



UNIVERSIDAD DE GUANTÁNAMO

Facultad Agroforestal de Montaña

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

Departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las Plantas

Fertilización y requerimientos de nitrógeno para plantaciones de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner var. Robusta cultivada en suelos Pardos de la región oriental premontañosa de Cuba

*Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas*

Autor: Ing. Alberto Pérez Díaz, M.Sc.

San José de las Lajas, Mayabeque

2011



UNIVERSIDAD DE GUANTÁNAMO  
Facultad Agroforestal de Montaña

INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIAS AGRÍCOLAS  
Departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las Plantas

Fertilización y requerimientos de nitrógeno para plantaciones de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner var. Robusta cultivada en suelos Pardos de la región oriental premontañosa de Cuba

*Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas*

Autor: Ing. Alberto Pérez Díaz, M.Sc.

Tutores: Dr.C. Ramón Antonio Rivera Espinosa

Dr.C. Carlos Alberto Bustamante González

Dra.C. Gloria Marta Martín Alonso

San José de las Lajas, Mayabeque

2011

## AGRADECIMIENTOS

A la Revolución Cubana, por darme la posibilidad de estudiar.

A mis padres, por haberme inculcado el deseo de estudiar y de ser alguien en la vida.

A mi esposa e hijo, por su apoyo y comprensión durante todos estos años.

A mis tutores, DrC. Ramón Rivera Espinosa, Dra C. Gloria Martín Alonso y el DrC. Carlos Bustamante González por sus orientaciones y dedicación para lograr esta final tarea.

Al INCA, por acogerme y brindarme las facilidades para mi formación.

A la Universidad de Guantánamo por el apoyo brindado y al Centro de Desarrollo de la Montaña por la formación brindada en los inicios de mi carrera.

A los amigos y compañeros Pedro José González y Guillermo Almenares, por el trabajo conjunto en el afán de hacernos doctores en ciencias.

A los colegas del Centro de Estudio de Café y Cacao, de la Facultad Agroforestal de Montaña.

A los colegas de la Estación Central de Investigaciones de Café y Cacao por la asesoría brindada.

A los colegas del Departamento de Biofertilizantes y Nutrición de las Plantas por acogerme como uno de ellos.

A los compañeros y compañeras del servicio de comedor y hospedajes del INCA por el servicio eficiente brindado.

A José Roberto Martín Triana, Francisco Soto Carreño, Mario Varela Nualles, Nicolás Medina Basso, José A. Herrera Altuve, Noel Arozarena Daza, Walfredo Torres de la Noval y Manuel Riera Nelson, por los conocimientos brindados.

A todos, muchas gracias

DEDICATORIA

*A mi hijo*

## Citación correcta Norma ISO 690

### **Según Sistema de Referencia Numérico**

1. Pérez-Díaz, Alberto. Fertilización y requerimientos de nitrógeno para plantaciones de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner var. Robusta cultivada en suelos Pardos de la región oriental premontañosa de Cuba [*Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas*].Universidad de Guantánamo, 2011.141 p.

### **Según Sistema de Referencia Apellido, año**

Pérez-Díaz, Alberto. 2011 Fertilización y requerimientos de nitrógeno para plantaciones de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner var. Robusta cultivada en suelos Pardos de la región oriental premontañosa de Cuba [*Tesis en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Agrícolas*].Universidad de Guantánamo.141 p.

## SÍNTESIS

Se realizó un estudio durante dos ciclos productivos, con el objetivo de proponer un sistema de fertilización racional nitrogenada para *Coffea canephora*, en función del rendimiento esperado, en integración con los requerimientos de nitrógeno, los aportes y transferencia de N dentro del agroecosistema, algunos indicadores del suelo y el estado nutricional del cafeto. El crecimiento, la producción de masa seca, la extracción anual y la productividad del *Coffea canephora* en ciclos de cuatro cosechas, no dependieron del ciclo productivo y presentaron un ritmo acelerado anual hasta su tercer año, disminuyendo a partir del cuarto año. El retorno de biomasa por los componentes del agroecosistema, estuvo en los rangos de 7 – 8 t. ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de masa seca, con una liberación de N en dependencia del patrón de descomposición de los diferentes materiales estudiados. Se encontró una respuesta positiva y significativa entre el rendimiento y la fertilización nitrogenada, similar en ambos sitios y ciclos, con relaciones beneficio/costo entre 4 y 7. Se encontró una fuerte relación entre las precipitaciones anuales y los rendimientos máximos estables. El análisis foliar realizado en el mes de junio se comportó como un adecuado estimador del estado nutricional, estableciéndose criterios de interpretación del mismo para el cafeto Robusta. Las dosis de N propuestas para cada sitio y ciclo productivo, incrementaron la actividad microbiana del suelo. Se estableció un sistema de fertilización N para la especie *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos de premontaña, en función del rendimiento y los criterios de interpretación del análisis foliar.

## ÍNDICE

	Contenido	Páginas
1.	INTRODUCCIÓN.	1
2.	REVISION BIBLIOGRAFICA .	4
2.1.	El cultivo del cafeto en el mundo y Cuba.	4
2.1.1.	<i>Coffea canephora</i> Pierre ex Froehner.	5
2.2.	Requerimientos ecológicos del cafeto.	5
2.3.	Crecimiento y desarrollo.	8
2.3.1.	Algunas características del patrón de crecimiento del cafeