que si estos valores son más altos, entonces los microorganismos que degradan la materia orgánica del suelo consumen más amonio que el que se produce en la descomposición y el resultado es una inmovilización neta.

3.10 Factores que afectan mineralización del nitrógeno

La mineralización de N se puede medir mediante la incubación de una masa de suelo conocida, bajo condiciones de temperatura y humedad controladas por tiempos definidos, determinando el incremento de N inorgánico durante o al finalizar el periodo de incubación (Mardonez, 2000).

Las tasas de mineralización de N dependen de varios factores, entre ellos: el tipo de arcilla, la acidez del suelo, la relación C:N, la capacidad de aireación del suelo la temperatura y la humedad. Este último factor es el que más afecta las tasas de mineralización de N en el trópico, según De las Salas (1987). El efecto del secado y posterior re-humedecimiento del suelo en la mineralización del N ha sido reconocido por varios autores, encontrándose un aumento en la producción de N mineral del suelo seco al aire con respecto a misma producción con suelo fresco. La mineralización del N orgánico es más rápido en condiciones alternas de humedecimiento y secado. Este efecto recibe el nombre de “efecto Birch” (Birch, 1964), quien encontró que el secado del suelo provoca una mineralización más rápida del carbono que del nitrógeno, reduciendo así su relación C:N. Delphin (1986) postula que la mineralización alcanza un óptimo entre valores de humedad de 70% y 80% de la capacidad de campo.

Las transformaciones microbianas que controlan la mineralización del N tienen evoluciones cíclicas diferentes en el transcurso del tiempo e inducen a una mayor o menor producción de N en forma amoniacal o nítrica, dependiendo de la temperatura y el contenido hídrico con el que se encuentre el suelo (Varnero y Schaefer, 1992). La temperatura favorable para la mayoría de los microorganismos heterotróficos oscila entre 20 y 30° C (Faúndez, 2005). García (1999), señala que para poder establecer una comparación entre distintos suelos es necesario que la temperatura y la humedad se encuentren en igual nivel entre suelos.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Descripción de los lugares de estudio

Esta investigación se realizó en tres localidades ubicadas en los municipios de Jayuya, Lares y Las Marías. En cada localidad se establecieron parcelas experimentales bajo tres ecosistemas: dos agrosistemas de café (café al sol y café bajo sombra) y un bosque secundario.

El suelo en Jayuya era un Oxisol de la serie Los Guineos (*very fine, kaolinick, isothermic, Humic Hapludox*), en Lares era un Inceptisol de la serie Anones (*fine, parasequic, isohyperthermic, Humic Drystrudeps*) y en Las Marías el suelo era un Ultisol de la serie Humatas (*very fine, parasequic, isohyperthermic, Typic Haplohumults*) (Figura 3). Estos suelos son representativos de la región cafetalera de Puerto Rico y correspondieron a las series de suelos: y respectivamente (Beinroth *et al.*, 2003).

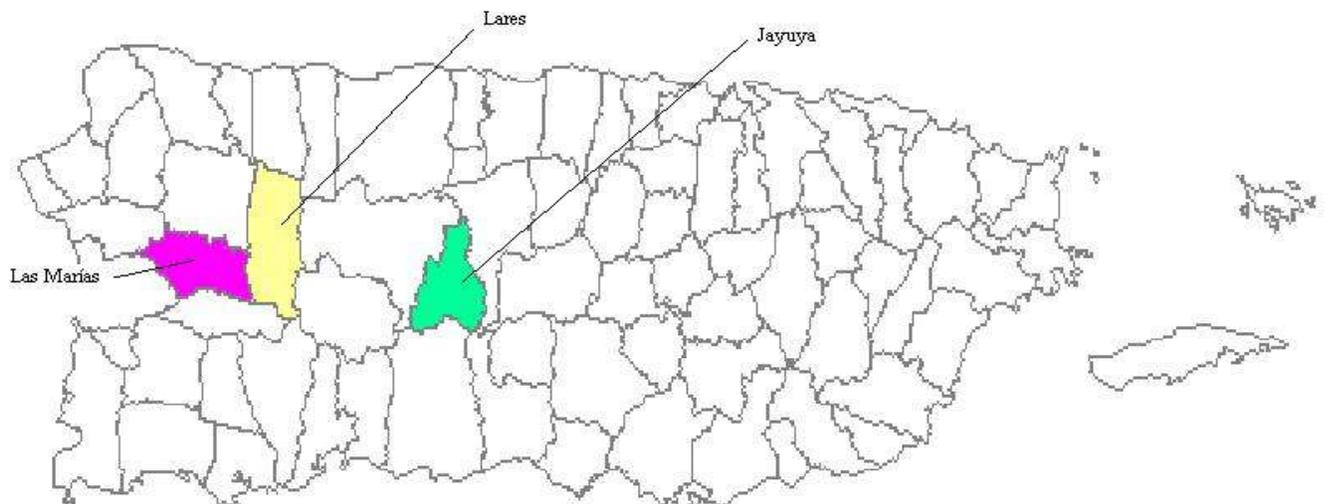


Figura 3. Mapa de Puerto Rico identificando los municipios donde se establecieron los experimentos.

Las características climatológicas relacionadas a los lugares de estudio se muestran en el Cuadro 1. Se establecieron tres repeticiones por ecosistema con una superficie de 400 m² (20 m x 20 m) por unidad experimental.

Cuadro 1. Características climatológicas de los ecosistemas bajo estudio.

Localidad	Ecosistema	Características de las localidades estudiadas				
		Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Elevación (msnm)	Precipitación media anual (mm)	Temp. media anual (°C)
Jayuya	CSL	18°10'05"	66°37'50"	765	1935	23°
	CSM	18°09'41"	66°38'46"	785		
	BQS	18°09'44"	66°38'46"	817		
Lares	CSL	18°11'43"	66°50'55"	575	2290	24°
	CSM	18°11'59"	66°50'49"	636		
	BQS	18°11'46"	66°50'55"	605		
Las Marías	CSL	18°14'44"	67°00'25"	297	1870	26°
	CSM	18°14'39"	67°00'08"	288		
	BQS	18°14'43"	67°00'26"	285		

CSL: café al sol; CSM: café bajo sombra y BQS: bosque secundario; temp=temperatura.

Arango (2007) en un estudio de zonificación agroecológica en la región cafetalera en Puerto Rico generó índices de potencialidades para la producción de café tomando en cuenta las categorías de: (1) óptimo, (2) regular y (3) no óptimo con relación al déficit de humedad, biomasa y aptitud edáfica. De acuerdo a esta clasificación Jayuya tiene un índice 122, Lares de 112 y Las Marías 111. Según la interpretación del mapa de zonificación creado por Arango (2007) Jayuya representa una zona con baja potencialidad, mientras que Lares y Las Marías cuentan con la probabilidad de mediana a alta en obtener buenas cosechas si se toma en consideración un manejo adecuado de la fertilidad del suelo debido a sus características edáficas y climáticas.

4.2 Establecimiento de parcelas experimentales

Las parcelas experimentales se establecieron en octubre 2006 bajo dos agrosistemas de café (CSL y CSM) y un bosque secundario (BQS) en las fincas Wendonlí (CSM y BQS) y Serrallés (CSL) en el barrio La Pica en Jayuya (18° 09' y 18° 10' latitud N y 66° 37' y 66° 38' longitud O, respectivamente), finca Buena Vista (CSL, CSM y BQS) en el barrio Bartolo en Lares (18° 11' latitud N y 66° 50' longitud O) y finca Las Juanitas (CSM) y predio de Miguel Avilés (CSL y BQS) en el barrio Furnias en Las Marías (18° 14' latitud N y 67° 00' longitud O).

Las plantaciones de café fueron manejadas de acuerdo al programa establecido por los dueños y/o administradores de las fincas. La plantación predominante de la especie *arabica* corresponden a las variedades Caturra, Borbón y Limaní. La edad de estas plantaciones se encuentra entre 8 y 15 años. Las plantaciones de CSL tienen una densidad de 3500 plantas por hectárea, mientras que las plantaciones de CSM tienen una densidad de 2500 plantas por hectárea, aproximadamente, según un inventario realizado. Las diferentes fincas realizan entre dos y tres aplicaciones de fertilizante 12-5-15-3 de N, P₂O₅- K₂O, MgO + elementos menores a razón de cuatro onzas por planta durante el año, niveles por debajo de las recomendaciones sugeridas por el Conjunto tecnológico para la producción de café en Puerto Rico (1999).

Las áreas correspondientes a BQS se encuentran en la zona de vida bosque muy húmedo subtropical (BMHST) de acuerdo al sistema de clasificación ecológica de Holdridge (1996) aplicado a Puerto Rico (Figura 4).

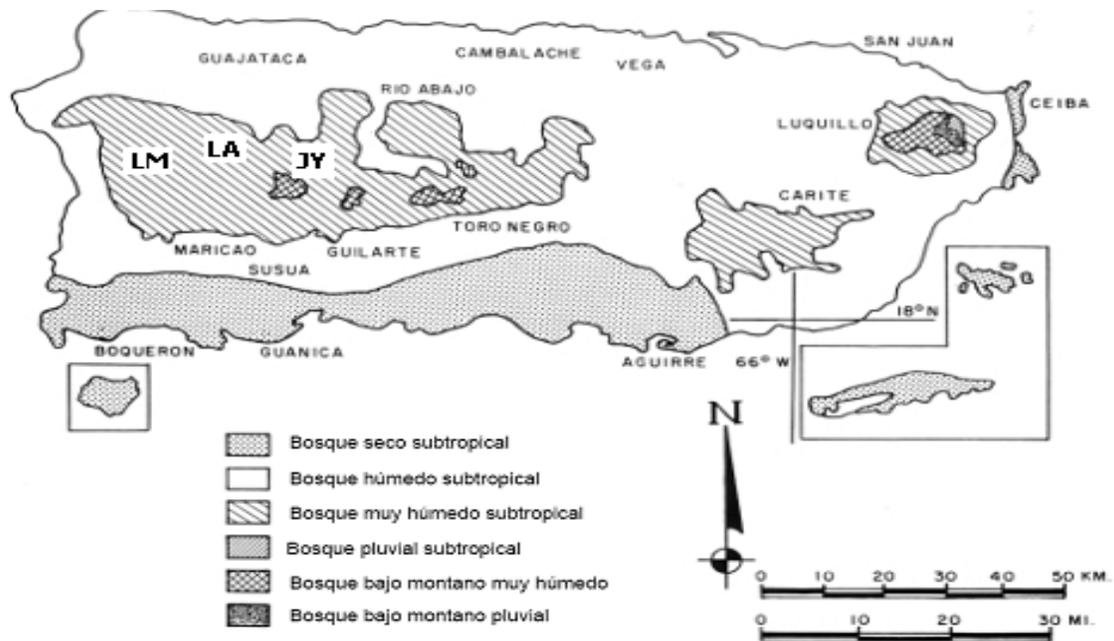


Figura 4. Zonas de vida de Holdridge aplicado a Puerto Rico (Holdridge, 1996).

En esta zona de vida los bosques presentan un dosel con más de veinte metros de altura y una gran diversidad de especies arbóreas. Sin embargo, en el área de estudio se observa que el paisaje es dominado por árboles no mayores de treinta años de edad. Esta información se obtuvo mediante una encuesta que se realizó a los dueños o administradores de las fincas donde se realizó el estudio.

4.3.1 Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de producción de café y bosque

En la primera fase de la investigación se estudió el aportación de hojarasca en dos agrosistemas de café (café al sol (CSL) y café bajo sombra (CSM)) y un bosque (BQS) durante un período de doce meses. Al inicio del establecimiento de las parcelas se realizó un inventario de la flora para la obtención de información sobre el tipo de vegetación y un muestreo de suelos para la determinación de las características físico-químicas (caracterización de los lugares evaluados).

a) Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar (DCA) con arreglo en parcelas subdivididas con tres repeticiones. La localidad constituyó la parcela completa y las subparcelas correspondieron a los ecosistemas (café al sol, café bajo sombra y bosque) y el tiempo de evaluación.

b) Inventario de vegetación

Con la finalidad de clasificar las especies encontradas en los lugares bajo estudio se realizó un inventario de la flora existente en las diferentes áreas correspondientes a las parcelas experimentales. Se contó el número de árboles de café en las parcelas de CSL y CSM para conocer la densidad. En las parcelas de CSM y en BQS todos los árboles con diámetro mayor de 5 cm las variables medidas fueron: la altura de diámetro del pecho (DAP), la altura del árbol y el diámetro de la copa. Se contó el número de tallos de árboles juveniles (menor de 5 cm DAP) ubicados dentro de los límites de las parcelas experimentales. Todos los árboles inventariados se identificaron a nivel de género y especie con la ayuda del libro Árboles comunes de Puerto Rico y las Islas Vírgenes (Little *et al.*, 2001).

Las especies no identificadas en el momento se situaban como desconocidas en el formulario de campo utilizado para estos fines (Apéndice 2), y si se encontraban más de una se enumeraban, se tomaron muestras de flores, hojas y/o fruto y se enviaron al Departamento de Biología en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez. Las especies fueron identificadas por el botánico Gary Breckon.

El inventario se utilizó para la determinación de algunos parámetros ecológicos para ecosistemas de café bajo sombra y bosque secundario. Se aplicó la metodología del Índice de Valor de Importancia (IVI) sugerida por Lamprecht (1990), la cual es una medida de cuantificación obtenida a partir de los parámetros de: abundancia relativa (AR), frecuencia relativa (FR) y dominancia relativa (DR) para asignarle a cada especie su categoría de importancia (Suárez, 2004).

- La abundancia relativa (AR) es la proporción de cada especie con relación a la totalidad de especies evaluadas y se expresa con la siguiente ecuación:

$$AR = \frac{\text{Número tallos especie}}{\text{Total tallos inventariados}} \times 100$$

- La frecuencia relativa (FR) de una especie se obtuvo a partir de la suma de una especie dividido entre la suma de las frecuencias de todas las especies multiplicado por 100 (Suárez, 2004).

$$FR = \frac{\text{Frecuencia absoluta especie}}{\Sigma \text{Frecuencia total especies}} \times 100$$

- La dominancia relativa (DR) es la proporción del área basal de una especie con relación al área basal total (Suárez, 2004).

$$DR = \frac{\text{Área basal especie}}{\text{Total área basal}} \times 100$$

- El índice de Valor de Importancia (IVI) es la media obtenida a partir de la suma de los valores para FR, AR y DR para cada especie.

$$IVI = \frac{AR + FR + DR}{3}$$

c) Muestreo de suelos

Se recolectaron cinco submuestras de suelo por parcela a 20 cm de profundidad; se secaron al aire libre, se homogenizaron y se tamizaron en un cedazo de 2mm de diámetro. Las muestras se analizaron física y químicamente. La textura se determinó por el método Bouyoucos (Day, 1965). La densidad aparente se determinó mediante el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986) a partir de la siguiente expresión:

$$\rho_a = (M_{ss} / V_c)$$

donde: ρ_a es densidad aparente del suelo (g cm^{-3}), M_{ss} es la masa de suelo seco a 105°C (g) y V_c es el volumen del cilindro donde se tomó la muestra del suelo (cm^3).

El $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ y pH_{KCl} se determinó con una relación 1:2 de suelo-agua y suelo- 1M KCl, respectivamente (Thomas, 1996). El carbono orgánico (C) se determinó por el método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996). El N total (N_T) se determinó por el método de Kjeldahl (Bremner, 1996). El fósforo (P) disponible fue extraído por el método de Bray I y determinado por colorimetría (Kuo, 1996). El K^+ , Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiable fueron extraídos con una solución de 0.2 M KNO_3 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó por el método de sumatoria de bases y aluminio (Sumner y Miller, 1996). El amonio se determinó por destilación con arrastre de vapor por Micro-Kjeldahl (Mulvaney, 1996). El Al^{3+} intercambiable fue extraído con una solución 1M KCl y determinado por espectrofotometría de absorción atómica. El porcentaje de saturación de bases (% SB) se calculó con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ SB} = \frac{\Sigma (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+)}{\Sigma (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Al}^{3+})} \times 100$$

d) Recolección de hojarasca (muestreo)

Se construyeron canastas de malla fina para recuperar las porciones vegetales de menor tamaño y permitir a su vez el paso efectivo del agua de lluvia. La superficie de las canastas consistió en un área de 0.5 m x 0.7 m (Figura 5). En cada parcela se colocó una canasta de forma aleatoria con la finalidad de recolectar todo el material que caía dentro.



Figura 5. Canasta para la recolección de hojarasca.

Se muestreó mensualmente durante un período de doce meses. El muestreo inició en noviembre 2006 y finalizó en octubre 2007. El material recolectado cada mes se secó a 60°C hasta obtener peso constante y se tomó el valor del peso en una balanza analítica Sartorius 2357 (Standish *et al.*, 2004). Los datos que se perdieron fueron calculados a base del promedio del mes anterior y posterior. La aportación anual de hojarasca se cuantificó mediante la sumatoria de los valores mensuales y se expresó en términos de $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ de materia seca.

Al finalizar la evaluación se tomó una muestra de la hojarasca recolectada y se envió al laboratorio de Ecología y Microbiología de Suelos de la Universidad de Rhode Island para determinación de C y N total (C_t y N_t). Ambos se determinaron mediante la técnica por combustión en un analizador elemental Carlo-Erba, modelo NA 1500, serie II (Thermo Fisher, Waltham, MA) y se calcularon en base al porcentaje.

e) Análisis estadístico de la hojarasca

Los datos experimentales se evaluaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) en el programa estadístico InfoStat (2006). Los datos correspondientes a la hojarasca y a los contenidos de N_t y C_t se transformaron a raíz cuadrada. Las transformaciones se hicieron para cumplir con los supuestos del análisis de varianza (normalidad y homogeneidad de varianzas). Se utilizó la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) para detectar diferencias entre las medias. Se realizó análisis de correlación de Person para establecer relación entre las variables aportación de hojarasca y el contenido de C y N.

4.3.2 Mineralización de N en un suelo Ultisol bajo dos agrosistemas de producción de café y bosque en condiciones de campo

Se cuantificaron las tasas de mineralización de N en muestras de suelo sin disturbar medidas en condiciones de campo en la localidad de Las Marías. Las parcelas experimentales evaluadas se ubicaron bajo dos agrosistemas de café (café al sol y café bajo sombra) y un bosque secundario. El ensayo se realizó empleando el método reportado por Raison *et al.* (1987) el cual consiste en la determinación de los contenidos de N mineralizado en suelo incubado *in situ*.

Las incubaciones de suelo se realizaron utilizando tubos de cloruro de polivinilo (PVC) de 20 cm de largo por 7 cm de diámetro con orificios que permitían el intercambio de agua y aire insertados en el suelo a 15 cm de profundidad. La parte superior del tubo se tapó con papel de aluminio para evitar la entrada de agua de lluvia (Figura 6a).



Figura 6. Muestras incubadas en tubos (a) y no incubadas (b), respectivamente.

Se insertaron dos tubos por parcela aleatoriamente y en intervalos de tres semanas los tubos eran removidos y reemplazaron por otro set de tubos. En sitios adyacentes a los tubos se tomaron cuatro submuestras de suelo usando un barreno Oakfield (diámetro 2.26 cm) 15 cm de profundidad (Figura 6b). Las evaluaciones se realizaron durante un período de veinticuatro semanas y se realizaron como se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Intervalos de tiempo en los muestreos en el experimento de N mineralizado en campo.

Muestra suelo sin incubar (T _{ns})	Muestra incubada en tubo (T _{ntb})	Tiempo de muestreo
T ₀	-	Al momento de instalación del experimento
T ₁	T ₁	Cada 3 semanas, a partir del momento de la instalación del experimento
T ₂	T ₂	
T ₃	T ₃	
T ₄	T ₄	
T ₅	T ₅	
T ₆	T ₆	
T ₇	T ₇	
-	T ₈	

Los valores al momento del establecimiento del experimento correspondió al tiempo cero (T_{0s}) en la muestra de suelo tomada alrededor de los tubos (sin incubar), T_{1s} es tiempo uno en la muestra sin incubar, y así sucesivamente hasta llegar al último tiempo de muestreo (T_{7s}). El T_{1tb} correspondió al tiempo uno en la muestra de suelo incubada en el tubo, T_{2tb} correspondió al tiempo dos en la muestra del tubo y así sucesivamente hasta llegar al último tiempo de muestreo en el tubo (T_{8tb}).

Las muestras se colocaron en bolsas plásticas e inmediatamente se llevaron al laboratorio donde se prepararon sin alterar la humedad con la que fueron recolectadas en campo y se homogenizaron. Antes del análisis las muestras fueron tamizadas utilizando un tamaño de malla de 5 mm. El contenido de agua en el suelo fue determinado gravimétricamente en una submuestra secada por 24 h a 105° C (Steubing, 2002). Los datos de humedad gravimétrica se utilizaron para la realización de los cálculos en base a peso de suelo seco.

Se evaluó el N inorgánico ($\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NH}_4\text{-N}$) contenido tanto en el suelo incubado en los tubos como fuera de los tubos (no incubado) en cada muestreo. El $\text{NO}_3\text{-N}$ y el $\text{NH}_4\text{-N}$ fueron extraídos siguiendo la metodología descrita por Bremner (1965). Se realizó una extracción de suelo con una solución de KCl 1M utilizando una relación de masa-volumen de 1:4 (10g de suelo húmedo + 40 ml de KCl 1 M). Las muestras se agitaron durante 1 hora con un agitador recíproco a 300 revoluciones por minuto (rpm) y centrifugadas durante 5 minutos a 2500 rpm. La suspensión fue filtrada a través de un papel filtro Whatman No. 42.

El amonio ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) y el nitrato ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) contenidos en el extracto fueron digeridos con MgO y aleación de Devarda, respectivamente. El destilado se recolectó en 5 ml de ácido bórico (Bremner, 1965). Los cálculos se realizaron a partir de la suma de las fracciones del $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ y el $\text{NO}_3^- \text{-N}$. Las tasas de amonificación, nitrificación y mineralización neta (N mineralizado) se cuantificaron a partir de las siguientes expresiones:

 Amonificación neta:	$\Delta \text{NH}_4^+ \text{-N} = \text{NH}_4^+ \text{-N}_{(tb, t)} - \text{NH}_4^+ \text{-N}_{(s, t-1)}$
 Nitrificación neta:	$\Delta \text{NO}_3^- \text{-N} = \text{NO}_3^- \text{-N}_{(tb, t)} - \text{NO}_3^- \text{-N}_{(s, t-1)}$
 Mineralización neta:	$\text{NMIN} = (\Delta \text{NH}_4^+ \text{-N} + \Delta \text{NO}_3^- \text{-N})_t$

donde: $\text{NH}_4^+ \text{-N}_{(tb, t)}$ y $\text{NO}_3^- \text{-N}_{(tb, t)}$ correspondió al amonio y nitrato que se encontró en el suelo incubado en el tubo en el intervalo de tiempo T, mientras que $\text{NH}_4^+ \text{-N}_{(s, t-1)}$ y $\text{NO}_3^- \text{-N}_{(s, t-1)}$, correspondió al amonio y nitrato en el suelo alrededor del tubo en el tiempo T.

Los valores promedios de amonio y nitrato generados a partir de la diferencia entre el suelo dentro del tubo y el suelo fuera del tubo en las ecuaciones anteriores representan la amonificación y la nitrificación netas y la suma de ambos resultados corresponden al N mineralizado. Las tasas de N mineralizado son valores promediados en función del tiempo. Se calcularon valores cumulativos en función del incremento del N mineralizado en cada tiempo evaluado. La tasa anual de mineralización se calculó basada en la extrapolación del valor cumulativo de mineralización en 24 semanas a 52 semanas.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un DCA en parcelas divididas con tres repeticiones. La variable ecosistema (café al sol, café bajo sombra y bosque) constituyó la parcela completa y la variable tiempo correspondió a la subparcela. Los promedios de N mineralizado, valores cumulativos y las tasas de NMIN se evaluaron mediante un ANOVA en Infostat (2006). Se establecieron diferencias entre agrosistemas utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$). Se realizaron análisis de correlación de Pearson para establecer relación entre las variables humedad, NMIN, amonificación y nitrificación.

4.3.3 Mineralización de N en condiciones de laboratorio

Se determinó la mineralización de N en tres suelos (Oxisol, Inceptisol y Ultisol) con y sin la adición de hojarasca proveniente de dos agrosistemas de café (CSL y CSM) y un bosque secundario (BQS) en condiciones de laboratorio aeróbicamente (Apéndice 16).

La hojarasca y el suelo se recolectaron en parcelas experimentales previamente establecidas en Jayuya, Lares y Las Marías. El suelo se tamizó en un tamiz de malla 5 mm, se homogenizó y se colocó en un embudo de vidrio con plato poroso (embudo de Büchner) con volumen de 350 cm³ a razón de 400 g por embudo. El suelo se saturó de abajo hacia arriba y luego se dejó drenar por un período de 48 horas utilizando una columna colgante con la finalidad de obtener una humedad a capacidad de campo (Figura 7a). Posteriormente se colocó en recipientes de plástico de aproximadamente dos litros de volumen para su incubación (Figura 7b).

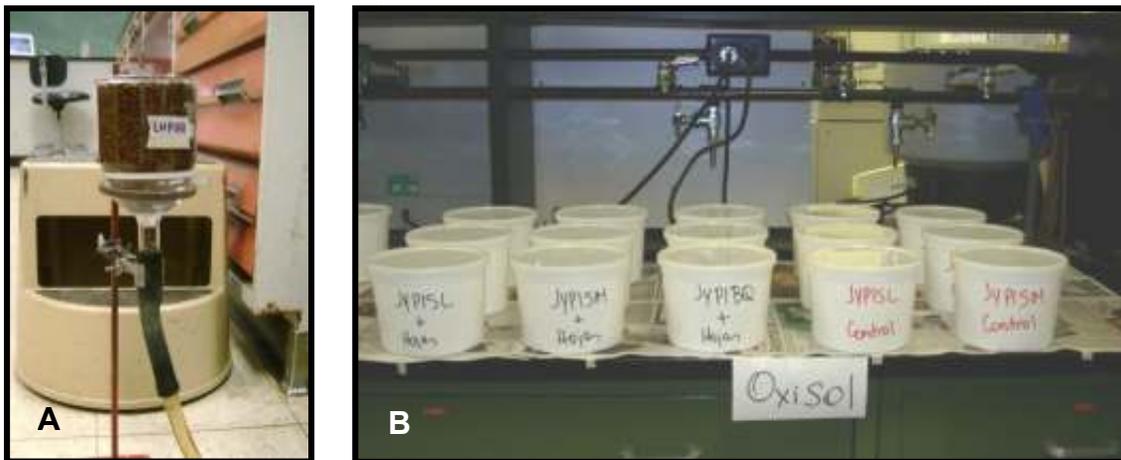


Figura 7. Método de saturación (a) y recipientes usados en la incubación de suelos (b).

El material vegetal se adicionó en dosis equivalentes a 5 ton ha⁻¹ de masa seca, es decir, 1000 mg de material vegetal con una concentración de 0.2 % de N y se mezcló con el suelo. Los recipientes permanecieron cerrados y se destapaban para permitir la entrada de aire. La humedad del suelo se mantuvo a capacidad de campo por pesadas y la temperatura se mantuvo entre 23-25°C hasta que finalizó el experimento. Los recipientes se colocaron en el laboratorio BNF de la Finca Alzamora del Recinto Universitario de Mayagüez en la Universidad de Puerto Rico (N 18° 13' 09" y W 67° 08' 55").

Los muestreos se realizaron a las 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15 y 17 semanas de incubación (Martín y Rivera, 2004). Las evaluaciones para N mineral ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ y $\text{NO}_3^-\text{-N}$) se realizaron siguiendo la metodología descrita por Bremner (1965). El N mineralizado con y sin adición de hojarasca fue evaluado en función del tiempo. Los valores cumulativos de NMIN se calcularon en función del incremento del N mineralizado en cada tiempo evaluado. La tasa de mineralización de N proveniente de la hojarasca se calculó mediante:

$$\text{NMIN}_{\text{hojarasca}} = \text{N}_{\text{suelo con hojarasca}} - \text{N}_{\text{suelo sin hojarasca}}$$

donde: $\text{N}_{\text{suelo con hojarasca}}$ corresponden al N mineralizado en el suelo con adición de hojarasca en el intervalo de tiempo T_0 , mientras que $\text{N}_{\text{suelo sin hojarasca}}$ corresponden al N mineralizado en el suelo solo (control) en el tiempo T_0 , y así sucesivamente hasta el T_{17} en ambos suelos.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un DCA en parcelas subdivididas con tres repeticiones. La variable suelo (Oxisol, Inceptisol y Ultisol) constituyó la parcela completa y las variables ecosistema y tiempo correspondieron a las subparcelas. Los promedios de N mineralizado, valores cumulativos y el N mineralizado en suelo solo, suelo con hojarasca y hojarasca se evaluaron mediante un ANOVA en Infostat (2006). Se establecieron diferencias entre ecosistemas utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$).

5. RESULTADOS

5.1 Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de producción café y bosque

a) Inventario de vegetación: Índice de Valor de Importancia (IVI)

Se encontró la presencia de 39 especies (Apéndice 3) de diferentes hábitos de crecimiento (árboles, arbustos, bejucos y herbáceos). El Cuadro 3 muestra el valor de IVI para las primeras 15 especies que se encontraron en BQS y el cuadro 4 muestra el valor de IVI para todas las especies que se encontraron en CSM en todas las localidades estudiadas.

Cuadro 3. Índice de Valor de Importancia (IVI) de las 15 especies de árboles más importantes en el ecosistema BQS en las tres localidades estudiadas.

Orden	*Género y especie	AR (%)	FR (%)	DR (%)	IVI
1	<i>Spathodea campanulata</i>	25.69	10.96	66.42	34.36
2	<i>Guarea guidonia</i>	15.63	8.22	15.56	13.14
3	<i>Schefflera morototoni</i>	10.07	6.85	5.92	7.61
4	<i>Syzigium jambos</i>	8.33	6.85	2.54	5.91
5	<i>Inga vera</i>	7.29	6.85	0.85	5.00
6	<i>Turpinia occidentalis</i>	5.21	8.22	0.58	4.67
7	<i>Cecropia schreberiana</i>	3.47	8.22	0.72	4.14
8	<i>Psidium guajaba</i>	4.17	5.48	0.70	3.45
9	<i>Andira inermis</i>	0.69	4.11	4.78	3.19
10	<i>Cordia sulcata</i>	2.43	5.48	0.60	2.84
11	<i>Miconia prasina</i>	3.47	4.11	0.71	2.77
12	<i>Clidemia cymosa</i>	3.13	4.11	0.22	2.48
13	<i>Citrus sinensis</i>	2.43	4.11	0.09	2.21
14	<i>Persea americana</i>	1.04	2.74	0.07	1.28
15	<i>Cyathea arborea</i>	1.04	2.74	0.04	1.27

AR: Abundancia Relativa; FR: Frecuencia Relativa; DR: Dominancia Relativa; IVI: Índice de Valor de Importancia. *Los nombres comunes y las familias se encuentran en el apéndice 3.

En todas las localidades estudiadas se observó que las especies *Spathodea campanulata*, *Guarea guidonia*, *Schefflera morototoni*, *Syzigium jambos* e *Inga vera* fueron las 5 especies más importantes en BQS sumando un 66.0% del IVI y 91.3% del total del área basal.

Cuadro 4. Índice de Valor de Importancia (IVI) de las especies de árboles encontrados en el ecosistema CSM en las tres localidades estudiadas.

Orden	Género y especie	AR (%)	FR (%)	DR (%)	IVI
1	<i>Inga vera</i>	48.91	30.44	53.14	44.16
2	<i>Inga laurina</i>	18.48	30.44	39.02	29.31
3	<i>Citrus sinensis</i>	16.30	13.04	2.86	10.74
4	<i>Inga fagifolia</i>	10.87	4.35	4.41	6.54
5	<i>Schefflera morototoni</i>	2.17	8.70	0.33	3.73
6	<i>Desconocidas*</i>	2.17	8.70	0.03	3.63
7	<i>Andira inermis</i>	1.09	4.35	0.23	1.89

AR: Abundancia Relativa; FR: Frecuencia Relativa; DR: Dominancia Relativa; IVI: Índice de Valor de Importancia. *Correspondieron a una misma especie.

Las especies *Inga vera*, *Inga laurina*, *Citrus sinensis* e *Inga fagifolia* fueron las especies más importantes en CSM sumando un 90.8% del IVI y 99.4% del total del área basal en todas las localidades estudiadas.

b) Características físicas y químicas de los suelos estudiados

Al momento del establecimiento del ensayo los suelos correspondientes a las localidades estudiadas presentaron las propiedades físicas mostradas el Cuadro 5. En los tres suelos se encontró una alta proporción de arcilla en todos los ecosistemas evaluados en las diferentes localidades.

Cuadro 5. Tamaño de partículas y densidad aparente de los suelos estudiados.

Localidad	Ecosistema	Arena	Limo	Arcilla	*Da
		%			g cm ⁻³
Jayuya	CSL	16	20	64 ab	1.29 b
	CSM	21	34	46 b	1.05 b
	BQS	25	29	46 b	1.01 a
Lares	CSL	31	23	46 b	1.09 a
	CSM	11	31	58 ab	1.02 a
	BQS	21	23	56 ab	0.91 a
Las Marías	CSL	20	18	62 ab	1.22 a
	CSM	16	20	64 ab	1.05 a
	BQS	24	26	50 ab	1.06 a

*Da = Densidad aparente, CSL=Café al sol, CSM=Café bajo sombra, BQS=Bosque secundario.

*Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) en una misma localidad.

Las proporciones de arcilla excedieron el 60% en CSL en Jayuya y en CSL y CSM en Las Marías. Se encontraron valores correspondientes a la proporción de arcilla entre un 46% y 64% con textura de clasificación arcillosa (USDA, 1975). La densidad aparente del suelo varió desde 0.9 g cm⁻³ hasta 1.3 g cm⁻³. Se encontraron diferencias significativas ($\alpha= 0.05$) entre BQS versus CSL y CSM en Jayuya (Cuadro 5).

Los resultados obtenidos en los análisis químicos se muestran en el Cuadro 6. Los valores de pH tanto en agua como en KCl oscilaron entre 4.3 y 5.9 y desde 3.6 y 5.1, respectivamente. El pH fue menor en CSL y CSM que en BQS en las tres localidades (Cuadro 6).

Cuadro 6. Propiedades químicas de los suelos estudiados a una profundidad de 0-20 cm en CSL, CSM y BQS.

Localidad	Ecosistema	pH _{H2O}	pH _{KCl}	*N _{total}	*MO	*C _{total}	C:N	*P
				%				mg kg ⁻¹
Jayuya	CSL	4.25	3.58	0.26	2.78	1.24	4.77	9.85
	CSM	4.61	3.66	0.34	4.10	1.83	5.38	11.79
	BQS	4.87	3.95	0.44	5.18	2.42	5.50	25.10
Lares	CSL	4.29	3.64	0.19	2.82	1.27	6.68	10.47
	CSM	4.49	3.75	0.21	2.84	1.26	6.00	24.24
	BQS	4.52	3.79	0.30	3.56	2.59	8.63	28.24
Las Marías	CSL	4.31	3.71	0.28	3.36	1.50	5.36	5.64
	CSM	4.32	3.75	0.32	4.43	1.98	6.19	7.18
	BQS	5.92	5.14	0.35	5.96	2.66	7.60	7.67

pH_{H2O}= pH en agua, *pH_{KCl}*= pH con 1M KCl, *N_{total}*= nitrógeno total, *MO* = materia orgánica, *C_{total}*= carbono total, *C:N*= Relación carbono-nitrógeno y *P*= fósforo disponible.

Los resultados correspondientes al contenido de N_{total} en los suelos bajo estudio se encontraron en niveles desde mediano (0.1-0.2%) hasta alto (>0.2%) según la Muñiz-Torres (1986) en las diferentes localidades.

Los valores mínimo y máximo de N_{total} oscilaron desde 0.2% en CSL en la localidad de Lares hasta 0.4% en BQS en la localidad de Jayuya (Cuadro 6). El contenido de MO se encontró en niveles desde mediano (2 - 4%) hasta alto (>4%) (Bertsch, 1995). Los valores mínimos y máximos de MO oscilaron desde 3% hasta 6%, (Cuadro 6). Los valores correspondientes a la relación C:N del suelo se consideraron bajos (menores de 10). El contenido de N_{total} , MO y la razón C:N, mostraron una tendencia aproximadamente similar, los valores fueron superiores en BQS y CSM con respecto a CSL.

La concentración de fósforo disponible (P) presentó valores altos (>20) en BQS en Jayuya (25 mg kg^{-1}) y en BQS y CSM en Lares (28 y 24 mg kg^{-1} , respectivamente). Se encontraron diferencias significativas entre ecosistemas en las tres localidades (Cuadro 6). Los valores más bajos (<10) se obtuvieron en CSL, CSM y BQS en Las Marías (5.6 , 7.2 y 7.7 mg kg^{-1} , respectivamente) (Muñiz-Torres, 1992).

Cuadro 7. Bases, aluminio intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Localidad	Ecosistema	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	*CIC _{efectiva}	*SB (%)
		cmol _c kg ⁻¹						
Jayuya	CSL	0.27	0.08	0.85	0.81	4.98	6.99	28.76
	CSM	0.65	0.06	1.77	0.60	4.39	6.87	36.10
	BQS	0.61	0.06	2.71	0.45	3.63	7.46	51.34
Lares	CSL	0.28	0.37	1.03	0.62	5.34	7.64	30.10
	CSM	0.46	0.11	1.35	0.46	4.95	7.33	32.47
	BQS	0.41	0.41	2.39	0.85	3.36	7.42	54.72
Las Marías	CSL	0.24	0.14	0.94	0.51	6.17	8.00	22.88
	CSM	0.34	0.10	1.47	0.40	4.97	7.28	31.73
	BQS	0.30	0.11	2.30	0.84	2.07	5.62	63.17

*CIC_{efectiva} = bases + aluminio, este valor está subestimado porque no se obtuvieron los protones intercambiables. * SB = saturación bases. No se realizaron análisis estadísticos, se realizó el análisis de suelos para conocer los niveles de los elementos.*

En la localidad de Jayuya el CIC fue mayor en BQS con respecto a CSL y CSM, mientras que en las localidades de Lares y Las Marías este valor fue superior en CSL (Cuadro 7). El aluminio intercambiable (Al^{3+}) fue el catión predominante en el complejo de intercambio en los tres ecosistemas en las diferentes localidades estudiadas.

c) Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de café y bosque

La aportación de hojarasca en agrosistemas de producción de café en las tres localidades estudiadas evaluada mediante una ANOVA indica una interacción significativa ($P \leq 0.05$) entre localidad, ecosistema y tiempo (Apéndice 21).

Cuadro 8. Aportación anual de hojarasca ($ton\ ha^{-1}\ año^{-1}$) en CSL, CSM y BQS.

Ecosistema	Localidad			Media
	Jayuya	Lares	Las Marías	
CSL	1.39 a	1.15 a	1.65 a	1.40 a
CSM	2.09 b	1.97 b	2.37 b	2.15 b
BQS	1.56 ab	2.08 b	1.86 ab	1.83 b
Media	1.68 a	1.73 a	1.96 b	1.79

* Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) en una misma columna.

Para las medias de filas o columnas letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre CSL y CSM en las tres localidades estudiadas (Cuadro 8). La aportación anual de hojarasca en CSM y BQS no difirió significativamente en las tres localidades, siendo CSM mayor en Jayuya y Las Marías con medias de 2.1 y 2.4 $ton\ ha^{-1}\ año^{-1}$, respectivamente. En Lares la aportación de hojarasca en BQS fue mayor con una media de 2.1 $ton\ ha^{-1}\ año^{-1}$ de materia seca. Se observó que la aportación de hojarasca fue baja en CSL en las tres localidades (Cuadro 8).

d) Aportación mensual de hojarasca por localidad en los tres ecosistemas

En Jayuya la mayor aportación mensual de hojarasca se registró en el período agosto-septiembre en CSM (Figura 8). Desde noviembre (2006) hasta mayo (2007) la tendencia fue similar en los tres ecosistemas (BQS) (Figura 8).

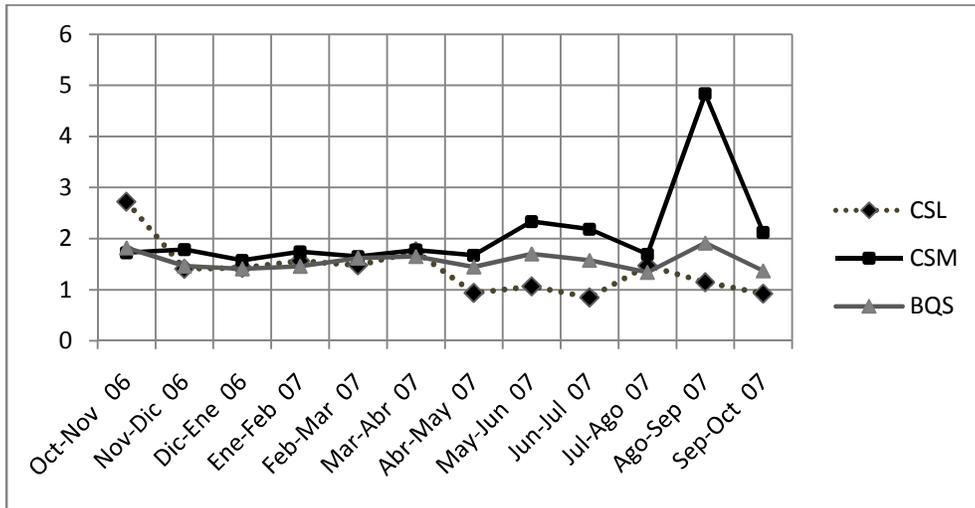


Figura 8. Promedio mensual de hojarasca en la localidad de Jayuya ($\text{ton ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$).

La mayor aportación mensual promedio de hojarasca para la localidad de Lares se registró en los períodos octubre-noviembre en CSL y agosto-septiembre en CSM y BQS, respectivamente (Figura 9).

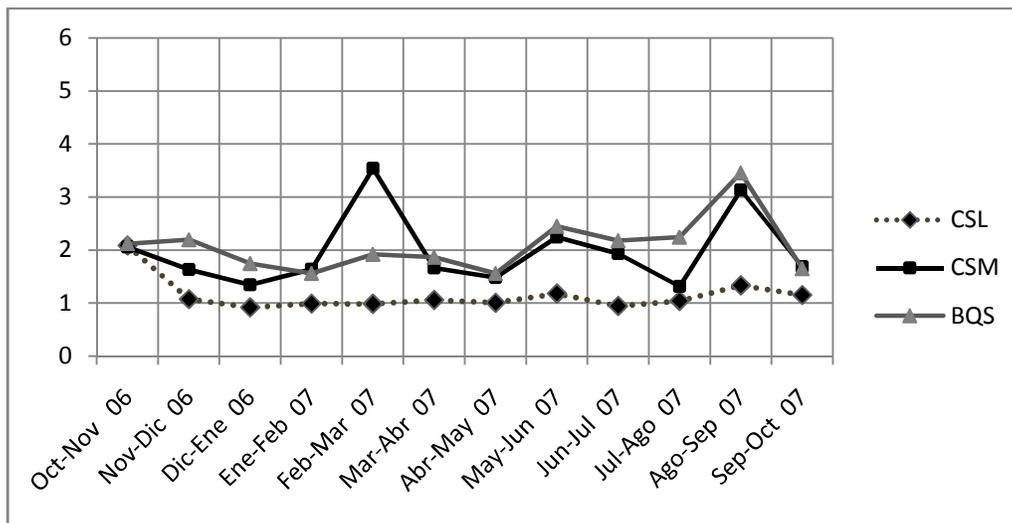


Figura 9. Promedio mensual de hojarasca en la localidad de Lares ($\text{ton ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$).

En Las Marías, la mayor aportación mensual promedio de hojarasca se registró en el período noviembre-diciembre en CSM y BQS. En ese sentido, CSL mostró su mayor aportación en el período febrero-marzo (Figura 10).

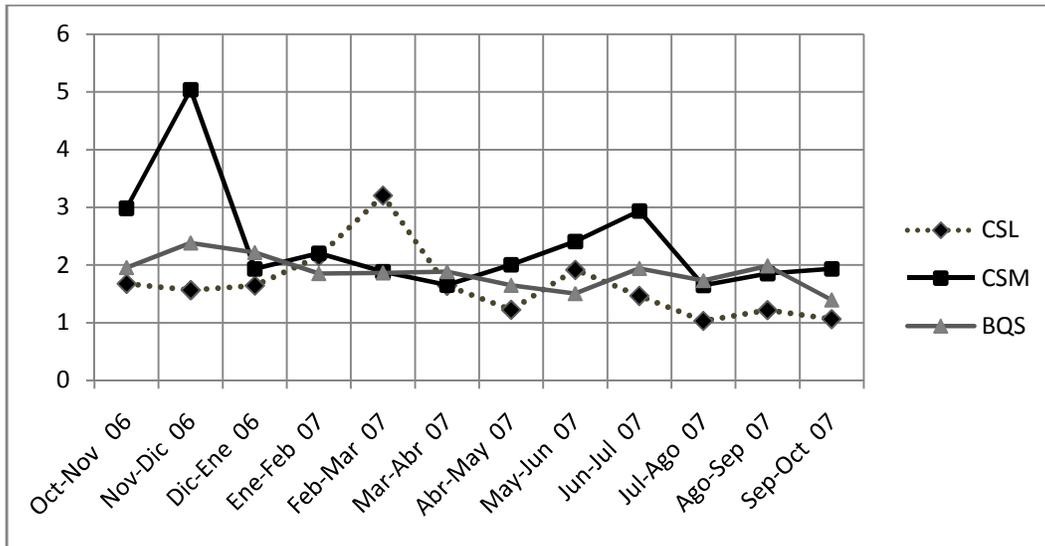


Figura 10. Promedio mensual de hojarasca en Las Marías (ton ha⁻¹ mes⁻¹).

e) Contenido de C y N en la hojarasca proveniente de dos agrosistemas de café y bosque

La deposición de C y N a través de la aportación anual de hojarasca en CSL, CSM y BQS en las tres localidades estudiadas se observan en el cuadro 9. La interacción entre localidad y ecosistema no fue significativa ($p > 0.05$) en las variables C y N (Apéndices 22 y 23).

Se encontraron diferencias significativas en C y N entre CSL y CSM en las tres localidades. En Jayuya y Lares el contenido de C y N tuvo un comportamiento similar. Los valores máximos de C y N se obtuvieron en la hojarasca proveniente de CSM y BQS, mientras que los valores mínimos se registraron en CSL en las tres localidades (Cuadro 9).

La interacción entre localidad y ecosistema no fue significativa ($p>0.05$) para la razón C:N, la cual mostró un comportamiento aproximadamente similar en Lares y Las Marías para los tres ecosistemas. La razón C:N fue menor en BQS con relación a CSL y CSM en Jayuya (Cuadro 9).

Cuadro 9. Contenido anual de C, N y la razón C:N en la hojarasca proveniente de CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.

Ecosistema	Componente	Concentraciones en la hojarasca		Localidad		
		N (%)	C (%)	Jayuya	Lares	Las Marías
CSL	C ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	0.2	0.4	648 a	612 a	536 a
CSM		0.2	0.5	1095 b	1132 b	1111 b
BQS		0.2	0.5	733 ab	960 b	941 b
CSL	N ($\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	0.3	0.5	32 a	29 a	32 a
CSM		0.3	0.5	50 b	50 b	56 b
BQS		0.2	0.5	49 ab	39 ab	41 ab
CSL	Razón C:N	0.3	0.5	20 a	21 a	17 a
CSM		0.2	0.5	22 a	23 a	20 a
BQS		0.2	0.5	15 b	24 ab	23 ab

*Letras distintas en una misma localidad indican diferencias significativas (Tukey, $p\leq 0.05$).

5.2 Mineralización de N en condiciones de campo

a) Tasas de amonificación, nitrificación y mineralización de nitrógeno netas

El resultado de ANOVA para las tasas de amonificación y nitrificación mostró interacción significativa ($p>0.05$) entre ecosistema y tiempo (Apéndice 24, 25 y 26). Se encontraron diferencias significativas ($P\leq 0.05$) en los tres ecosistemas con relación a la tasa amonificación; entre CSL y BQS y entre CSM y BQS en la tasa de nitrificación y entre CSL y CSM y entre CSL y BQS en la tasa de mineralización de N. La tasa de nitrificación en el suelo presentó inicialmente cantidades mayores que la tasa de amonificación a través del tiempo.

Las tasas de amonificación registradas en CSL a las 3, 6, 15, 18 y 21 semanas, en CSM a las 9 y 12 semanas y a las 3 y 18 semanas, en BQS a las 3 y 6 semanas de evaluación estadísticamente no mostraron diferencias significativas. Los valores máximos y mínimos en CSL se observaron a las 6 y 24 semanas de evaluación (2.7 y -4.8 mg kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente); en CSM a las 15 y 9 semanas de evaluación (9.0 y -3.9 mg kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente) y en BQS se registraron a las a las 15 y 24 semanas de evaluación (6.8 y -4.6 mg kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente) (Figura 11a).

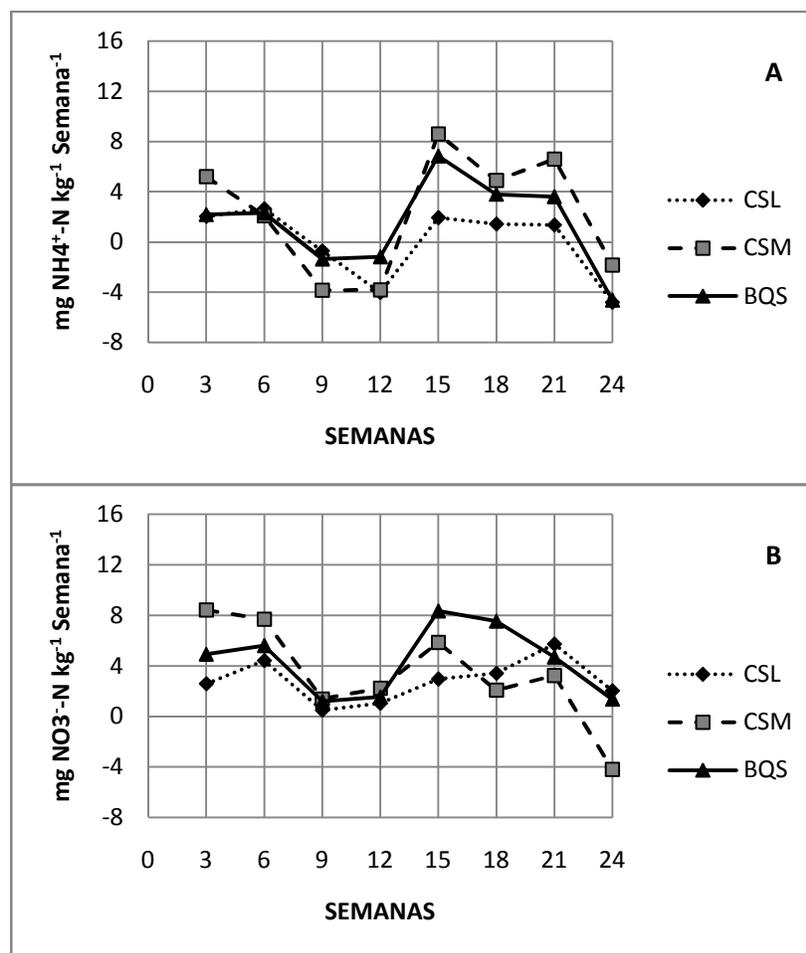


Figura 11. Tasas de amonificación (a) y nitrificación (b) en CSL, CSM y BQS en el tiempo.

Las tasas de nitrificación registradas en CSL a las 3, 6, 9, 12, 15, 18 y 24 semanas, en CSM a las 9, 12, 18 y 21 semanas y en BQS a las 3, 6, 18 y 21 semana de evaluación estadísticamente no mostraron diferencias significativas. Los valores máximos y mínimos en CSL se observaron a las 21 y 9 semanas de evaluación (5.7 y 0.5 mg kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente) y en CSM al inicio y final del muestreo, es decir a las 3 y 24 semanas de evaluación (8.4 y -4.2 mg kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente). En BQS la tasa máxima de nitrificación se observó a las 15 semanas de evaluación (8.3 mg kg⁻¹ semana⁻¹). La tasa mínima no mostró valores significativamente diferentes durante las semanas 9, 12 y 24 (8.3 y 1.2, 15.5 y 1.4 mg kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente) (Figura 11b).

La Figura 12 muestra los valores correspondientes a la tasa de mineralización de N (NMIN) a través del tiempo. El comportamiento fue aproximadamente similar en los tres tratamientos a través del período de evaluación (24 semanas). A partir de la semana 6 de evaluación se presentó una disminución en el N mineralizado hasta las 12 semanas de evaluación, luego el N mineralizado se incrementó a las 15 semanas de evaluación. Durante las semanas 9, 12 y 24 se registraron valores negativos de amonificación en los tres ecosistemas (Figura 12). La tasa máxima de NMIN registró valores de 14.4 y 15.2 mg N kg⁻¹ semana⁻¹ en CSM y BQS, respectivamente, a las 15 semanas de evaluación. La tasa mínima de NMIN registró valores de -6.0 y -3.3 mg N kg⁻¹ semana⁻¹ a las 24 semanas de evaluación en CSM y BQS, respectivamente. En CSL la tasa mínima se registró a las 12 semanas de evaluación con un monto de -3.0 mg N kg⁻¹ semana⁻¹ (Figura 12).

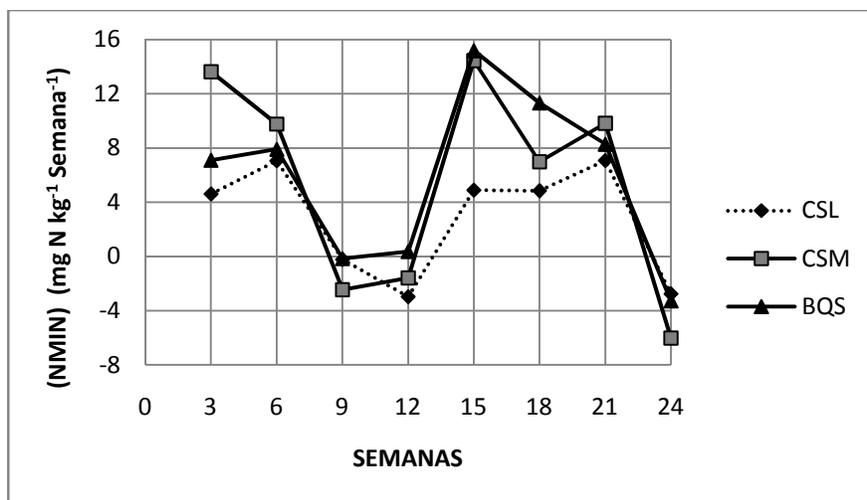
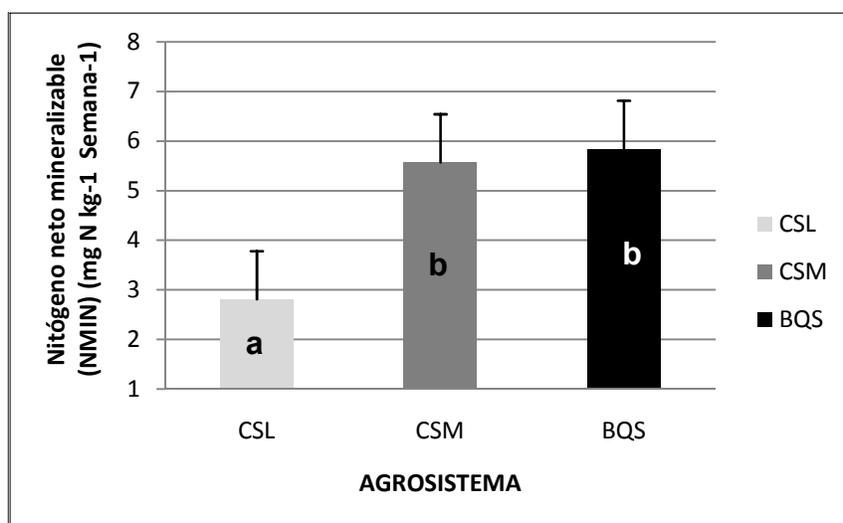


Figura 12. Tasa de N mineralizado en CSL, CSM y BQS en condiciones de campo.

b) Tasa promedio de nitrógeno neto mineralizable (NMIN) durante el período de evaluación

El promedio de NMIN en condiciones de campo arrojó valores de 2.8, 5.6 y 5.8 mg N kg⁻¹ semana⁻¹ para CSL, CSM y BQS, respectivamente, durante el tiempo evaluado (Figura 13).



*Letras distintas indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). Las barras verticales indican el error estándar.

Figura 13. Promedio de la tasa de mineralización neta de N cuantificada en un período de veinticuatro semanas en ecosistemas de CSL, CSM y BQS en campo.

c) Mineralización de N acumulativa en experimento bajo condiciones de campo

Se observa una tendencia similar en la acumulación de NMIN en los tres ecosistemas. Los valores máximos se observaron en CSM y BQS con respecto a CSL (Figura 14).

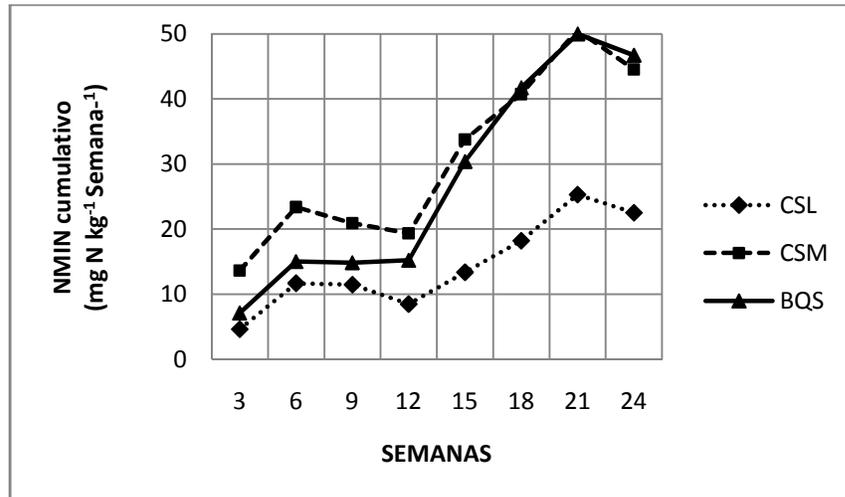


Figura 14. Valores acumulativos basados en la tasa de mineralización neta de N en ecosistemas de CSL, CSM y BQS en condiciones de campo.

A partir de la semana 15 se produjo un incremento en NMIN en los tres ecosistemas hasta la semana 21 donde se registraron los puntos máximos de NMIN acumulativo, siendo superior en CSM y BQS, con respecto a CSL. Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre CSL y CSM y entre CSL y BQS (Apéndice 27). La NMIN acumulativa a las 24 semanas fue de $22.5 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSL, $44.5 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSM y $46.7 \text{ mg N kg}^{-1}$ en BQS. La NMIN acumulativa anual fue de 48.8, 101.2 y 96.4 mg N kg^{-1} en CSL, CSM y BQS, respectivamente.

d) Contenido de humedad en el suelo

Los valores mínimos y máximos de la humedad en el suelo oscilaron entre 24% y 32% en CSL, 26% y 35% en CSM, y 25% y 35% en BQS.

Las cantidades máximas de humedad se registraron al inicio y al final de las evaluaciones (3 y 24 semanas, respectivamente), mientras que los valores mínimos se registraron a las 12 semanas de la evaluación (Figura 15).

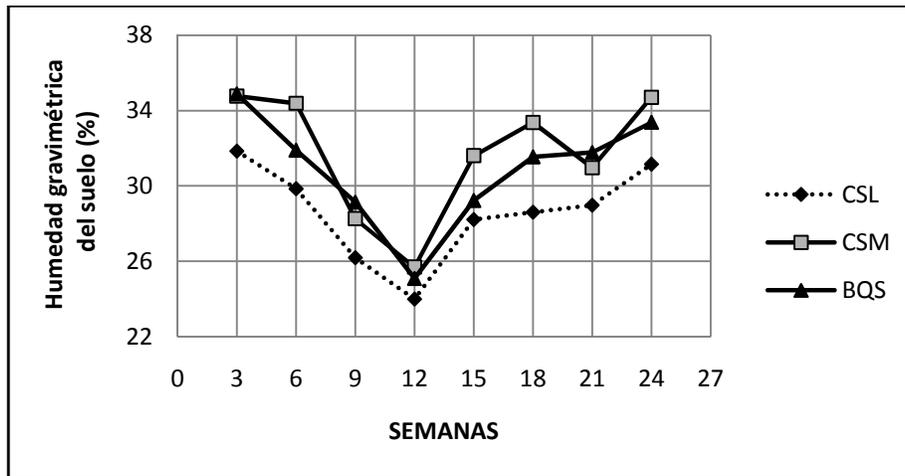


Figura 15. Porcentaje de humedad gravimétrica del suelo en dos agrosistemas de café (CSL y CSM) y un bosque secundario (BQS).

El contenido de humedad del suelo mostró una tendencia similar a través del tiempo en los tres ecosistemas, mostrando un porcentaje mayor en CSM y BQS y menor en CSL durante las 24 semanas de evaluación. Se observó que en las semanas 9 y 12 hubo un descenso en la humedad. Durante estos dos tiempos se observaron los valores más bajos (valores negativos) en las tasas de amonificación, nitrificación y mineralización de N.

e) Asociación entre la humedad del suelo y la mineralización de N

En el Cuadro 10 se observa una correlación no significativa entre la humedad del suelo y la tasa promedio de NMIN, la tasa de amonificación y la tasa de nitrificación (0.29, 0.31 y 0.19, respectivamente). Se observó una correlación significativa entre NMIN y la tasa de amonificación (0.92), entre NMIN y la tasa de nitrificación (0.88) y entre la tasa de nitrificación y la tasa de amonificación (0.63).

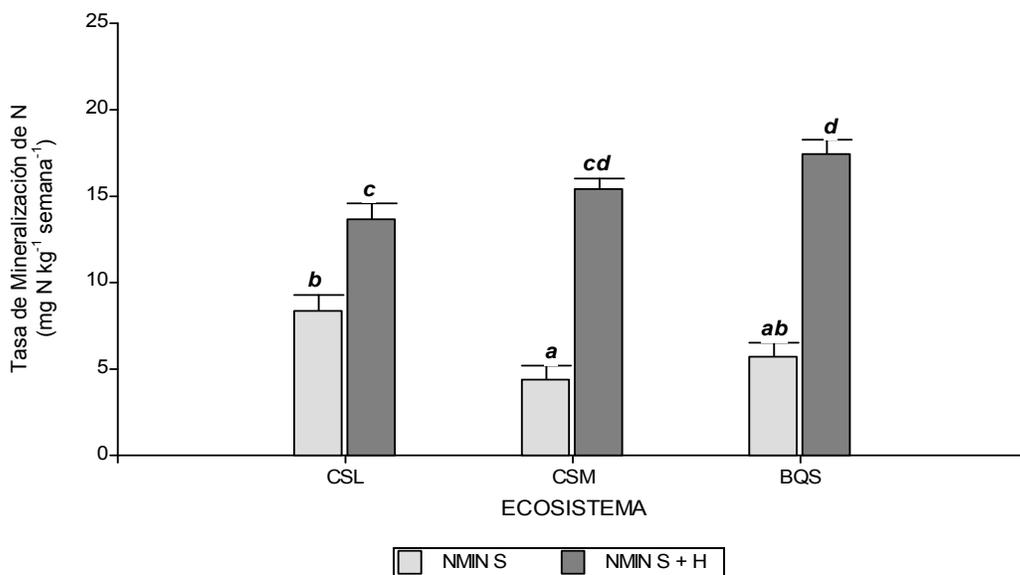
Cuadro 10. Coeficientes de correlación (Pearson) de la humedad del suelo, tasa de mineralización, amonificación y nitrificación CSL, CSM y BQS.

Coeficientes de Correlación de Pearson			
	Humedad suelo	Tasa NMIN	Tasa nitrificación
Tasa NMIN	0.29	-	-
Tasa amonificación	0.31	*0.92	*0.63
Tasa nitrificación	0.19	*0.88	-

*Valores significativos

5.3 Mineralización de N bajo condiciones de laboratorio

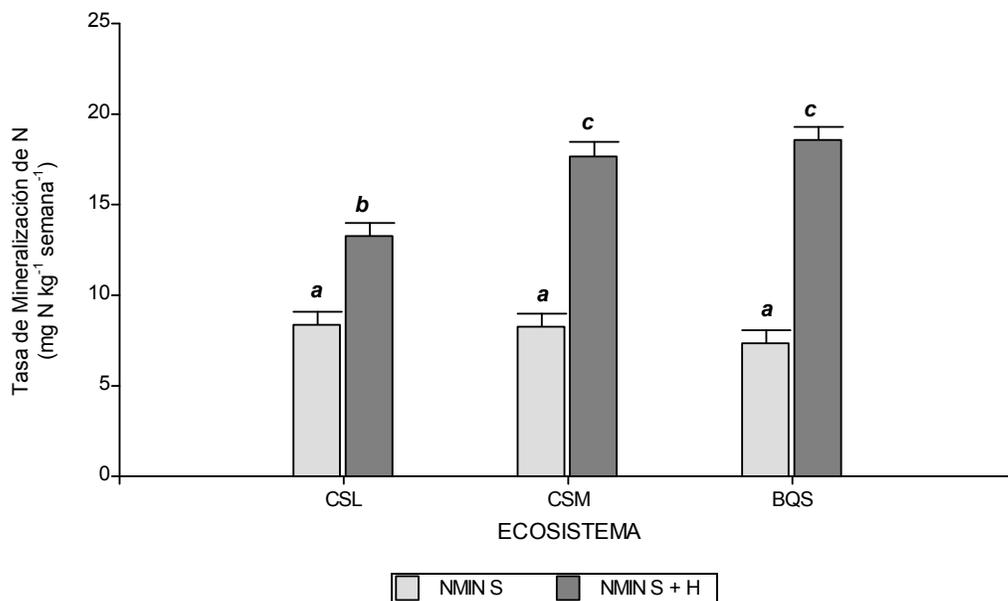
El resultado de ANOVA para la tasa promedio de mineralización de N (NMIN) en suelo sin hojarasca, suelo con adición de hojarasca y hojarasca mostró interacción significativa ($P \leq 0.05$) entre suelo, ecosistema y tiempo (Apéndice 28, 29 y 30). Las figuras 16, 17 y 18 muestran la NMIN de suelo con (S+H) y sin la adición de hojarasca (S) en los suelos Oxisol, Inceptisol y Ultisol, respectivamente. En el Oxisol, se encontraron diferencias significativas entre CSL y CSM en los suelos sin adición de hojarasca, mientras que en los suelos con adición de hojarasca se encontraron diferencias significativas entre CSL y BQS (Figura 16).



*Letras distintas indican diferencias significativas entre ecosistema (Tukey $p \leq 0.05$). Barra vertical es el error estándar.

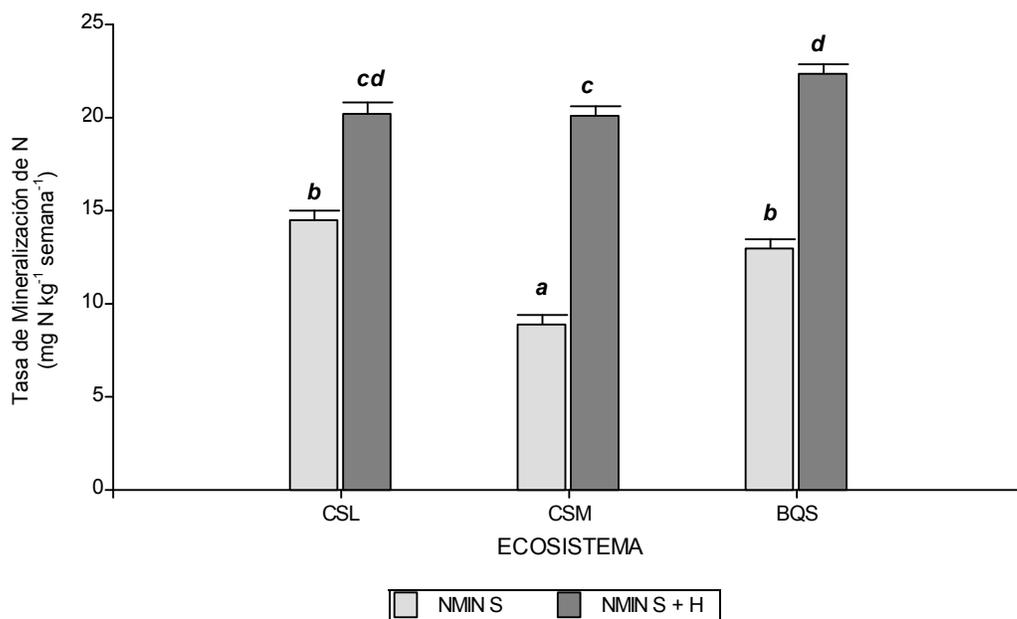
Figura 16. Tasa promedio de mineralización de N en un Oxisol bajo CSL, CSM y BQS con y sin la adición de hojarasca.

En Inceptisol, se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre CSL y CSM y CSL y BQS en los suelos a los que se le adicionó hojarasca (Figura 17).



*Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). La barra vertical indica el error estándar.

Figura 17. N mineralizado en un Inceptisol bajo CSL, CSM y BQS con y sin la adición de hojarasca.

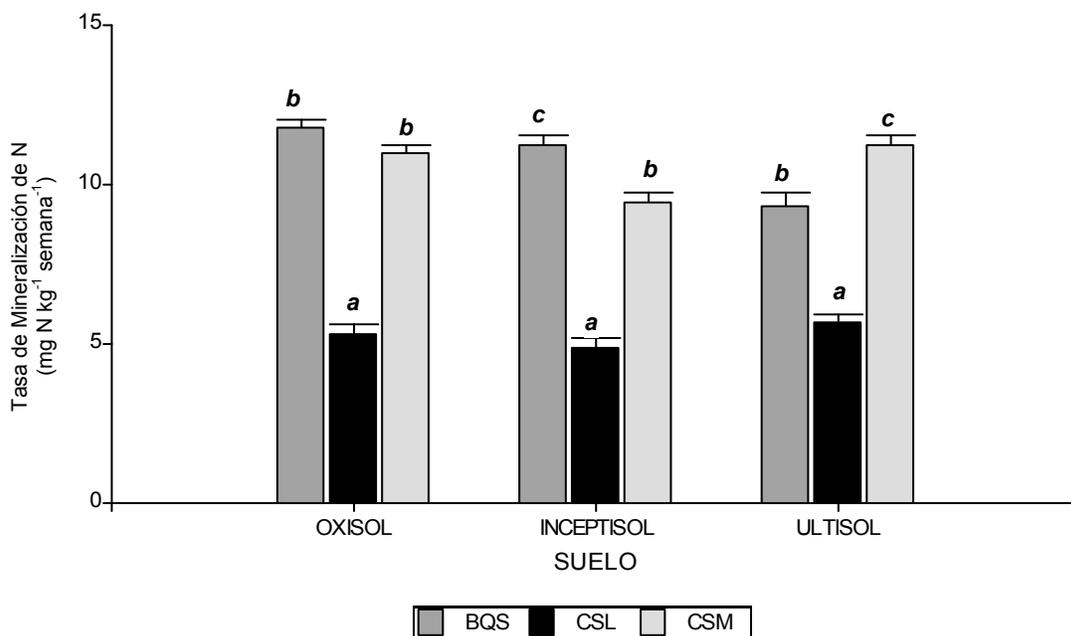


*Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). La barra vertical indica el error estándar.

Figura 18. N mineralizado en un Ultisol bajo CSL, CSM y BQS con y sin la adición de hojarasca.

En el Ultisol, se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre CSL y CSM y entre CSM y BQS en los suelos sin adición de hojarasca, mientras que en los suelos a los que se le adicionó hojarasca se encontraron diferencias significativas entre CSM y BQS (Figura 18).

La figura 19 muestra la NMIN de la hojarasca en los suelos estudiados bajo los diferentes ecosistemas.



*Letras distintas indican diferencias significativas entre suelos (Tukey, $p \leq 0.05$). La barra vertical indica el error estándar.

Figura 19. Mineralización de N en hojarasca proveniente de CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.

La NMIN en la hojarasca mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre CSL y CSM y entre CSL y BQS en el Oxisol, mientras que en el Inceptisol y el Ultisol se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los tres ecosistemas. Los valores de NMIN en la hojarasca fueron superiores en CSM y BQS e inferiores en CSL en los tres suelos estudiados (Figura 19).

La NMIN en la hojarasca mostró valores promedios de $11.8 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$ en el suelo Oxisol, $11.2 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$ en el Inceptisol en BQS y $11.2 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$ en el Ultisol en CSM. Los valores más bajos observados fueron: 5.3, 4.9 y $5.7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$, respectivamente en CSL en los tres suelos.

a) Tasa de mineralización de N de la hojarasca durante el tiempo evaluado

Las Figura 20, 21 y 22 muestran el comportamiento de la tasa de mineralización de N de tres suelos (Oxisol, Inceptisol y Ultisol) a través del tiempo durante 17 semanas de incubación.

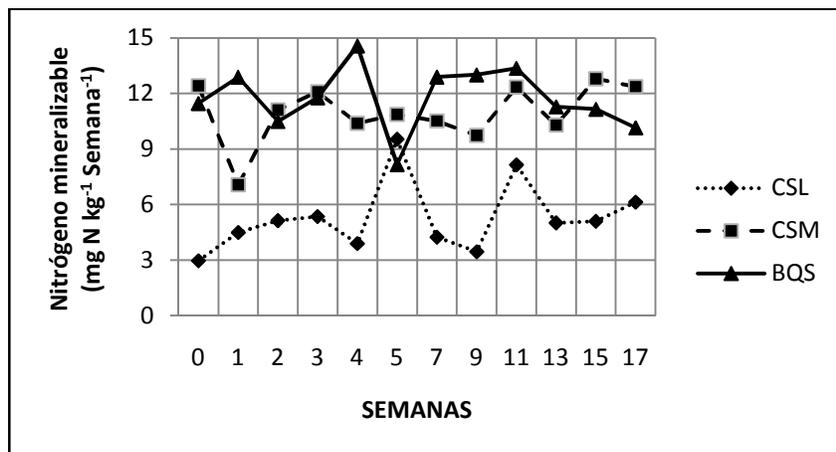


Figura 20. Tasa neta de mineralización de N en CSL, CSM y BQS en un Oxisol.

La tasa máxima de NMIN en el Oxisol se registró a las 4 semanas de evaluación en BQS ($14.6 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$) y la tasa mínima en CSL al inicio de la evaluación ($3.0 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$) (Figura 20).

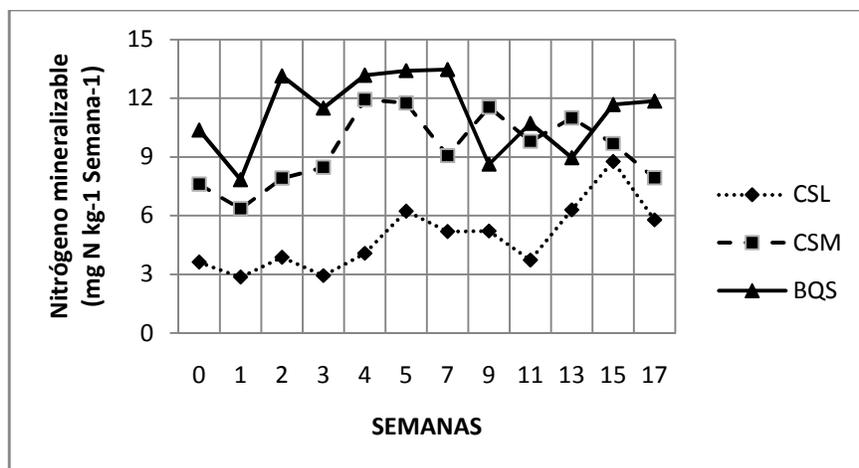


Figura 21. Tasa neta de mineralización de N en CSL, CSM y BQS en un Inceptisol.

La tasa máxima de NMIN en el Inceptisol se registró a las 7 semanas en BQS ($13.5 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$) y la tasa mínima durante la primera semana de evaluación en CSL ($2.9 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$) (Figura 21).

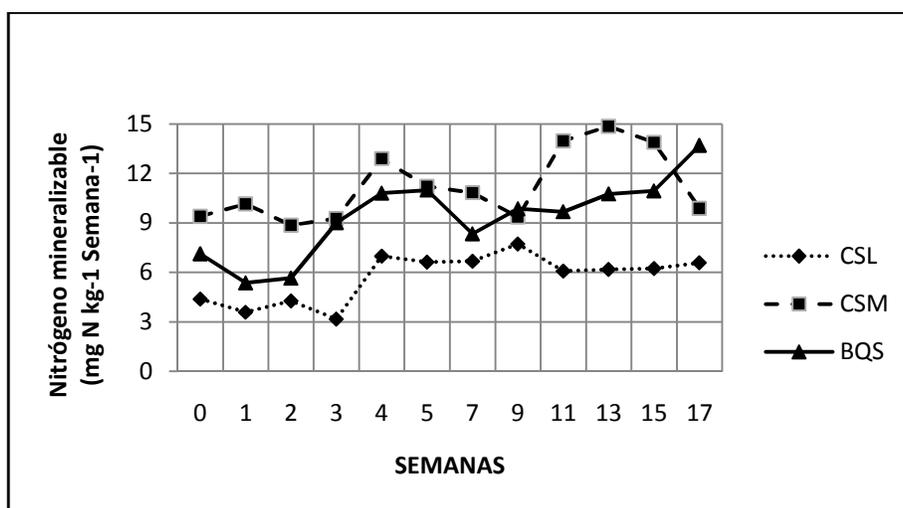


Figura 22. Tasa neta de mineralización de N en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.

En el Ultisol la tasa máxima de NMIN se registró a las 13 semanas de evaluación en CSM ($14.9 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$) y la tasa mínima a las tres semanas de evaluación en CSL ($3.2 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$) (Figura 22).

b) Mineralización de N cumulativa en experimento en condiciones de laboratorio

La Figura 23 muestra la NMIN cumulativa de un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol incubado con hojarasca registrada durante 17 semanas de evaluación en condiciones de laboratorio.

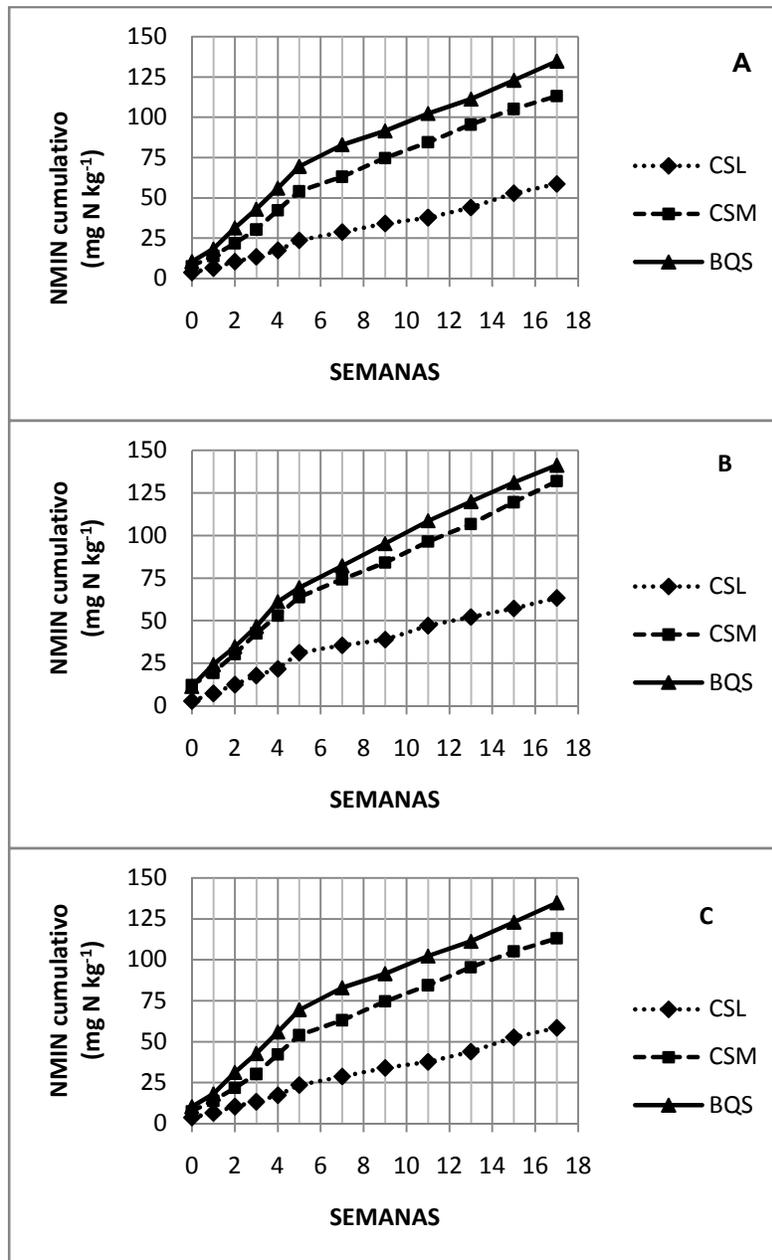


Figura 23. Valores cumulativos de mineralización de nitrógeno en suelos con adición de hojarasca bajo ecosistemas de café cuantificada en un período de diecisiete semanas en condiciones de laboratorio.

Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre CSL y CSM y entre CSL y BQS en la mineralización de N en la hojarasca añadida a los suelos estudiados (Apéndice 31). Se observa un mayor incremento CSM y BQS que en CSL en todos los suelos (Figura 23). La NMIN acumulativa a las 17 semanas de evaluación en el suelo Oxisol fue de $63.4 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSL, $131.9 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSM y $141.1 \text{ mg N kg}^{-1}$ en BQS (Figura 23a). En el Inceptisol la NMIN acumulativa fue de $58.5 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSL, $113.0 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSM y $134.7 \text{ mg N kg}^{-1}$ en BQS (Figura 23b). En el Ultisol NMIN acumulativa fue de $68.4 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSL, $134.5 \text{ mg N kg}^{-1}$ en CSM y $112.2 \text{ mg N kg}^{-1}$ en BQS (Figura 23c).

c) Contenido de humedad gravimétrica en el suelo

El contenido de humedad en los suelos bajo estudio mostró una tendencia similar en el tiempo de evaluación en los tres ecosistemas. La humedad se mantuvo en descenso hasta los 120 días de evaluación. El suelo Oxisol mostró valores mínimos y máximos de 33 a 37% en CSL, de 32 a 39 % en CSM, y de 33 a 41% en CSM. El suelo Inceptisol reflejó valores mínimos y máximos de 32 a 40% en CSL, de 34 a 41% en CSM, y de 33% a 40% en BQS. El suelo Ultisol reflejó valores mínimos y máximos de 33 a 41% en CSL, de 32 a 40% en CSM, y de 32 a 41% en BQS (Apéndice 32).

d) Asociación entre la humedad del suelo, contenido de hojarasca y la mineralización de N

Se observó correlación significativa entre NMIN y la tasa de amonificación, entre NMIN y la tasa de nitrificación y entre NMIN y la hojarasca. En ese sentido, se observó una correlación significativa entre la tasa de nitrificación y la tasa de amonificación (Cuadro 11).

Cuadro 11. Coeficientes de correlación (Pearson) de la humedad del suelo, tasa de mineralización, amonificación, nitrificación y hojarasca en CSL, CSM y BQS.

Coeficientes de Correlación de Pearson				
	Humedad suelo	Tasa NMIN	Tasa amonificación	Tasa nitrificación
Tasa NMIN	-0.08	-	-	-
Tasa amonificación	-0.10	*0.54	-	-
Tasa nitrificación	-0.05	*0.88	*0.56	-
Hojarasca	0.03	*0.89	*0.44	*0.51

*Valores significativos

d) Correlación entre la NMIN y NMIN cumulativo en campo y laboratorio

Según el coeficiente de correlación de Pearson se observó una correlación significativa entre las NMIN (0.83) y entre la NMIN cumulativa (0.67) en condiciones de campo y laboratorio en ambos casos.

6. DISCUSIÓN

6.1 Aportación de hojarasca en dos agrosistemas de producción de café y bosque

La aportación anual de hojarasca en CSL, CSM y BQS fue inferior a los valores reportados por otros autores. En estudios en bosques secundarios, De las Salas (1987) presenta datos de otros autores relacionados a la producción anual de hojarasca y aportación de nutrientes y señala que en muchos bosques tropicales del mundo la transferencia de materia seca al suelo varía de 4.2 a 12.5 ton ha⁻¹ año⁻¹ y que anualmente se aportan al suelo de 57 a 228 kg ha⁻¹ de N a partir de la caída de hojarasca. Los valores de aportación de hojarasca reportados por esta autor fueron menores en comparación con las cifras reportadas por otros autores para el trópico (Cuadro 12).

Cuadro 12. Producción de hojarasca y aportación de N en bosques tropicales del mundo.

**Región	Materia seca (ton ha⁻¹·año⁻¹)	Nitrógeno (kg ha⁻¹ año⁻¹)
Venezuela	4.6	57
	7.0	72
	7.0	69
	8.0	112
Colombia	9.5	108
	12	141
Brasil	7.3	106
Trinidad	7.5	98
India	4.2	67
Ghana	10.5	199
Tanzania	8.8	142
Perú	11.46	-
Panamá	11	-
Puerto Rico	5.5	88
Congo	12.5	228

***La información en este cuadro representa datos de varios autores. Para las referencias originales consultar a De las Salas (1987).*

En el bosque experimental de Luquillo en Puerto Rico, Cuevas y Lugo (1998) reportaron un promedio anual de hojarasca de $8.1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la especie *Anthocephalus chinensis*, $14.3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la especie *Pinus caribea* con un promedio de $11.1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Si se compara el estudio realizado en Puerto Rico por Cuevas y Lugo (1998) y el realizado en esta tesis se puede asumir que estas diferencias se deben a que las especies reportadas no son las encontradas en los sitios donde se estableció el experimento. Las diferencias en la contribución a la biomasa total de un sistema a otro sugieren que las tendencias varían de acuerdo a las características de las especies, las condiciones creadas por las combinaciones de dichas especies y las labores del manejo.

En agrosistemas de café al sol en Venezuela, se encontró que la aportación anual de hojarasca es de $3.3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, sin incluir la aportación por restos de yerbajos ($8.6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para un total de $11.6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y $17.4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en agrosistemas de café con sombra (Arellano *et al.*, 2004). Quintero y Ataroff (1998) en un sistema de café al sol de Venezuela, encontraron una aportación promedio de $5.7 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, de la cual la mayor aportación corresponde a hojas de café con $3.8 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (66% del material vegetativo caído).

En Costa Rica, Heuveldop *et al.* (1985) en cafetales bajo árboles de sombra con *Erythrina poeppigiana* reportó valores de $20.0 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de los cuales $7.6 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ correspondieron a material vegetativo caído naturalmente y donde el 62% ($12.4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) correspondió a la aportación de materia seca por residuos de poda y en *Cordia alliodora* reportó una aportación de $5.7 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de materia seca.

La aportación de hojarasca registrada en los agrosistemas de café estudiados fue inferior a los valores reportados por otros autores en Venezuela y Costa Rica. El material vegetativo de los árboles de sombra asociados en los cafetales pudo inferir en la aportación.

En dos localidades de Colombia, Cardona y Sadeghian (2005) evaluaron valores de contribución de hojarasca en cafetales a pleno sol y café bajo sombra. En los cafetales a pleno sol la contribución fue de 1.1 y 0.9 ton ha⁻¹ año⁻¹ respectivamente, mientras que en los cafetales bajo sombra fue de 2.2 y 1.9 ton ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los resultados correspondientes a la aportación de hojarasca encontrados en Jayuya, Lares y Las Marías en CSL fueron mayores que los registrados por Cardona y Sadeghian (2005), mientras que la aportación de hojarasca observada en CSM se aproxima a los reportados por estos autores. En ambos estudios se encontró la presencia de árboles leguminosos.

Fassbender (1993) reporta varios trabajos realizados por otros autores relacionados a la aportación de biomasa [materia seca (MS)] y a la contribución de N en cafetales asociados a con especies leguminosas (*Erythrina poeppigiana* e *Inga spp.*) y maderables (*Cordia alliodora*, Cuadro 13). Estos valores, relativamente mayores que los encontrados en las referencias mencionadas en el transcurso de la discusión, se deben a que integran en la materia seca los residuos de las podas de los árboles de sombra y café.

Cuadro 13. Producción de residuos naturales y de poda en sistemas de café en asociaciones agroforestales.

Referencia	Asociaciones	Mat. seca (ton ha ⁻¹ año ⁻¹)	N (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Heuvel dop <i>et al.</i> (1985)	Café + <i>E. poeppigiana</i>	20.0	461
Glover y Beer (1986)	Café + <i>E. poeppigiana</i>	17.8	377
Russo y Budowski (1986)	Café + <i>E. poeppigiana</i>	4.3	228
Heuvel dop <i>et al.</i> (1985)	Café + <i>Cordia alliodora</i>	5.7	114
Glover y Beer (1986)	Café + <i>E. poeppigiana</i> + <i>C. alliodora</i>	6.1	338
Aranguren (1982)	Café + leguminosas	-	170
Suárez de Castro y Rodríguez (1955)	Café + <i>Inga</i> spp.	4.7 – 13.1	-

Investigaciones realizadas por Bornemisza (1982) indican que la aportación de N al suelo por fijación biológica de las leguminosas es de alrededor de 100 kg ha⁻¹ año⁻¹. Aranguren *et al.* (1982) en un estudio de un cafetal bajo árboles de sombra (*Erythrina* spp. e *Inga* spp.) indicaron que el flujo de N asociado con la caída de hojarasca fue de 86 kg de N ha⁻¹ año⁻¹, mientras que la aportación por la hojarasca del café fue de 28 kg de N ha⁻¹ año⁻¹.

Mogollón *et al.* (1996) evaluaron el N potencialmente disponible en hojarasca de dos cafetales, uno bajo sombra con leguminosas y otro con cítricos. En la plantación café-leguminosa encontraron valores de 141 kg N ha⁻¹ y en la plantación café-cítrico encontraron 85 kg N ha⁻¹. Heuvel dop *et al.* (1985) reportaron una incorporación al suelo de 118 kg N ha⁻¹ año⁻¹ por caída de hojarasca en el sistema de café al sol. Los valores anteriores fueron superiores a los encontrados en esta investigación en CSL y CSM en las diferentes localidades estudiadas, debido a que la contribución de N por caída de hojarasca en CSL y CSM fue de 32 y 50 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en Jayuya, 29 y 50 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en Lares y de 32 y 56 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en Las Marías. En CSM la aportación de hojarasca y el contenido de N se atribuyen a los árboles leguminosos asumiendo que estos podrían ser la principal fuente del N orgánico al suelo.

Algunos factores que pudieron estar asociados a la baja aportación de hojarasca pueden relacionarse con la pérdida de fragmentos y calidad del material, la velocidad con que estos se descomponen y al consumo por parte de organismos descomponedores (Melillo *et al.*, 1989). En los estados iniciales de la descomposición el carbono está disponible para los microorganismos y la hojarasca más rica en carbono será consumida rápidamente (Swift *et al.*, 1979). Estudios anteriores han mostrado que la humedad limita la producción de biomasa debido a que contribuye a crear condiciones favorables para los organismos descomponedores (Cornejo *et al.*, 1994). Otro factor que influye en los valores reportados por otros autores en países tropicales es la biomasa proveniente de poda de los árboles asociados al café y residuos de malezas que son incorporadas al agrosistema cuando se realizan estas labores.

6.2 Mineralización de N condiciones de campo

La producción de café a menudo está acompañada de aplicaciones de fertilizantes nitrogenados (Carvajal, 1984). En Puerto Rico las recomendaciones están basadas en ensayos donde evaluaron la respuesta del café con N hasta 300 kg N ha^{-1} año⁻¹ (Vicente-Chandler *et al.*, 1968). La magnitud de esas entradas combinada con tasas de mineralización del material orgánico en forma de hojarasca, indica que el N disponible dentro de agrosistemas con manejos intensivos sea relativamente alto (Babbar y Zak, 1994). En este estudio el N disponible a partir de la mineralización fue alto en plantaciones de CSM y en BQS con respecto a plantaciones de CSL.

La tasa promedio de mineralización de N (NMIN) promedio registrada en condiciones de campo durante 24 semanas de evaluación atribuye su valor máximo al ecosistema BQS y CSM, reportándose valores de $5.8 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$ y $5.6 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$, respectivamente, en CSL donde la tasa promedio de NMIN fue de $2.8 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ semana}^{-1}$. Los valores de NMIN acumulativo fueron mayores en BQS con relación a CSM y CSL. En estos casos las principales fuentes del NMIN en el suelo podrían derivarse de las fracciones nitrogenadas más lábiles de la materia orgánica y parte del N que proviene de la biomasa microbiana del suelo después de la muerte de las células (Lemaitre *et al.*, 1995). Los valores de NMIN acumulativo a un año, la capacidad potencial de suministro de N correspondió a $101 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en BQS, $96 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en CSM y $49 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en CSL. Esto significa que CSL mineraliza entre un 48% y 50% de N aproximadamente, con respecto al mineralizado en BQS y CSM. Babbar y Zak (1994) en un estudio en de mineralización de N *in situ* en Costa Rica, en café al sol y sombra encontraron valores promedio anuales de 111 y $148 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente.

Durante las 9, 12 y 24 semanas de evaluación ocurrieron variaciones temporales en las tasas de amonificación, nitrificación y mineralización de N durante las cuáles se registraron valores negativos. En estas variaciones se refleja una época de sequía (semanas 9 y 12) y una época muy húmeda (semana 24). Se conoce que la humedad del suelo tiene control directo en la mineralización (Andren *et al.*, 1988). En adición, varios estudios han reportado un “efecto Birch” en climas estacionales, la NMIN disminuye en época seca, seguido por un rápido aumento en la mineralización y actividad microbiana al principio de la época de lluvia (Birch, 1964 y Sánchez, 1976).

Las tasas negativas de mineralización de N registradas podrían indicar procesos de desnitrificación o volatilización, así como de inmovilización por la biomasa microbiana (Pérez *et al.*, 1998 y Zamorano, 2000). Valores negativos indican una pérdida neta de mineralización o inmovilización. Piirainen *et al.* (2002) y Pérez *et al.* (2003) indican que el N en el suelo puede ser inmovilizado por factores bióticos y abióticos. El Cuadro 14 provee una comparación entre los resultados de amonificación, nitrificación y tasas de mineralización de N en BQS reportados por otros autores en suelos de bosques tropicales. Las tasas de mineralización de N encontradas en los bosques estudiados en esta tesis fueron superiores a las tasas reportadas en Indonesia, pero menores que las tasas reportadas en suelos de Brasil y Venezuela (Cuadro 14).

Cuadro 14. Tasas de amonificación, nitrificación y mineralización de N reportadas en suelos tropicales del mundo.

Localidad	Suelo	Amonificación (mg kg ⁻¹ sem ⁻¹)	Nitrificación (mg kg ⁻¹ sem ⁻¹)	N Mineralizado (mg kg ⁻¹ sem ⁻¹)
BQS- Puerto Rico ^a	Ultisol	1.4	4.4	5.8
Bosque Tropical - Indonesia ^b	Spodosol	5.1	-0.7	4.4
Bosque Tropical- Brasil ^c	Spodosol	16.8	10.5	27.3
Bosque Tropical- Brasil ^d	Oxisol/	33.6	14.0	47.6
	Ultisol	37.8	18.2	56.0
Bosque tropical-Venezuela ^e	Oxisol/	3.29	2.6	5.9
	Ultisol	21.0	21.7	42.7

^aReportado en BQS en este estudio; ^bVernimmen *et al.* (2007); ^cLivingston *et al.* (1988); ^dVitousek and Matson (1988); ^eMontagnini and Buschbacher (1989). Sem⁻¹=semana.

La forma dominante de N mineral en los suelos de los tres ecosistemas fueron los nitratos (proporción amonio-nitrato de 1:2 aproximadamente). Reynolds-Vargas *et al.* (1994) también observaron una mayor tasa de nitrificación. Esto parece indicar una nitrificación muy activa en los suelos estudiados. Li *et al.* (2000) reportaron que la forma dominante de N mineral fue el nitrato en suelo donde predominan especies leguminosas y el amonio en el suelo bajo especies no leguminosas.

En ese sentido, reportaron que la mineralización de N fue mayor en los suelos donde se desarrollaron las especies leguminosas. Contrario a los resultados de Reynolds-Vargas *et al.* (1994) y a los observados en esta investigación las tasas de amonificación reportadas en suelos de Indonesia, Brasil y Venezuela superaron las tasas de nitrificación (Cuadro 14).

6.3 Mineralización de N en tres suelos bajo condiciones de laboratorio

La tasa promedio de mineralización de N en condiciones de laboratorio observadas durante el período de evaluación (17 semanas) en los suelos Oxisol e Inceptisol registraron tasas superiores en BQS con valores de 11.8 semana⁻¹ y 11.2 mg N kg⁻¹ semana⁻¹, respectivamente, mientras que la mayor tasa promedio de NMIN en el suelo Ultisol se observó en CSM con una cantidad de 9.4 mg N kg⁻¹ semana⁻¹. Los valores de NMIN acumulativo fueron mayores en CSM y BQS con relación a CSL.

Se esperaba que la mayor tasa de N mineralizado en los tres suelos fuera en CSM debido a la incorporación de hojarasca proveniente de diferentes especies de leguminosas fijadoras de N (*Inga spp.*) presentes en dicho agrosistema. En un estudio sobre la disponibilidad y dinámica de N en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en café. En Costa Rica, Gutiérrez (2003) encontró que las especies maderables *Terminalia ivorensis*, *Eucalyptus deglupta*, y *Terminalia amazonia*, y las leguminosas *Erythrina poeppigiana* e *Inga spp.* presentaron mayores tasas de liberación de N por sus residuos e influenciaron en el contenido de nitratos del suelo y el N potencialmente disponible del suelo.

Palm y Sánchez (1990) en un estudio de mineralización de N en leguminosas tropicales encontraron que no toda la hojarasca proveniente de leguminosas se descompone y mineraliza el N rápidamente. Aunque las altas concentraciones de N en las hojas, la mineralización neta del N ocurría si la concentración de N de las mismas era superior a 2% y por el contrario se producía inmovilización si la concentración era inferior a este valor. En un ensayo de mineralización de N de material foliar con diferentes especies de *Inga*. Meléndez *et al.* (1995) encontraron que hubo poca diferencia en la cantidad de N mineralizado entre especies nativas versus las introducidas.

Extrapolando los valores de NMIN acumulativo a un año, la capacidad potencial de suministro de N en el suelo Oxisol correspondió a 506.0 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en BQS, 473.0 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSM y 227.2 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSL; en el suelo Inceptisol correspondió a 483.1 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en BQS, 405.4 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSM y 209.9 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSL; y en el suelo Ultisol correspondió a 402.2 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en BQS, 482.5 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSM y 245.3 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSL.

6.4 Mineralización de N en condiciones de campo versus laboratorio

En esta investigación se observó que el estudio de mineralización de N en campo siguió la misma tendencia que el estudio de laboratorio, puesto que el contenido de amonio fue menor que el de nitrato en ambos. Sin embargo, en el estudio de campo la tasa mineralización neta de N fue menor que en laboratorio.

En estudios de mineralización de N en campo y laboratorio, Honeycutt (1999) reportó baja mineralización de N en incubaciones en campo y mayores en laboratorio. En ese sentido, Sistani *et al.* (2008), en ensayos simultáneos en campo y laboratorio de mineralización de N en suelos incubados con la adición de gallinaza, encontraron una menor mineralización en campo y superior en laboratorio. En estos casos la cantidad de N que se mineraliza en un suelo podría depender del tipo de hojarasca, de las características del material añadido (tamaño, calidad, cantidad, otros) y de las condiciones del medio ambiente. En ambos ensayos hubo una correlación significativa en las tasa de mineralización de N y el N mineralizado acumulativo.

Las diferencias entre el experimento de campo y el experimento de laboratorio no pueden ser fácilmente explicadas. Una posible razón es que tanto el manejo como el procesamiento del suelo, por lo general cambian el acceso al N orgánico existente, alteran la actividad microbiana y las condiciones del suelo. Swift (1985) menciona que la mineralización de N puede estar afectada por las condiciones ambientales del ensayo, la cantidad de N adicionado y la forma química o calidad del material agregado.

Cabrera y Kissel (1988) señalan que el contenido de humedad es el factor que más afecta la mineralización. Según los resultados de esta investigación, el N mineralizado tuvo una correlación no significativa con la humedad en el ensayo de campo y en el ensayo de laboratorio. Sistani *et al.* (2008) reportaron que las fluctuaciones en el contenido de agua en el suelo no tuvieron un gran impacto en la mineralización de N en el suelo bajo condiciones de laboratorio.

6.5 Aplicación del balance de N y porcentaje de eficiencia en café

El balance de nitrógeno consiste en comparar las entradas y salidas en el sistema suelo. Este balance está basado principalmente en la biomasa vegetal y en los datos de suelo disponibles, en ese sentido permite formular preguntas iniciales sobre las fuentes de nitrógeno movilizadas en el suelo. A partir de los datos obtenidos en esta investigación se construyó un balance de nitrógeno (entradas y salidas) en los agrosistemas de café al sol y en café bajo sombra en los predios de Miguel Avilés y Dominga Irrizarry, respectivamente, en la localidad de Las Marías. Los datos utilizados fueron: contribución de hojarasca, N mineralizado en el suelo, contribución de N como fertilizante y la salida de N por extracción en la cosecha (Figura 24).

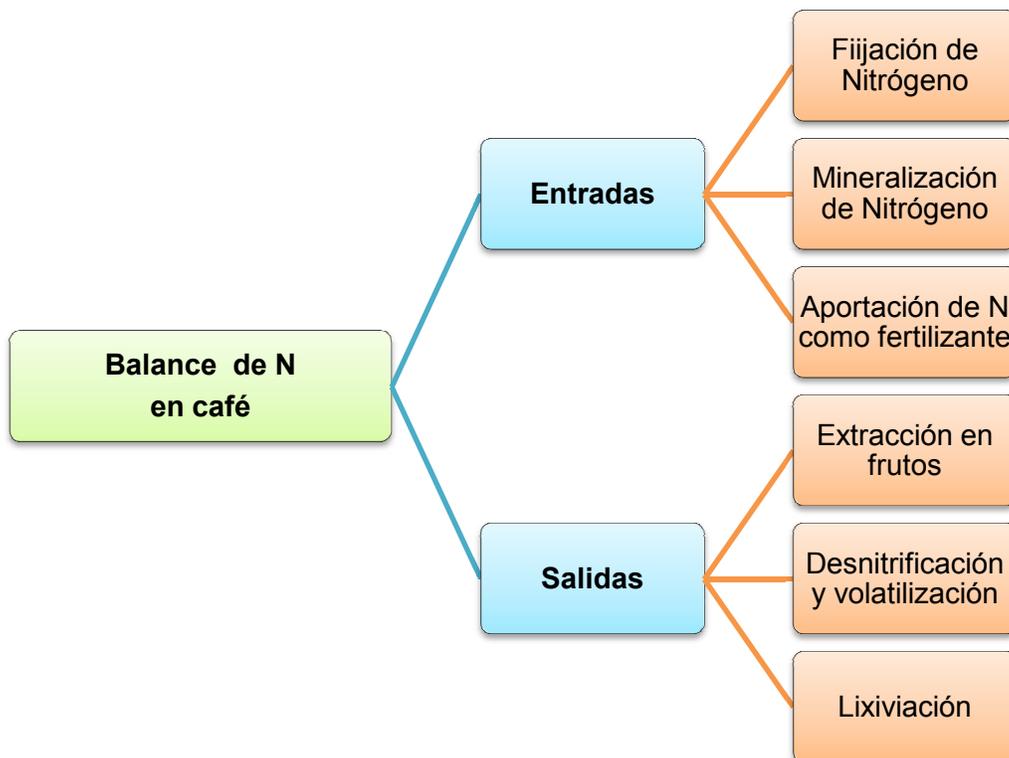


Figura 24. Cálculo de balance de N en café al sol y café bajo sombra

Se aplicó la siguiente expresión:

$$\Delta N = [(Entradas \text{ de } N) - (Salidas \text{ de } N)]$$

La contribución de N por aportación de hojarasca fue de 32 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSL y 56 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSM. El N netamente mineralizable obtenidos en estos agrosistemas registró valores de 49 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSL y 96 kg N ha⁻¹ año⁻¹ en CSM. La aportación de N por fertilización. Se aplicó 0.45 kg/ árbol de fertilizante completo (12-5-15-3 + EM) en el año distribuido en dos aplicaciones equivalente a 108 kg ha⁻¹ para una densidad de plantas de 2500 plantas ha⁻¹ en el cafetal al sol, mientras que en sombra 81 kg ha⁻¹ en 1500 plantas ha⁻¹. Es importante mencionar que en las fincas evaluadas durante el período 2006-2007 se aplicó la mitad de la dosis de fertilizante recomendada por el Conjunto tecnológico para la producción de café en Puerto Rico. En ese sentido, Vicente-Chandler et al. (1968) encontraron altos rendimientos en café con la aplicación de 300 kg N ha⁻¹ año⁻¹, aproximadamente.

En las entradas de este balance se incluyeron datos que no fueron evaluados en esta investigación y que han sido reportados por otros autores para condiciones de climas tropicales, tales como: aportación por fijación de N en asociaciones de café-leguminosa. En México en ensayos de cafetales bajo sombra con *Inga jinicuil* se ha encontrado una fijación de hasta 40 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (Roskoski, 1982). En suelos, Son (2001) reporta una entrada de N por fijación no simbiótica de 2 – 3 kg N ha⁻¹ año⁻¹. No se incluyó la aportación de N por las aguas de lluvia por la ausencia de referencias, tanto en Puerto Rico como en el trópico. Los valores indicados en clima templado fluctúan entre 0.7 y 21.0 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (Wolf y van Keulen, 1989). Estas cantidades en climas tropicales serían más altas [6.5 – 72.0 kg N ha⁻¹ año⁻¹, (Fassbender, 1986)]. No se descarta que la aportación por aguas de lluvia sobre el balance de N del suelo sea significativo sobre el balance de N del suelo.

En cuanto a las salidas de N en el sistema suelo- café el rendimiento cosechado en 2006-2007 fue de 1.2 y 3.0 quintales $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en CSM y CSL, respectivamente. En promedio, 3 quintales (136 kg) de café extraen 55 kg N en café oro. La extracción de N por frutos café fue equivalente a 34 y 17 kg N $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ de café pergamino cosechado en CSL y CSM, respectivamente. Estos dos valores fueron calculados basados en el rendimiento y en la concentración de N.

En Puerto Rico no se han obtenido datos relacionado a la lixiviación del N. Babbar y Zak (1995) reportaron que la pérdida de N por lixiviación en café al sol es de 4 kg N $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ y de 8 kg N $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en café bajo sombra. En Alemania, Mengel y Kirkby (2000) encontraron pérdidas de 0 a 27 kg N $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en un suelo franco arenoso con 16% de arcilla. En España, Ortuzar *et al.* (2003) han medido el nitrato y amonio lixiviados en el cultivo de trigo, con una pluviometría de 779 mm de diciembre a junio observando variaciones de 19 kg N ha^{-1} en ambos casos. El balance estimado en estos ecosistemas se muestra en el cuadro 15.

Cuadro 15. Balance de N en café al sol y café bajo sombra en Las Marías

A	Entradas de Nitrógeno	Café al sol	Café bajo sombra
1	Nmin ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	49	96
2	Fertilización ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	108	81
3	*Fijación ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	3 ⁺	40
Total entradas (kg N año^{-1})		160	217
B	Salidas de Nitrógeno	Café al sol	Café bajo sombra
1	Salida frutos ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	34	17
2	*Lixiviación ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	4	8
3	*Volatilización ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)	12 ⁺	9 ⁺
Total salidas (kg N año^{-1})		50	34
Balance (ΔN)= [Entradas N –Salidas N]		110	183

* Estos datos no fueron obtenidos en esta investigación, fueron reportados por otros autores en sistemas con condiciones similares. ⁺ Lealv (2007).+Fijación no-simbiótica (Son, 2001).

Es evidente la diferencia en cuanto al balance de N en CSL con respecto CSM. Las entradas de N en estos agrosistemas provenientes de la aportación de N por mineralización y la contribución por hojarasca compensan las salidas por exportación en los frutos. La importancia de estimar el balance de nutrientes, en este caso nitrógeno, radica en que si se observan balances negativos, es decir, se aplican menos nutrientes de los que el cultivo extrae, disminuye la fertilidad de los suelos, se afecta la rentabilidad y productividad del cultivo y el suelo se degrada de forma más rápida (Cordone y Martínez, 2004). Con un análisis del balance de N se puede tener una aproximación a las necesidades de fertilización de N en el cultivo (Torres, 2002).

7. CONCLUSIONES

- Las especies de árboles inventariados en CSM coinciden con un estudio realizado por Arango (2007) sobre zonificación agroecológica en la región cafetalera de Puerto Rico, en donde encontró como especies de mayor importancia a *Inga vera*, *Citrus spp.* y *Andira inermis*. Las especies leguminosas *Inga vera*, *I. laurina*, *I. fagifolia* y *Andira inermis* en simbiosis con microorganismos (*Rhizobium*) fijan biológicamente el N proveniente del aire, elemento de mayor importancia en la nutrición de una plantación de café. Además, son árboles que contribuyen con el retorno de nutrientes que toman del subsuelo por medio de la *aportación* de materia orgánica asociada bajo la forma de hojarasca.

- La aportación anual de hojarasca fue mayor en los ecosistemas CSM y BQS que en CSL en todas las localidades estudiadas.

- La hojarasca proveniente de CSM y BQS presentó la mayor concentración de carbono total (C_t) y N total (N_t) con respecto a CSL en las diferentes localidades estudiadas.

- La mayor aportación anual de hojarasca en CSM y BQS podría estar relacionado a la variabilidad vegetativa existente. Las especies más importantes halladas en los bosques estudiados correspondieron a: *Spathodea campanulata*, *Guarea guidonia* y *Schefflera morototoni*, mientras que en las plantaciones de CSM fueron: *Inga vera*, *Inga laurina* y *Citrus spp.*

- Aunque la cantidad de hojarasca aportada en los tres ecosistemas fue baja en comparación a las investigaciones realizadas por otros autores como Fassbender, Quintero y Ataroff y otros mencionados anteriormente, es difícil deducir conclusiones firmes relacionadas a estos datos, pues la aportación en cuanto a cantidad y calidad dependerá fuertemente de las especies vegetativas predominantes.

- En el experimento de mineralización de N en laboratorio como en el campo la mayor tasa de mineralización de N se registró en BQS y CSM en todos los suelos.

- En esta investigación se observó que el experimento de mineralización de N bajo condiciones de laboratorio no registró cifras negativas de NMIN en los tres suelos estudiados, significando que no hubo inmovilización o pérdida significativa del N disponible en los suelos.

- Los valores de NMIN fueron superiores en BQS y CSM en ambos ensayos por lo que la incorporación de hojarasca proveniente de estos ecosistemas se traduce en un incremento en el N inorgánico disponible en los suelos.

- Fue muy notable los incrementos de NMIN y NMIN acumulativo en el experimento de laboratorio, estos valores tienden a sobreestimarse debido a que el suelo que se transporta al laboratorio es disturbado con el rompimiento de los agregados por tamizado. Esto indica que el experimento de laboratorio no es un buen indicador para la medición mineralización de N.

8. RECOMENDACIONES

- Los microorganismos del suelo controlan la tasa a la cual el N está disponible para la absorción del cultivo. Éstos inmovilizan, retienen y a su vez pueden impedir una rápida transformación del N, como consecuencia limitan de forma significativa las pérdidas del nutriente por lixiviación o volatilización, por lo que se recomienda evaluar las poblaciones microbianas. En investigaciones futuras sobre mineralización de N se recomienda hacer mediciones simultáneas de humedad, temperatura y precipitación en suelos durante experimentos de campo, así como también se sugiere el estudio de la velocidad de descomposición de la materia orgánica con la finalidad de estimar la actividad microbiana en el suelo.

- La utilización de árboles dentro de los cafetales contribuye de manera directa a crear un ambiente sustentable. Además de contribuir con la disponibilidad de nutrientes, principalmente de N durante la descomposición de hojarasca, la siembra de árboles de la familia Fabaceae (leguminosas) puede ser una opción viable en mejorar y reducir el uso de fertilizantes nitrogenados debido a las bondades que tienen como fijadoras de nitrógeno en el suelo. También, el uso de árboles contribuye en la reducción del calentamiento global, pues éstos regulan el clima de diferentes maneras: absorben los gases causantes del efecto de invernadero (CO₂) y la radiación solar, promueven la formación de nubes que ayudan a enfriar el planeta, entre otros. En condiciones agronómicas, favorecen la protección y recuperación del entorno natural en todos los aspectos.

9. LITERATURA CITADA

Abruña, F., Vicente-Chandler, J., Silva, S. y Gracia, W. 1965. Productivity of nine coffee varieties growing under intensive management in full sunlight and partial shade in the coffee region in Puerto Rico. *J. Agric. Univ. P. R.* 49: 244-253.

Alamo, C.I. 2005. Situación y estructura de la empresa de café en Puerto Rico. Reunión Empresa de café, Adjuntas, PR. Septiembre, 2005.

Alpizar, L., Fassbender, H., Heuvelop, J., Enriquez, G. y Fölster, H. 1985. Sistemas agroforestales de café con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica: I. Biomasa y reservas nutritivas. *Turrialba* 35: 233–242.

Alvarado, A., y Monroig-Inglés, M. 2007. Guía práctica de plagas y enfermedades en café. Servicio de Extensión Agrícola. Universidad de Puerto Rico. 47p.

Andren, O., Paustian, K. y Rosswall, T. 1988. Soil biotic interactions in the functioning of agroecosystems. *Agricultural Ecosystems and Environment.* 24:57-67.

Arango, M. 2007. Zonificación agroecológica y composición de especies presentes en el agroecosistema cafetero de Puerto Rico. Tesis M.S: Depto. Agronomía y Suelos, Universidad de Puerto Rico. 124 p.

Aranguren, J., Escalante, G. y Herrera, R. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. I. Coffee. *Plant and Soil.* 67: 247-258.

Arellano, R., Paolini, J., Vásquez, L. y Mora, E. 2004. Producción y descomposición de la hojarasca en tres agroecosistemas de café en el Estado de Trujillo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana.* 48:7–14.

Babbar, L. y Zak, D. 1994. Nitrogen cycling in coffee agrosystems: net N mineralization and nitrification in the presence and absence of shade trees. *Agricultural Ecosystems and Environment.* 48: 107–113.

Babbar, L.I. y Zak, D.R. 1995. Nitrogen loss from coffee agroecosystem in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. *Journal of Environmental Quality.* 24:227-233.

Bachmeier, O.A., Rollan, A.A., Núñez Vázquez, F. y Salas, H.P. 1993. Mineralización potencial de nitrógeno. Efecto de la materia orgánica, N total y densidad aparente. *Actas del XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* AACs., Mendoza, Argentina. pp.169-170.

Beer, J., Muschler, R., Kass, D. y Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems.* 38:139-164.

Beinroth, F., Engel, R., Lugo, J., Santiago, C., Ríos, S. y Brannon, G. 2003. Updated Taxonomic Classification of the Soil of Puerto Rico, 2002. Estación Experimental Agrícola, Recinto de Mayagüez, Universidad de Puerto Rico. Boletín 303. 77 p.

Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 157 p.

Birch, H.F. 1964. Mineralization of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. *Plant Soil* 20:43-49.

Blake, G.R. y K.H. Hartge, 1986, Bulk Density, in A. Klute, ed., *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods: Agronomy Monograph no. 9* (2nd ed.). ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 363-375.

Borkhataria, R. 1993. Ecological and political implications of conversion from shade to sun coffee in Puerto Rico. MS Thesis, Zoology Department, North Carolina State University. USA. 149 p.

Bornemisza, E. 1982 Nitrogen cycling in coffee plantations. En: Robertson G P, Herrera R. y Rosswall T. (eds.) *Nitrogen cycling in Ecosystems of Latin America and the Caribbean*. *Plant and Soil* 67: 241–246.

Bremner, J.M. 1965. Organic forms of nitrogen. En: *Methods of Soil Analysis. Part 2* (C.A. Black *et al.*, ed.). *Agronomy* 9. ASA, Madison, WI. pp. 1238-1255.

Bremner, J.M. 1996. Nitrogen –Total. In: *Methods of Soil Analysis. Part. 3. Chemical Methods* (D.L. Sparks *et al.*, ed.). SSSA Book 5. SSSA, Madison, WI. pp. 1085-1121.

Broadbent, F.E. 1984. Plant use of soil nitrogen. p. 171-182. *Agronomy* N° 22. En R. Hauck (ed.). *Nitrogen in Crop Production*. Soil Science Society of America, Inc., Madison, WI, USA. pp. 171–182.

Bremner, J.M. 1996. Nitrogen –Total. En: *Methods of Soil Analysis. Part. 3. Chemical Methods* (D.L. Sparks *et al.*, ed.). SSSA Book 5. SSSA, Madison, WI. pp. 1085-1121.

Cabrera, M.L. y Kissel, D.E. 1988. Evaluation of a method to predict nitrogen mineralized from soil organic matter under field conditions. *SSSA Journal*. 52:1027-1031.

Cardona, D.A. y Sadeghian, H.S. 2005. Ciclo de nutrimentos y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de *Inga spp*. *CENICAFE* 56:127–141.

Carvajal, J.F. 1984. *Cafeto: Cultivo y fertilización*. Segunda Edición. Berna. Instituto Nacional de la Potasa. San José, Costa Rica. 141p.

Cháves A.V. y Molina E. 2000. Extracción de Nitrógeno en dos cultivares de café en Costa Rica. Simposio Latinoamericano de Caficultura XIX, San José, Costa Rica. Memorias ICAFE-PROMECAFE Octubre 2-6, 2000. San José, Costa Rica. pp.155-165.

Cody, M., McGill, W., Gill, D., Alegre, J., Kass, D. y Rothwell, R. 2000. Patrones de liberación y distribución de nitrógeno en barbechos mejorados. *Agroforestería en las Américas* 7: 65-67.

Conjunto Tecnológico para la Producción de Café. 1999. Universidad de Puerto Rico. Recinto Universitario de Mayagüez. Colegio de Ciencias Agrícolas. Estación Experimental Agrícola. Río Piedras, Puerto Rico. 29 p.

Cordone, G. y Martínez, F. 2004. El monocultivo de soja y el déficit de nitrógeno. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* No. 24. INPOFOS Cono Sur, Acassuso. Buenos Aires, Argentina. pp. 1-4.

Cornejo, F.H., Varela, A. y Wright, S.J. 1994. Tropical forest litter decomposition under seasonal drought: nutrient release, fungi and bacteria. *Oikos*. 70:183-190.

Cuevas, E. y Lugo, A.E. 1998. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. *Forest, Ecology and Management*. 112: 263-279.

Day, P.R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis. En: Black, C.A. *et al.* (editores). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties*. ASA-SSSA. Madison. WI. USA. pp. 545-567.

De las Salas, G. 1987. Suelos y ecosistemas forestales con énfasis en América Tropical. IICA. San José, Costa Rica. pp. 141.

Delphin, J.E. 1986. Evaluation du pouvoir minéralisateur de sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. *Agronomie* 6. 17:453-458.

DAPR. 2008. Distribución del Valor de la Producción Agrícola 2006/07 en Orden de Importancia Económica En: <http://www.gobierno.pr/NR/rdonlyres/6E6E75D8-6087-4B65-9A2A-56EDF73298AA/0/DistribuciondelIngresoBrutoAgricolaporProducto2007.pdf> [Agosto 2008].

Dommergues, Y. y Mangenot, F. 1970. *Soil Microbial Ecology*. Masson (ed.), Paris, France. pp. 265-324. .

Echeverría, H., Bergonzi, R. y Ferrari, J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Ciencia del Suelo*. 12: 56-62.

FAO. 1995. Manual técnico de la fijación simbiótica del nitrógeno. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. pp. 1-2.

Fassbender, H.W. 1993. Modelos edafológicos de los sistemas de producción agroforestales. 2ª Ed. Turrialba, Costa Rica: CATIE-GTZ. pp. 24.

Fassbender, H.W. 1986. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José. pp. 139.

Fassbender, H.W. y Bornemiza, E. 1987. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José, Costa Rica. 420 p.

Faúndez, P. 2005 Actividad microbológica global en suelos acondicionados con biosólidos cloacales frescos y compostados con residuos forestales. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 61 p.

En: www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2005/faundez_p/sources/faundez_p.pdf

Fournier, L.A. 1988. El cultivo de cafeto (*Coffea arabica* L) al sol o la sombra: Un enfoque agronómico y ecofisiológico. Agronomía Costarricense. 12:131-146.

Foss, J.E. y Moorman R., S. 1983. Inceptisols. En Wilding, L.P, Smeck N.E., Hall G.F. Pedogenesis and soil taxonomy. The soil orders II. Developments in Soil Science 11B. Elsevier. 410 p.

Galloway, G. y Beer, J. 1997. Oportunidades para fomentar la silvicultura en cafetales en América Central. CATIE, Costa Rica: Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ. 165 p.

García, A. 1999. Actividad biológica global y mineralización neta del nitrógeno en tres suelos del valle de María Pinto, acondicionados con material orgánico. Tesis Ingeniero Agrónomo, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 70 p. En:

http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2005/faundez_p/html/index-frames.html

Geissen, V. y Brümer, G.W. 1999. Decomposition rates and feeding activities of soil fauna in deciduous forest soils in relation to soil chemical parameters following liming and fertilization. Biology and Fertility of Soils. 29:335-342.

Glover, N. y Beer, J. 1986. Nutrient cycling in two traditional Central American agroforestry systems. Agroforestry Systems. 4:77-87.

Gutiérrez, M. 2003. Disponibilidad y dinámica de nitrógeno en el suelo bajo especies maderables y leguminosas usadas como sombra en sistemas de café, en la subcuenca del Río Grande del General. Tesis M.Sc., CATIE. Turrialba, Costa Rica. 62p. En:

<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A0295e/A0295e.pdf>

Hadas, A., Eigenbaum, A. y Portnoy, R. 1986. Distribution of nitrogen forms and availability indices in profiles of differently managed soil types. SSSA. 50: 308-313.

Heuveldop, J. Alpizar, L., Fassbender, H.W., Enriquez, G., y Folster, H. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia Alliodora*) y café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. II Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. 35:347-355.

Holdridge, L. 1996. Ecología basada en zonas de vida. IICA. San José, Costa Rica. 216p.

Honeycutt, C.W. 1999. Nitrogen mineralization from soil organic matter and crop residues: field validation of laboratory predictions. *Soil Science Society of America Journal*. 63:134–141.

Hubbard, R.K., Bosch, D.D., Marshall, L.K., Strickland, T.C., Rowland, D., Griffin, T.S., Honeycutt, C.W., Albrecht, S.L., Sistani, K.R., Torbert Iii, H.A., Woodbury, B.L., Powell, J.M. y Wienhold, B.J. 2008. Nitrogen Mineralization of Broiler Litter Applied to Southeastern Coastal Plain Soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 63:182-192.

InfoStat. 2006. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

International Coffee Organization (ICO). 2008. En: <http://www.ico.org/ES/historicalc.asp>. [Junio 2008].

Kuo, S. 1996. Phosphorus. In: *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. En: D. L. Sparks *et al.* (editors). SSSA Book Ser. 5. SSSA. Madison, WI. USA. pp: 869-919.

Lamprecht, H. 1990. *Silviculture in the tropics: tropical forest ecosystems and their tree species; possibilities and methods for their long-term utilization*. GTZ. Eschborn, Alemania. pp. 31.

Lealv., L.A., Salamanca J., A. y Sadeghian, S. 2007. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Cenicafé*. 58:216-226.

Lemaitre, A., Chaussod, R., Tavant, Y. y Bruckert, S. 1995. An attempt to determine a pool of labile organic matter associated with the soil microbial biomass. *Europe and Journal Soil Biology* 31:121-125.

Li, Z.A., Peng, S.L., Rae, D.J. y Zhou, G.Y. 2001. Litter decomposition and nitrogen mineralization of soils in subtropical plantation forests of southern China, with special attention to comparisons between legumes and non-legumes. *Plant and Soil*. 229:105-116.

Little, E.L. Jr, Wadsworth, F.H., y Marrero, J. 2001. *Árboles comunes de Puerto Rico y las Islas Vírgenes*. 2ª ed. rev. Universidad de Puerto Rico. Río Piedras, Puerto Rico. 764 pp.

Livingston, G.P., Vitousek, P.M. y Matson, P.A. 1988. Nitrous-oxide flux and nitrogen transformations across a landscape gradient in Amazonia. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*. 93:1593–1599.

Maestri, M. y Barros, R.S. 1981. *Ecofisiología de cultivos tropicales*. CAFE. PROMECAFE. IICA. San José, Costa Rica. 50 p.

Mardonez, R. 2000. Variabilidad espacial de la mineralización del nitrógeno. Variabilidad espacial de la mineralización de nitrógeno en un suelo volcánico de la provincia de Ñuble, VIII Región, Chile. pp. 221-231.

Martín, G.M. y Rivera, R. 2004. Mineralización del nitrógeno de la *Canavalia ensiformis* en un suelo ferralítico rojo de La Habana. Cultivos tropicales. La Habana, Cuba. 25:3: 83-88.

Meléndez, G., Szott, T. y Ricse, A. 1995. Mineralización de nitrógeno de material foliar de especies de Inga. Nitrogen Fixing Tree Research Report (EUA). Turrialba, Costa Rica. pp 35-41.

Melillo, J.M., Aber, J.D., Linkins, A.E., Ricca, Fry, A.B. y Nadelhoffer, K. J. 1989. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: plant litter to soil organic matter. Plant and Soil 115:189-198.

Mengel, K. y Kirkby, E.A. 2000. Aplicación de fertilizantes. Principios de nutrición vegetal. Instituto Internacional de la Potasa. Basilea, Suiza.cap. 6:267-304.

Mogollón, J.P., García-Miragaya, J., Sánchez, L.F., Chacón, N. y Araujo, J. 1997. Nitrogeno potencialmente disponible en suelos de cafetales bajo diferentes arboles de sombra. Agronomía Tropical. 47:87-102.

Mondoñedo, J.R. 1957. Breve historia del café en el mundo. Revista de Agricultura de Puerto Rico XLIV. pp. 3-7.

Monroig-Ingles. 2008. Ecos del Café. En: <http://academic.uprm.edu/mmonroig/id58.htm> [Junio 2008].

Monroig-Inglés, M. 2000. Manual para una caficultura sostenible. Universidad de Puerto Rico. Recinto Universitario de Mayagüez. Colegio de Ciencias Agrícolas. Estación Experimental Agrícola. Río Piedras, Puerto Rico. 55 p.

Montagnini, F. y Jordan, C.F. 2002. Reciclaje de nutrientes. En: Ecología y conservación de bosques neotropicales. Universitario Regional. Cartago. pp. 268.

Montagnini, F. 1992. Sistemas agroforestales: Principios y aplicaciones en los trópicos. 2da. Ed. Organización para Estudios Tropicales. San José, Costa Rica. pp. 85.

Montagnini, F. y Buschbacher, R. 1989. Nitrification rates in two undisturbed tropical rain forests and three slash-and-burn sites of the Venezuelan Amazon. Biotrópica. 21:9–14.

Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen-Inorganic forms. In: Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods. En: D.L. Sparks et al. (eds.). SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI. pp. 1123-1184.

Muñiz-Torres, O. 1992. Uso de Fertilizantes en Puerto Rico: Enfoques prácticos; Guía Técnica. Universidad de Puerto Rico, Servicio de Extensión Agrícola, Mayagüez, PR. 26 p.

Muñiz-Torres, O. y Monroig-Inglés, M. 1994. Región cafetalera de Puerto Rico: Características y manejo de los suelos. Universidad de Puerto Rico. Colegio de Ciencias Agrícolas. Servicio de Extensión Agrícola. Puerto Rico. 17 p.

Muschler, R. 1997. Sombra o sol para un cafetal sostenible: un nuevo enfoque de una vieja discusión. XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura. San José, Costa Rica. Septiembre. pp. 471-475.

Navarro, C., Echeverría, H., Fonalleras, M., y Manavella, F. 1991. Efecto de los contenidos de humedad sobre la mineralización del nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo. 9:13-19.

Nelson, D.W., y Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter.. En: D.L. Sparks *et al.* (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Ser. no 5. SSSA and ASA, Madison, WI. pp. 961-1010.

OIRSA. 2008. Manual técnico: buenas practicas de cultivo en cafe organico. 2008. http://dokaestate.com/espanol/articulos/manual_cafe_organico_2001/index.html [Junio 2008].

Ortuzar, M.A., Aizpurua, A., Castellón, A., Alonso, A. y Estavillo, J.M. 2003. Evolución del contenido de nitrato y amonio en lixiviados bajo diferentes formas de fertilización nitrogenada en trigo. En: Álvarez-Benedí, J. y Marinero, P. (eds.). Actas de las VI Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI, Valladolid, España. pp. 45-49

Palm, C.A. y Sánchez, P.A. 1990. Decomposition and nutrient release of the leaves of three tropical legumes. Biotrópica. 22:330-338.

Palma, R.M., Defrieri, R.L., Tortarolo, M.F., Prause, J. y Gallardo, J.F. 2000. Seasonal changes of bioelements in the litter and their potential return to green leaves in four species of the Argentine Subtropical Forestal Annals of Botany. 85:181-186.

Paul, E.A. y Clark, F.E. 1989. Transformation of nitrogen between the organic and inorganic phase and to nitrate. p. 131–146. En: E.A. Paul and F.E. Clark (ed.) Soil microbiology and biochemistry. Academic Press, San Diego, CA. USA. pp. 131-146.

Pérez, C., Hedin, L. y Armesto, J. 1998. Nitrogen mineralization in two unpolluted old-growth forest of contrasting biodiversity and dynamics. Ecosystems. 1:361-373.

Pérez, C., Carmona, M. y Armesto, J. 2003. Non-Symbiotic nitrogen fixation, net nitrogen mineralization and denitrification in evergreen forest of Chiloé island, Chile: A comparison with other temperate forest. Gayana Botanical. 60:25-33.

Piirainen, S., Finér, L., Mannerkoski, H. y Starr, M. 2002. Effects of clear-cutting on the carbon and nitrogen fluxes through podzolic soil horizons. *Plant and Soil*. 239:301-311.

Quintero, J.S., y Ataroff, M. 1998. Contenido y flujos de nitrógeno en la biomasa y hojarasca de un cafetal a plena exposición solar en Los Andes venezolanos. *Revista Facultad Agronomía: LUZ*. 15:501-514.

Raison, R., Connell, M. y Ki-anna, P. 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biology and Biochemistry*. 19:521-530.

Reynolds-Vargas., J.S., Richter, D.D. y Bornemisza, E. 1994. Environmental impacts of nitrification and nitrate adsorption in fertilized andisols in the Valle of Costa Rica. *Soil Science*. 157:289-299.

Rice, C.W. y Havlin, J.L. 1994. Integrating mineralizable nitrogen indices into fertilizer nitrogen recommendations. En: Havlin, J.L. and J. Jacobsen (eds.). *Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations*. SSSA Sp. Pub. 40. SSSA. Madison, Wisconsin. USA. pp. 1-13.

Roskoski, J. 1982. Importancia de la fijación de nitrógeno en la economía del cafetal. En: Ávila J.E. y Gómez-Pomba A (Eds.). *Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa, México. pp 32-38.

Russo, R.O. y Budowski, G. 1986. Effect of pollarding frequency on biomass of *Erythrina poeppigiana* as a coffee shade tree. *Agroforestry Systems*. 4:145-162.

Saito M. e Ishii K. 1987: Estimation of soil nitrogen mineralization in corn-grown fields based on mineralization parameter. *Soil Science Plant Nutrition*. 33: 555-566.

Sánchez, P. 1976. *Properties and management of soils in the tropics*. Wiley, NY, USA. Pp. 84.

Schlatter J., Grez, R., y Gerding, V. 2003. *Manual para el reconocimiento de suelos*. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 114 p.

Sistani, K.R., Adeli, A., y Mc-Gowen, S.L., Tewolde, H. y Brink, G.E. 2008. Laboratory and field evaluation of broiler litter nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*. 99: 7:2603-2611.

Solórzano, P.P. 1997. *Fertilidad del suelo, su manejo en la producción agrícola*. Alcance (51) Universidad Central de Venezuela. Facultad de Agronomía. Maracay-Venezuela. 201 p.

Son, Y. 2001. Non-symbiotic nitrogen fixation in forest ecosystems. *Ecological Research of Forest Resources and Environmental Sciences*. 16:2:183-196.

Standish, R., Williams, P., Robertson, A., Scott, N. y Hedderley, D. 2004. Invasion by a perennial herb increases decomposition rate and alters nutrient availability in warm temperate lowland forest remnants. *Biological Invasions*. 6:71-81.

Stanford, G. y Smith, J.S. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *SSSA. Proceeding*. 36:465-477.

Suárez de Castro, F., y Rodríguez A. 1955. Equilibrio de materia orgánica en plantaciones de café. *CENICAFÉ*. 1:2-71.

Suárez R., M. 2004. Above ground forest biomass and carbon status in the Rio Grande de Arecibo watershed. Tesis M.S. Dpto. de Agronomía y Suelos. Universidad de Puerto Rico. Mayagüez, Puerto Rico. 109 p.

Sumner, M.E. y W.P. Miller. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. En: *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. Sparks *et al.* (eds.). SSSA Book Ser. 5. SSSA. Madison, WI. pp. 1201-1229.

Swift, M.J., Haeal, O.W. y Anderson, J.M. 1979. Decomposition in terrestrial Ecosystems. Blackwell Scientific (Ed). Oxford. UK. pp. 23.

Swift, M.J. 1985. Tropical soil biology and fertility: planning for research. *International Union of Biological Sciences. Special issue: 9*. Paris, France. 24 p.

The Southeast Regional Climate Center. 2008. En:
http://www.sercc.com/climateinfo/historical/historical_pr.html [Junio 2008].

Tisdale, S.L., Nelson, W., Beaton J. y Havlin, J. 1993. Soil fertility and fertilizers. 5th Ed. Macmillan Publishing Company. New York, USA. pp. 163.

Thomas, G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475-490. En Sparks, D.L. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3- Chemical Methods*. SSSA Book Series no. 5. Soil. Madison, WI. pp 475-489.

Torres, M. 2002. Fertilización nitrogenada del cultivo de maíz. En:
<http://www.elsitioagricola.com/articulos/duggan/Fertilizacion%20Nitrogenada%20del%20Cultivo%20de%20Maiz%20-%202002.asp> [Octubre 2008].

Urzúa, H. 2000. Fijación simbiótica de nitrógeno en Chile: Importante herramienta para una agricultura sustentable. *Proc. XX Reunión Latinoamericana de Rhizobiología*. Arequipa, Perú. p. 211-227.

USDA- United States Department of Agriculture. 2004. Census of Agriculture 2002, Puerto Rico. USDA-NASS. Washington, DC, USA. 219p. En:
http://www.nass.usda.gov/Census/Create_Census_PR.jsp

USDA. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. 1975. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. United State Department of Agricultural Handbook. 436. Washington, DC. USA. 754 pp.

Van Amelsvoort, P.A.M., Van Dongen, M. y Van der Werff, P.A. 1988. The impact of Collembola on humification and mineralization of soil organic matter. *Pedobiología* 31: 103-111.

Varnero, M.T. 1980. Mineralización in vitro del nitrógeno orgánico en un suelo granítico. *Investigación Agrícola*. 6:55-59.

Varnero, M.T. y Schaefer, R. 1992. Amonificación y nitrificación en relación con la temperatura y la humedad del suelo. *Investigación Agrícola*. 12:16- 26.

Vernimmen, R.E., Verhoef, H.A., Vestraten, J.M., Bruijnzeel, L.A., Klomp, N.S., Zoomer, H.R. y Watenbergh, P.E. 2007. Nitrogen mineralization, nitrification and denitrification potential in contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *Soil Biology and Biochemistry*. 39:12:2992-3003.

Vicente-Chandler, J., Abruña, F., Bosque Lugo, R. y Silva, S. 1968. Intensive coffee culture in Puerto Rico. *Agric. Exp. Station Univ. P.R. Boletín* 211.

Videla, C.C., Ferrari, J.L., Echeverría, H.E. y Travaso, M.I. 1996. Transformaciones del nitrógeno en el cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo*. 14:1-6.

Vitousek, P.M. y Matson, P.A. 1988. Nitrogen transformations in a range of tropical forest soils, *Soil Biology and Biochemistry*. 20:361–367.

Vitousek, P.M., Turner, D.R., Parton, W.J. y Sanford, R.L. 1994. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models. *Ecology*. 72:418-429.

Vogt, C.A., Vogt, D.J., Brown, S., Tilley, J.P., Edmonds, R.L., Silver, W.L. y Siccama, T.G. 1995. Dynamics of forest floor and soil organic matter accumulation in boreal, temperate, and tropical forests. En: Lal R, Kimble J, Stewart BA (eds) *Soil management and greenhouse effect. Advances in Soil Science*. CRC. Boca Ratón. pp. 159-178.

Waring, S.A. y Bremner, J.M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index on nitrogen availability. *Nature*. 201:951–952.

Weaver P.L. y Birdsey, A. 1986. Tree succession and management opportunities in coffee shade stands. *Turrialba*. 36:47-58.

Wolf, J. & van Keulen, H. 1989. Modelling long term crop response to fertilizer and soil nitrogen. II. Comparison with field results. *Plant Soil*, 120: 23-38.

Young, A. 1999. *Agroforestry for soil management*. (2ed) Wallingford, CAB International – ICRAF. UK. 276 p.

Zamorano, J. 2000. Actividad biológica aeróbica del suelo en un bosque de *Nothofagus betuloides* (Mirb.) Oest., Parque Nacional Puyehue. Tesis Ingeniería Forestal. Valdivia, Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. 60 p.

10. APÉNDICES

Apéndice 1. Descripción general de las fincas donde se establecieron las parcelas experimentales bajo estudio.

AGRICULTOR	ÁREA	PARCELA*	GPS	ALTURA (msnm)	LAT (Norte)	LON (Oeste)	VARIETADES
Localidad: Lares							
Suelo: Inceptisol Serie: Anones (AoF2)							
Pedro Pons Colón	70 CDAS. (28 ha)	LAP1SL	278	575	18°11' 42.3" N	66°50' 53.6" W	Limaní Caturra/ Bourbon Catuai/Arábigo
		LAP2SL	279	576	18°11' 43.7" N	66°50' 54.9" W	
		LAP3SL	280	568	18°11' 43.3" N	66°50' 54.6" W	
		LAP1SM	275	626	18°12' 01.7" N	66°50' 48.6" W	
		LAP2SM	276	664	18°11' 59.3" N	66°50' 48.6" W	
		LAP3SM	277	617	18°11' 59.4" N	66°50' 49.0" W	
		LAP1BQ	281	613	18°11' 44.9" N	66°50' 54.8" W	Bosque secundario > 50 años
		LAP2BQ	282	605	18°11' 45.5" N	66°50' 55.6" W	
LAP3BQ	283	594	18°11' 46.1" N	66°50' 56.8" W			
Localidad: Jayuya							
Suelo: Oxisol Serie: Los Guineos (LgF y LgE, respectivamente)							
Angel Santiago	84 CDAS. (34 ha)	JYP1SL	266	769	18°10' 05.3" N	66°37' 51.0" W	Robusta/ Limaní Paca/ Arábigo Caturra/ Bourbon
		JYP2SL	267	761	18°10' 05.4" N	66°37' 50.5" W	
		JYP3SL	268	763	18°10' 05.3" N	66°37' 48.5" W	
William Medina	10 CDAS. (4 ha)	JYP1SM	269	801	18°09' 42.1" N	66°38' 47.6" W	Limaní Caturra/ Bourbon
		JYP2SM	270	787	18°09' 41.6" N	66°38' 45.7" W	
		JYP3SM	271	766	18°09' 41.7" N	66°38' 46.3" W	
		JYP1BQ	272	817	18°09' 42.0" N	66°38' 46.0" W	Bosque secundario >30 años
		JYP2BQ	273	817	18°09' 45.3" N	66°38' 46.6" W	
		JYP3BQ	274	817	18°09' 45.7" N	66°38' 44.6" W	
Localidad: Las Marías							
Suelo: Ultisol Serie: Humatas (HmE2)							
Miguel Avilés	10 CDAS. (4 ha)	LMP1SL	290	327	18°14' 42.8" N	67°00' 25.6" W	Caturra/ Bourbon Robusta/ Limaní
		LMP2SL	291	278	18°14' 44.6" N	67°00' 24.3" W	
		LMP3SL	292	286	18°14' 44.6" N	67°00' 23.8" W	
Dominga Irrizarry	8 CDAS. (3.2 ha)	LMP1SM	284	279	18°14' 40.3" N	67°00' 07.8" W	Paca
		LMP2SM	285	308	18°14' 39.4" N	67°00' 07.9" W	
		LMP3SM	286	278	18°14' 38.2" N	67°00' 07.0" W	
Miguel Avilés	4 CDAS. (1.6 ha)	LMP1BQ	287	297	18°14' 41.7" N	67°00' 25.4" W	Bosque secundario > 50 años
		LMP2BQ	288	288	18°14' 42.2" N	67°00' 25.9" W	
		LMP3BQ	289	285	18°14' 42.7" N	67°00' 26.6" W	

*LM = Las Marías, JY= Jayuya, LA= Lares; P1, P2 y P3 = Parcelas 1, 2 y 3 (repeticiones), SL = Café Sol, SM = Café Sombra y BQ = Bosque Secundario. CDAS=Cuerdas = 3,930 m², ha= hectáreas

Apéndice 3. Lista general de la vegetación encontrada en las zonas de estudio.

No.	Familia	Nombre Científico	Nombre Común	Localidad **	Hábito
1	Araceae	<i>Philodendrum sp.</i>	Bejuco	LM, LA, JY	Bejuco
2	Araceae	<i>Xanthosoma undipes</i>	Yautia silvestre	LM	Herbáceo
3	Araceae	<i>Diffenbachia seguine</i>	Rabano silvestre	JY	Herbáceo
4	Araliaceae	<i>Shefflera morototonii</i>	Yagrumo macho	LA, LM	Árbol
5	Asteraceae	<i>Parthenium hysterophorus</i>	Yerba amarga	LM, LA, JY	Herbáceo
6	Bignonaceae	<i>Spathodea campanulata</i>	Tulipán africano	LM, LA	Árbol
7	Boraginaceae	<i>Cordia alliodora</i>	Capa prieto	LM, LA, JY	Árbol
8	Boraginaceae	<i>Cordia sulcata</i>	Moral	JY	Árbol
9	Bromeliaceae	<i>Bromelia pinguin</i>	Bromelia	JY	Herbáceo
10	Commelinaceae	<i>Commelina diffusa</i>	Cohitre	JY	Herbáceo
11	Compositae	<i>Melanthera aspera</i>	Yerba de cabra	LM, LA, JY	Herbáceo
12	Compositae	<i>Pseudoelephantopus sp.</i>	Hierba	LM, LA, JY	Herbáceo
13	Convolvulaceae	<i>Ipomoea tiliaceae</i>	Bejuco de puerco	LM	Bejuco
14	Cucurbitaceae	<i>Momordica charantia</i>	Cundeamor	LM, LA, JY	Bejuco
15	Cyatheaceae	<i>Cyathea arborea</i>	Helecho arbóreo	JY	Árbol
16	Flacourtiaceae	<i>Casearea sylvestris</i>	Cafeillo	LA	Árbol
17	Lauraceae	<i>Persea americana</i>	Aguacate	LA	Árbol
18	Leguminosae	<i>Andira inermis</i>	Moca	LA	Árbol
19	Leguminosae	<i>Aeschynomene sp.</i>	Morivivi Bobo	JY	Herbáceo
20	Leguminosae	<i>Inga fagifolia</i>	Guama	LM, LA, JY	Árbol
21	Leguminosae	<i>Inga vera</i>	Guaba	LM, LA, JY	Árbol
22	Malvaceae	<i>Sida acuta</i>	Escobilla	JY	Herbáceo
23	Melastomataceae	<i>Miconia prasina</i>	Camasey	LM, LA, JY	Arbusto
24	Menispermaceae	<i>Miconia racemosa</i>	Camasey	LM, LA, JY	Arbusto
25	Moraceae	<i>Cecropia peltata</i>	Yagrumo	LA, LM	Árbol
26	Moraceae	<i>Cecropia schreberianap</i>	Yagrumo hembra	LA, LM	Árbol
27	Musaceae	<i>Musa sp.</i>	Plátano/Guineo	LM, LA, JY	Árbol
28	Myrtaceae	<i>Eugenia rhombea</i>	Hoja menuda	LM, LA, JY	Árbol

29	Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	Guayaba	LM, LA, JY	Arbusto
30	Myrtaceae	<i>Syzygium jambos</i>	Pomarrosa	LA, JY	Árbol
31	Nyctaginaceae	<i>Guapira fragans</i>	Corcho	LA	Árbol
32	Palmae	<i>Roystonea regia</i>	Palma real cubana	JY	Árbol
33	Passifloraceae	<i>Passiflora edulis</i>	Parcha	LM	Bejuco
34	Piperaceae	<i>Piper aduncum</i>	Higuillo	LA,LM	Arbusto
35	Polipodyaceae	<i>Adiantum pyramidale</i>	Helecho	LM, LA, JY	Herbáceo
36	Rubiaceae	<i>Coffea arabica</i>	Café	LM, LA, JY	Arbusto
37	Rubiaceae	<i>Coffea excelsa</i>	Café excelsa	LM, LA, JY	Árbol
38	Rutaceae	<i>Citrus sp.</i>	Cítrico	LM, LA, JY	Árbol
39	Sapindaceae	<i>Guarea guidonea</i>	Guaraguao	LM, LA, JY	Árbol

Apéndice 4. Características generales del suelo Oxisol (Los Guineos- LgE)

LgE—Los Guineos clay, 20 to 40 percent slopes

Map Unit Setting

Elevation: 1,900 to 3,000 feet

Mean annual precipitation: 110 to 130 inches

Mean annual air temperature: 61 to 72 degrees F

Frost-free period: 365 days

Map Unit Composition

Los guineos and similar soils: 100 percent

Description of Los Guineos

Setting

Landform: Mountain slopes, ridges

Landform position (two-dimensional): Backslope, shoulder, summit

Landform position (three-dimensional): Mountainflank, mountaintop

Down-slope shape: Linear

Across-slope shape: Concave

Parent material: Residuum

Properties and qualities

Slope: 20 to 40 percent

Depth to restrictive feature: More than 80 inches

Drainage class: Moderately well drained

Capacity of the most limiting layer to transmit water (Ksat): Moderately high to high
(0.57 to 1.98 in/hr)

Depth to water table: More than 80 inches

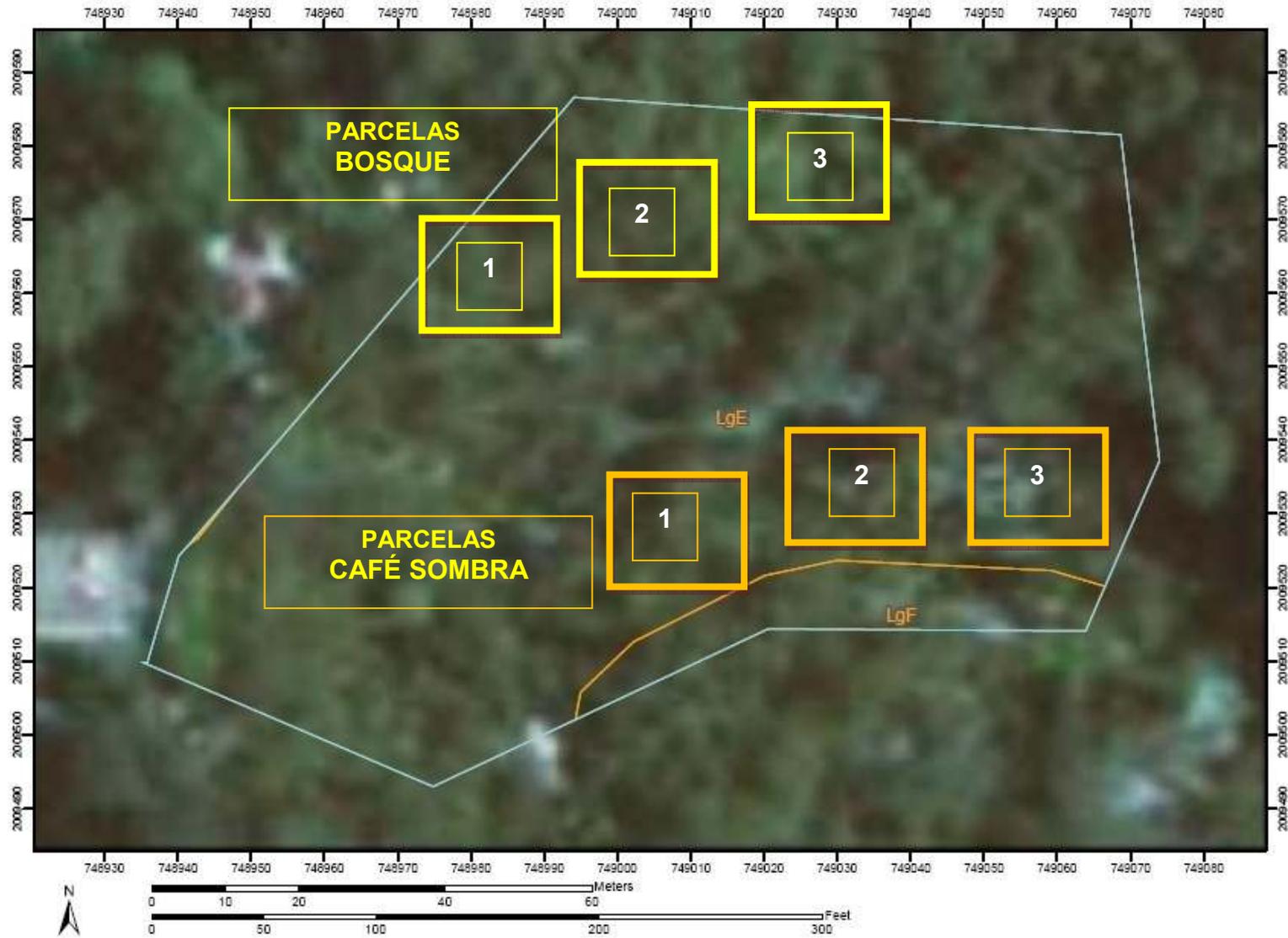
Frequency of flooding: None

Frequency of ponding: None

Available water capacity: High (about 9.6 inches)

<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 5. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSM y BQS en Jayuya (Suelo Oxisol).



<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 6. Características generales del suelo Oxisol (Los Guineos- LgF)

LgF—Los Guineos clay, 40 to 60 percent slopes

Map Unit Setting

Elevation: 1,900 to 3,000 feet
Mean annual precipitation: 110 to 130 inches
Mean annual air temperature: 61 to 72 degrees F
Frost-free period: 365 days

Map Unit Composition

Los guineos and similar soils: 100 percent

Description of Los Guineos

Setting

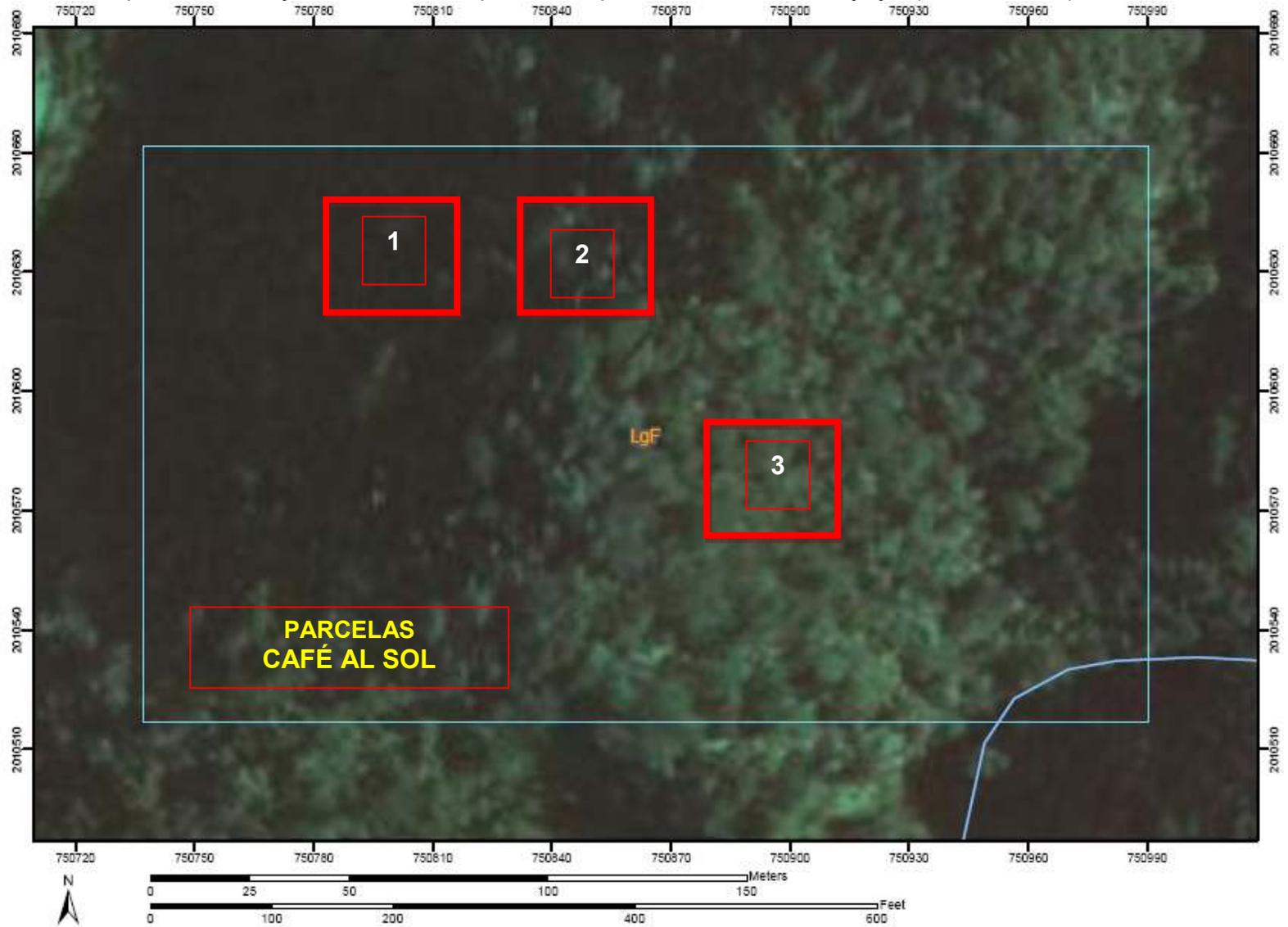
Landform: Mountain slopes, ridges
Landform position (two-dimensional): Backslope, shoulder, summit
Landform position (three-dimensional): Mountainflank, mountaintop
Down-slope shape: Linear
Across-slope shape: Concave
Parent material: Residuum

Properties and qualities

Slope: 40 to 60 percent
Depth to restrictive feature: More than 80 inches
Drainage class: Moderately well drained
Capacity of the most limiting layer to transmit water (Ksat): Moderately high to high
(0.57 to 1.98 in/hr)
Depth to water table: More than 80 inches
Frequency of flooding: None
Frequency of ponding: None
Available water capacity: High (about 9.6 inches)

<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 7. Mapa de suelos y localización de parcela experimental CSL en Jayuya (Suelo Oxisol).



<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 8. Características generales del suelo Inceptisol (Anones- AoF2)

AoF2—Anones clay loam, 40 to 60 percent slopes, eroded

Map Unit Setting

Elevation: 600 to 1,200 feet
Mean annual precipitation: 70 to 90 inches
Mean annual air temperature: 75 to 79 degrees F
Frost-free period: 365 days

Map Unit Composition

Anones and similar soils: 100 percent

Description of Anones

Setting

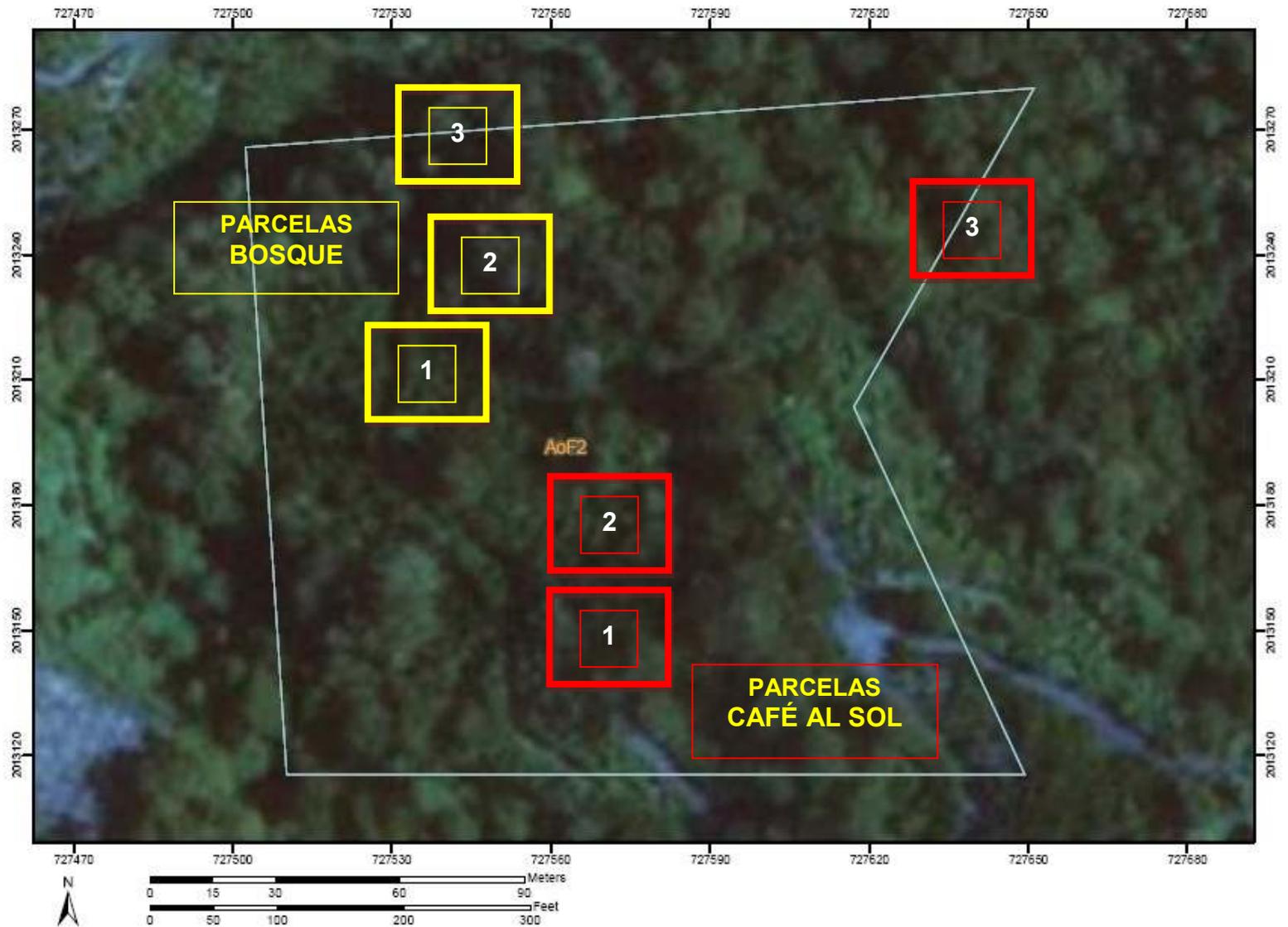
Landform: Mountain slopes
Landform position (two-dimensional): Backslope
Landform position (three-dimensional): Mountainflank
Down-slope shape: Concave, convex
Across-slope shape: Linear
Parent material: Weathered material

Properties and qualities

Slope: 40 to 60 percent
Depth to restrictive feature: 20 to 36 inches to paralithic bedrock
Drainage class: Well drained
Capacity of the most limiting layer to transmit water (Ksat): Moderately low (0.14 in/hr)
Depth to water table: More than 80 inches
Frequency of flooding: None
Frequency of ponding: None
Available water capacity: Low (about 4.7 inches)

<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 9. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSL y BQS en Lares.



<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 10. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSM en Lares.



<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 11. Características generales del suelo Ultisol (Humatas- HmE2)

HmE2—Humatas clay, 20 to 40 percent slopes, eroded

Map Unit Setting

Elevation: 500 to 1,400 feet
Mean annual precipitation: 31 to 86 inches
Mean annual air temperature: 69 to 89 degrees F
Frost-free period: 365 days

Map Unit Composition

Humatas and similar soils: 100 percent

Description of Humatas

Setting

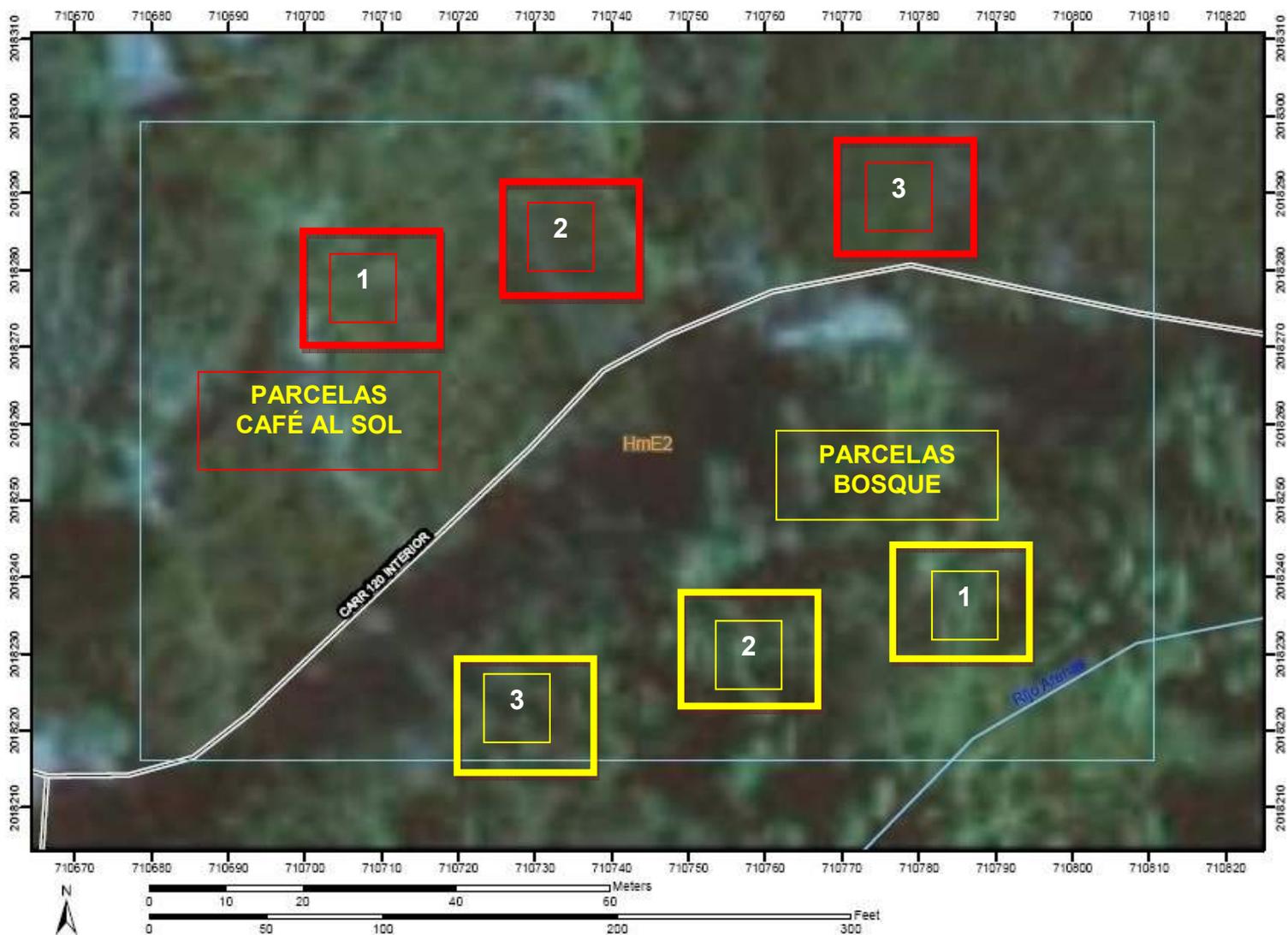
Landform: Mountain slopes, ridges
Landform position (two-dimensional): Backslope, shoulder, summit
Landform position (three-dimensional): Mountaintop, mountainflank
Down-slope shape: Linear, convex
Across-slope shape: Linear, convex
Parent material: Residuum clayey and loamy materials

Properties and qualities

Slope: 20 to 40 percent
Depth to restrictive feature: More than 80 inches
Drainage class: Well drained
Capacity of the most limiting layer to transmit water (Ksat): Moderately low (0.01 to 0.14 in/hr)
Depth to water table: More than 80 inches
Frequency of flooding: None
Frequency of ponding: None
Available water capacity: Moderate (about 8.3 inches)

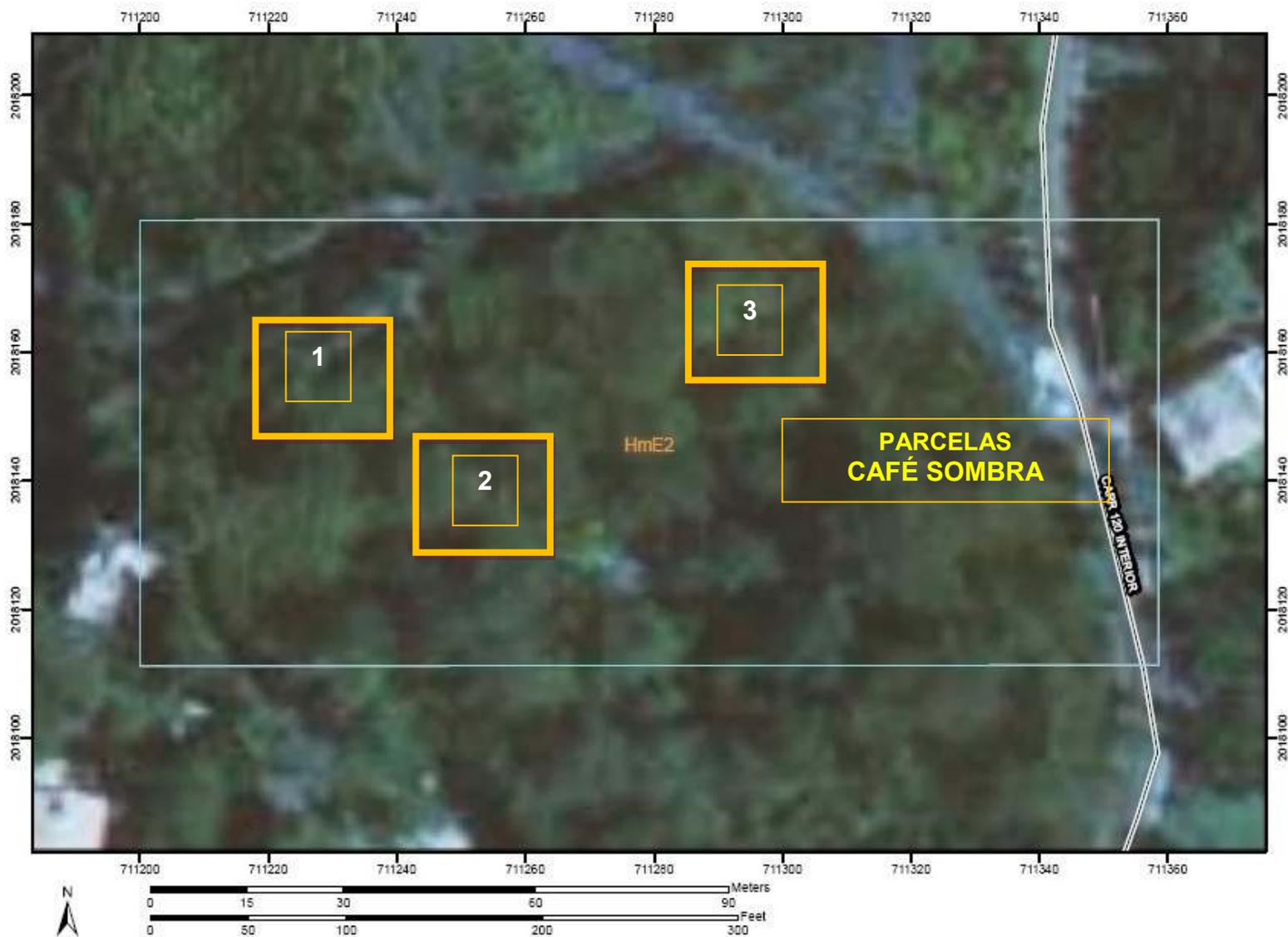
<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 12. Mapa de suelos y localización de parcelas experimentales CSL y BQS en Las Marías.



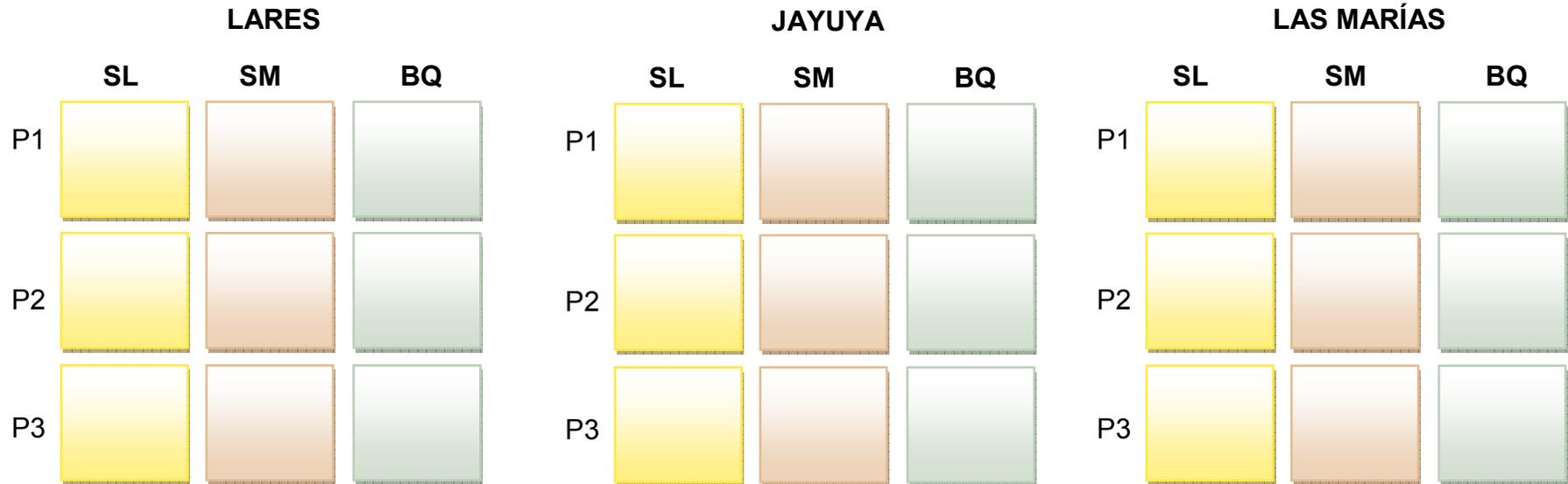
<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 13. Mapa de suelos y localización de parcela experimental CSM en Las Marías.



<http://websoilsurvey.nrcs.usda.gov/app/WebSoilSurvey.aspx>

Apéndice 14. Croquis No. 1. Aportación anual de hojarasca en suelos bajo dos agrosistemas de producción de café y un bosque secundario.

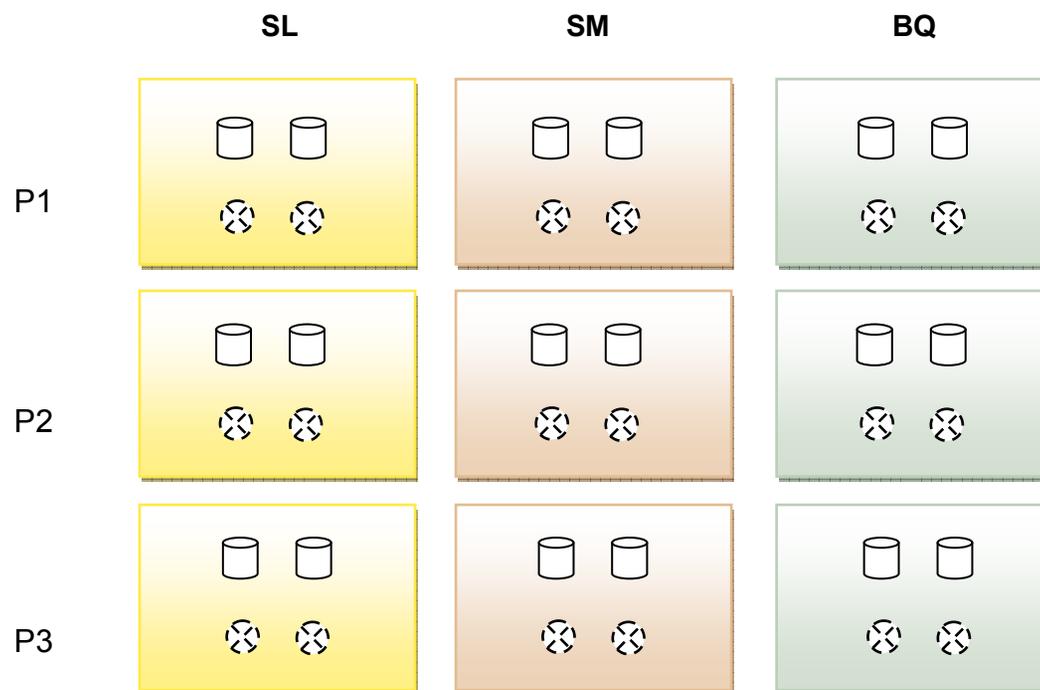


Leyenda:

SL = Sol
SM = Sombra
BQ = Bosque

P1, P2, P3 = Parcelas experimentales 1,2 y 3 (repeticiones)
Área parcela experimental: 400 m² (20 m x 20 m)

Apéndice 15. Croquis No. 2. Mineralización de N *in situ* en dos agrosistemas de producción de café y bosque secundario en un Ultisol.



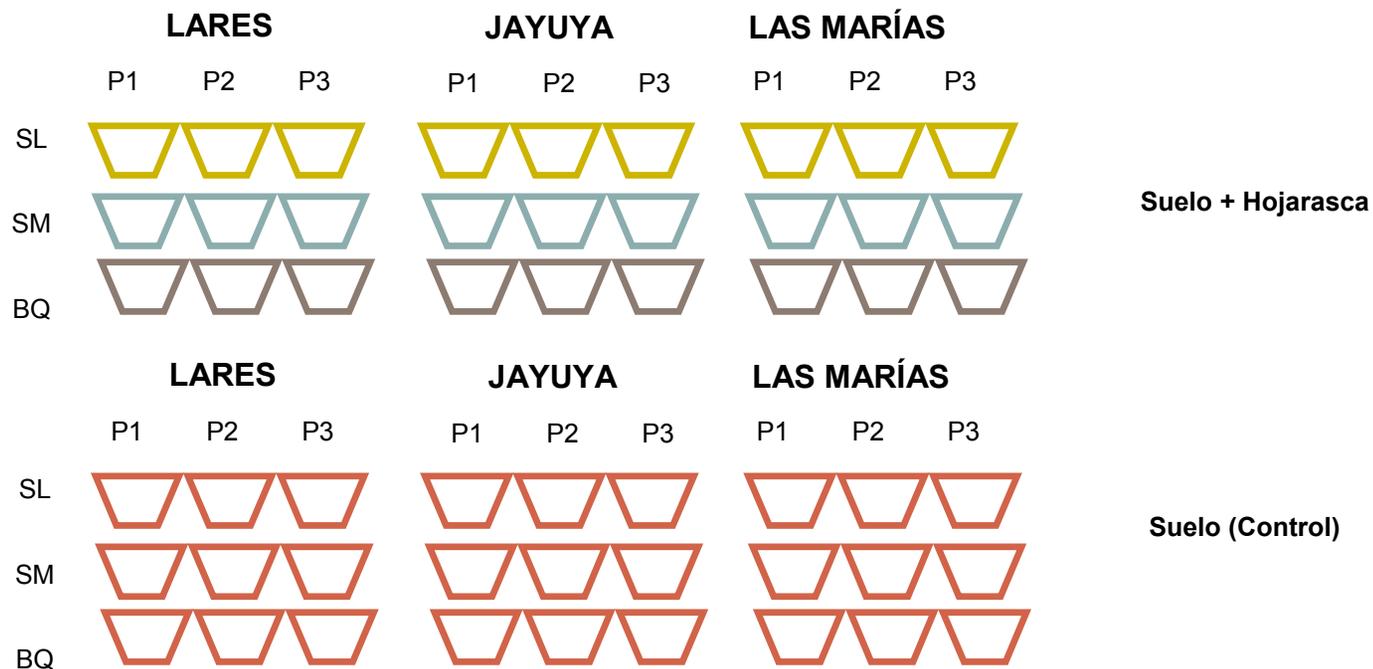
Leyenda:

SL = Sol
 SM = Sombra
 BQ = Bosque

  Suelo incubado en tubos PVC
  Suelo sin incubar (control)

P1, P2, P3 = Parcelas 1,2 y 3 (repeticiones)

Apéndice 16. Croquis No. 3. Mineralización de N en suelos bajo dos agrosistemas de café y un bosque en condiciones de laboratorio.



Tratamientos:

-  Suelo + hojarasca de café al sol (S + CSL)
-  Suelo + hojarasca de café a sombra (S + CSM)
-  Suelo + hojarasca de bosque secundario (S + BQS)
-  Suelo solo (CT) << Control

Leyenda:

S= Suelo; CSL = Café Sol; CSM = Café Sombra;
P1, P2 y P3 = Parcelas 1, 2 y 3 (repeticiones)

BQS = Bosque Secundario; CT= Control

Apéndice 17. Mineralización de N en un Ultisol bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de campo.

TRATAM	TIEMPO (SEMANAS)	NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)			NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)			N inorgánico total (mg kg ⁻¹)			NMIM (mg Kg-1)		
		CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS
SUELO	3	4.83	6.02	3.89	6.65	5.92	9.14	11.48	11.94	13.03	4.62	13.62	7.10
TUBO	3	6.86	11.22	6.07	9.23	14.35	14.06	16.1	25.56	20.12			
SUELO	6	7.72	6.02	3.95	8.32	4.02	1.97	16.04	10.03	5.92	7.06	9.76	7.90
TUBO	6	10.37	8.09	6.25	12.73	11.7	7.57	23.1	19.79	13.82			
SUELO	9	11.11	14.11	13.51	0	0.76	0.58	11.11	14.87	14.09	-0.23	-2.46	-0.17
TUBO	9	10.4	10.26	12.15	0.48	2.15	1.77	10.88	12.41	13.92			
SUELO	12	18.24	16.85	10.35	6.31	9.82	12	24.55	26.68	22.34	-2.98	-1.59	0.36
TUBO	12	14.22	13.03	9.17	7.35	12.06	13.53	21.57	25.09	22.7			
SUELO	15	8.15	6.89	2.25	15.16	9.85	8.87	23.31	16.74	11.11	4.9	14.44	15.18
TUBO	15	10.08	15.48	9.09	18.13	15.7	17.21	28.21	31.18	26.29			
SUELO	18	5.92	2	8.8	7.08	7.73	6.85	13	9.73	15.65	4.84	6.97	11.32
TUBO	18	7.36	6.89	12.58	10.48	9.82	14.38	17.84	16.71	26.96			
SUELO	21	2.88	5.64	3.74	5.75	5.47	7.85	8.63	11.12	11.59	7.08	9.81	8.28
TUBO	21	4.23	12.23	7.34	11.48	8.7	12.53	15.71	20.93	19.87			
SUELO	24	12.95	17.55	17.22	13.5	12.49	14.17	26.44	30.04	31.39	-2.77	-6.03	-3.28
TUBO	24	8.15	15.71	12.59	15.52	8.3	15.52	23.67	24.01	28.11			

Apéndice 18. Mineralización de N en un Oxisol con y sin adición de hojarasca bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de laboratorio.

TRATAM	TIEMPO (SEMANAS)	NH ₄ -N (mg Kg ⁻¹)			NO ₃ -N (mg Kg ⁻¹)			N inorgánico total (mg Kg ⁻¹)			NMIM (mg Kg ⁻¹)		
		CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS
SIN	0	7.11	4.73	1.87	0.63	-4.46	-1.63	7.74	0.28	0.24	2.96	12.41	11.46
CON	0	8.40	10.40	7.33	2.29	2.28	4.37	10.69	12.69	11.70			
SIN	1	10.19	6.91	6.60	2.99	5.52	0.26	13.18	12.43	6.85	4.48	7.06	12.88
CON	1	12.02	10.37	12.32	5.64	9.12	7.41	17.66	19.50	19.73			
SIN	2	12.44	4.56	1.89	6.79	-3.88	2.04	19.23	0.68	3.93	5.13	11.11	10.48
CON	2	14.15	9.19	7.16	10.21	2.59	7.25	24.36	11.78	14.41			
SIN	3	6.45	5.56	5.84	-2.20	0.67	5.14	4.25	6.24	10.98	5.35	12.08	11.77
CON	3	8.04	11.23	11.21	1.56	7.09	11.54	9.60	18.32	22.75			
SIN	4	5.66	5.83	4.15	-2.21	0.12	-0.40	3.45	5.95	3.75	3.88	10.37	14.57
CON	4	6.20	11.15	11.10	1.14	5.17	7.22	7.33	16.32	18.32			
SIN	5	3.31	3.84	4.88	0.18	-1.92	-1.49	3.50	1.92	3.39	9.53	10.86	8.15
CON	5	7.91	9.32	10.21	5.12	3.45	1.33	13.02	12.78	11.54			
SIN	7	5.88	3.60	3.29	1.84	4.63	-4.08	7.72	8.24	-0.79	4.23	10.51	12.88
CON	7	7.65	9.10	7.75	4.29	9.64	4.34	11.95	18.74	12.10			
SIN	9	8.48	4.46	4.24	1.91	0.04	5.98	10.40	4.50	10.23	3.45	9.73	13.01
CON	9	9.38	9.93	11.59	4.47	4.31	11.64	13.84	14.24	23.23			
SIN	11	2.78	1.87	2.81	-0.37	-2.58	-5.22	2.41	-0.71	-2.41	8.14	12.34	13.35
CON	11	7.23	7.53	8.57	3.31	4.09	2.38	10.55	11.63	10.95			
SIN	13	9.37	5.66	7.30	0.22	5.05	-1.40	9.58	10.71	5.90	5.01	10.28	11.27
CON	13	10.90	11.43	12.78	3.69	9.56	4.39	14.59	20.99	17.17			
SIN	15	1.80	3.58	3.70	1.25	-6.99	5.33	3.04	-3.41	9.03	5.08	12.79	11.15
CON	15	4.45	8.97	9.06	3.67	0.41	11.12	8.13	9.38	20.18			
SIN	17	6.30	1.63	9.60	10.16	4.74	7.28	16.46	6.37	16.88	6.13	12.36	10.14
CON	17	8.81	7.31	14.12	13.78	11.42	12.90	22.59	18.73	27.02			

Apéndice 19. Mineralización de N en un Inceptisol con y sin hojarasca bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de laboratorio.

TRATAM	TIEMPO (SEMANAS)	NH ₄ -N (mg Kg ⁻¹)			NO ₃ -N (mg Kg ⁻¹)			N inorgánico total (mg Kg ⁻¹)			NMIM (mg Kg ⁻¹)		
		CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS
SIN	0	2.14	3.98	6.03	4.18	1.98	0.02	6.32	5.96	6.06	3.62	7.61	10.37
CON	0	2.88	6.87	9.69	7.06	6.70	6.74	9.94	13.57	16.43			
SIN	1	4.07	0.72	0.23	7.35	4.60	2.33	11.42	5.32	2.56	2.85	6.35	7.84
CON	1	5.56	4.90	5.66	8.71	6.77	4.74	14.27	11.67	10.40			
SIN	2	6.20	0.92	0.88	2.38	3.77	1.11	8.58	4.69	1.99	3.87	7.92	13.13
CON	2	7.70	6.14	6.31	4.75	6.47	8.81	12.45	12.60	15.12			
SIN	3	4.17	5.91	4.32	2.11	0.68	3.41	6.28	6.59	7.73	2.93	8.46	11.49
CON	3	4.62	9.35	9.57	4.59	5.71	9.65	9.21	15.06	19.22			
SIN	4	5.19	3.06	1.96	-0.01	1.62	0.52	5.18	4.68	2.48	4.07	11.94	13.17
CON	4	6.71	8.38	7.39	2.54	8.24	8.26	9.26	16.62	15.65			
SIN	5	4.71	4.95	3.05	2.34	0.88	6.13	7.06	5.83	9.18	6.23	11.76	13.40
CON	5	7.61	9.36	8.54	5.67	8.23	14.04	13.29	17.59	22.58			
SIN	7	1.91	5.01	6.35	5.85	6.00	-2.18	7.76	11.01	4.17	5.18	9.06	13.46
CON	7	4.41	10.32	12.96	8.53	9.75	4.67	12.94	20.07	17.63			
SIN	9	3.98	6.59	5.43	-0.32	2.00	0.93	3.66	8.59	6.37	5.21	11.54	8.63
CON	9	7.37	12.12	10.46	1.51	8.01	4.54	8.87	20.13	15.00			
SIN	11	4.72	8.02	6.72	3.18	4.22	1.45	7.90	12.24	8.17	3.73	9.80	10.71
CON	11	6.99	13.61	10.62	4.64	8.43	8.26	11.62	22.03	18.88			
SIN	13	7.00	8.19	6.79	9.74	6.16	8.45	16.74	14.35	15.24	6.30	10.99	8.96
CON	13	9.47	13.70	12.37	13.57	11.64	11.83	23.04	25.34	24.20			
SIN	15	1.71	6.91	8.93	4.12	-3.11	6.04	5.82	3.79	14.97	8.77	9.68	11.67
CON	15	7.13	12.02	13.65	7.47	1.46	13.00	14.60	13.48	26.64			
SIN	17	10.89	9.64	4.26	3.34	6.49	4.43	14.23	16.13	8.69	5.78	7.93	11.85
CON	17	13.38	12.86	9.01	6.63	11.20	11.53	20.02	24.06	20.54			

Apéndice 20. Mineralización de N en un Ultisol con y sin adición de hojarasca bajo CSL, CSM y BQS en condiciones de laboratorio.

TRATAM	TIEMPO (SEMANAS)	NH ₄ -N (mg Kg ⁻¹)			NO ₃ -N (mg Kg ⁻¹)			N inorgánico total (mg Kg ⁻¹)			NMIM (mg Kg ⁻¹)		
		CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS	CSL	CSM	BQS
SIN	0	11.07	10.41	7.62	7.65	-4.59	6.69	18.71	5.82	14.31	4.37	9.39	7.12
CON	0	11.70	12.88	9.15	11.38	2.33	12.29	23.08	15.21	21.43			
SIN	1	8.19	8.04	7.14	-0.24	1.28	5.86	7.95	9.32	13.00	3.58	10.15	5.36
CON	1	8.84	12.32	8.96	2.69	7.15	9.40	11.53	19.46	18.36			
SIN	2	12.20	7.40	10.93	5.57	0.90	6.23	17.77	8.31	17.16	4.27	8.85	5.64
CON	2	14.02	10.96	13.23	8.02	6.20	9.57	22.04	17.16	22.80			
SIN	3	8.46	4.41	4.73	4.71	5.28	4.60	13.16	9.69	9.33	3.16	9.26	9.01
CON	3	9.24	8.19	8.31	7.09	10.75	10.03	16.33	18.94	18.34			
SIN	4	7.15	8.39	6.28	7.04	5.89	6.48	14.20	14.28	12.75	6.98	12.90	10.80
CON	4	9.72	14.11	11.34	11.45	13.07	12.21	21.17	27.18	23.56			
SIN	5	10.88	3.69	10.02	7.18	4.98	2.90	18.05	8.66	12.92	6.62	11.22	10.98
CON	5	13.06	9.10	14.43	11.62	10.78	9.47	24.67	19.88	23.90			
SIN	7	7.08	1.22	9.51	6.75	4.30	5.24	13.83	5.53	14.74	6.67	10.83	8.33
CON	7	8.26	6.69	12.20	12.24	9.67	10.87	20.50	16.36	23.07			
SIN	9	13.36	10.84	7.64	1.03	3.13	6.56	14.39	13.97	14.20	7.72	9.36	9.85
CON	9	13.78	14.09	11.15	8.32	9.24	12.90	22.11	23.33	24.06			
SIN	11	7.18	1.14	9.46	7.81	2.72	6.82	14.99	3.86	16.27	6.07	13.97	9.67
CON	11	8.84	6.71	13.02	12.22	11.13	12.92	21.06	17.84	25.94			
SIN	13	6.81	6.38	3.05	8.63	0.38	6.79	15.44	6.76	9.84	6.17	14.86	10.75
CON	13	9.52	11.81	8.33	12.09	9.82	12.26	21.61	21.63	20.59			
SIN	15	5.53	1.83	0.02	9.22	4.86	6.72	14.76	6.69	6.74	6.23	13.88	10.94
CON	15	8.03	7.31	4.33	12.95	13.27	13.34	20.98	20.57	17.68			
SIN	17	3.80	4.96	8.03	7.37	8.35	6.43	11.17	13.30	14.47	6.57	9.88	13.70
CON	17	5.65	8.62	14.08	12.09	14.56	14.08	17.74	23.19	28.17			

Apéndice 21. ANOVA. Aportación promedio anual de hojarasca en CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Localidad	0.67	2	0.33	11.68	0.0085
Error A	0.17	6	0.03	-	-
Ecosistema	4.35	2	2.18	46.34	0.0001
Localidad x Ecosistema	0.94	4	0.24	5.02	0.0008
Tiempo	2.68	11	0.24	5.07	0.0001
Error B	3.46	71	0.05	-	-
Localidad x Tiempo	2.17	22	0-10	2.10	0.0050
Ecosistema x Tiempo	2.07	22	0.09	2.00	0.0082
Localidad x Ecosistema x Tiempo	3.68	44	0.08	1.78	0.0059
Error	6.76	139	0.05	-	-
Total	27.10	323	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 22. ANOVA del contenido de Carbono en la hojarasca proveniente de en CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Ecosistema	321.14	2	160.57	4.62	0.0611
Error A	208.59	6	34.76	-	-
Tiempo	77.72	2	38.86	1.61	0.2404
Ecosistema x Tiempo	72.28	4	18.07	0.75	0.5778
Error	289.81	12	24.15	-	-
Total	969.54	26	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio. Los datos fueron transformados a raíz cuadrada para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza.

Apéndice 23. ANOVA del contenido de Nitrógeno en la hojarasca proveniente de en CSL, CSM y BQS en Jayuya, Lares y Las Marías.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Ecosistema	9.14	2	4.57	3.14	0.1168
Error A	8.74	6	1.46	-	-
Tiempo	4.92	2	2.46	4.76	0.0301
Ecosistema x Tiempo	4.49	4	1.12	2.17	0.134
Error	6.2	12	0.52	-	-
Total	33.49	26	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio. Los datos fueron transformados a raíz cuadrada para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza

Apéndice 24. ANOVA de tasa de amonificación en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Ecosistema	62.26	2	31.13	276.10	0.0001
Error A	0.68	6	0.11	-	-
Tiempo	811.52	7	115.93	894.70	0.0001
Ecosistema x Tiempo	137.24	14	9.80	75.66	0.0001
Error	5.44	42	0.13	-	-
Total	1017.14	71	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 25. ANOVA de tasa de nitrificación en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Sistema	30.45	2	15.23	12.85	0.0068
Error A	7.11	6	1.18	-	-
Tiempo	357.24	7	51.03	70.14	0.0001
Tratamiento x Tiempo	212.30	14	15.16	20.84	0.0001
Error	30.56	42	0.73	-	-
Total	637.67	71	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 26. ANOVA de tasa de NMIN en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Ecosistema	134.39	2	67.20	57.20	0.0001
Error A	7.05	6	1.17	-	-
Tiempo	2168.14	7	309.73	415.05	0.0001
Ecosistema x Tiempo	326.56	14	23.33	31.26	0.0001
Error	31.34	42	0.75	-	-
Total	2667.49	71	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 27. Prueba de Tukey (5%) para la tasa de NMIN cumulativa en CSL, CSM y BQS en un Ultisol.

Sistema	Medias	n	
CSL	14.44	8	A
BQS	27.60	8	B
CSM	30.85	8	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

Apéndice 28. ANOVA de NMIN suelo sin hojarasca (control) CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Suelo	2007.53	2	1003.8	2050	<0.0001
Error A	2.94	6	0.49	-	-
Ecosistema	580.03	2	290.02	322.38	<0.0001
Suelo x Ecosistema	367.09	4	91.77	102.01	<0.0001
Tiempo	1091.75	11	99.25	172.81	<0.0001
Error B	41.35	71	0.57	-	-
Suelo x Tiempo	1740.42	22	79.11	87.94	<0.0001
Ecosistema x Tiempo	855.65	22	38.89	43.23	<0.0001
Suelo x Ecosistema x Tiempo	1814.02	44	41.23	45.83	<0.0001
Error	129.54	139	0.9	-	-
Total	8612.7	323	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 29. ANOVA de NMIN suelo con adición de hojarasca en CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.

Fuente de Variación	SC	GI	CM	Valor F	Pr >F
Suelo	1757.9	2	878.96	1873.2	<0.0001
Error A	2.82	6	0.47	-	-
Ecosistema	734.53	2	367.27	698.24	<0.0001
Suelo x Ecosistema	199.49	4	49.87	94.82	<0.0001
Tiempo	1330.2	11	120.93	358.32	<0.0001
Error B	24.3	72	0.34	-	-
Suelo x Tiempo	1656.8	22	75.31	143.17	<0.0001
Ecosistema x Tiempo	900.81	22	40.95	77.85	<0.0001
Suelo x Ecosistema x Tiempo	1628.7	44	37.02	70.37	<0.0001
Error	75.74	144	0.53	-	-
Total	8302	323	-	-	-

SC= suma cuadrados; GI = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 30. ANOVA de NMIN de hojarasca en CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.

Fuente de Variación	SC	Gl	CM	Valor F	Pr >F
Suelo	39.83	2	19.92	268.65	<0.0001
Error A	0.44	6	0.07	--	-
Ecosistema	2081.7	2	1040.8	2878.7	<0.0001
Suelo x Ecosistema	156.74	4	39.19	108.38	<0.0001
Tiempo	328.76	11	29.89	112.37	<0.0001
Error B	19.15	72	0.27	-	-
Suelo x Tiempo	169.19	22	7.69	21.27	<0.0001
Ecosistema x Tiempo	116.64	22	5.3	14.66	<0.0001
Suelo x Ecosistema x Tiempo	439.4	44	9.99	27.62	<0.0001
Error	52.07	144	0.36	-	-
Total	3401.6	323	-	-	-

SC= suma cuadrados; Gl = grados de libertad; CM=cuadrado medio

Apéndice 31. Prueba de Tukey (5%) para la tasa de NMIN acumulativa en CSL, CSM y BQS en un Oxisol, un Inceptisol y un Ultisol.

Suelo	Sistema	Medias	n			
Oxisol	CSL	32.37	12	A		
Oxisol	CSM	69.60	12		B	C
Oxisol	BQS	77.13	12			C
Inceptisol	CSL	27.53	12	A		
Inceptisol	CSM	58.82	12		B	C
Inceptisol	BQS	72.79	12		B	C
Ultisol	CSL	33.80	12	A		
Ultisol	BQS	54.25	12		B	
Ultisol	CSM	68.98	12		B	C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

Apéndice 32. Humedad del suelo (A) Oxisol, (B) Inceptisol y (C) Ultisol incubados en condiciones de laboratorio.

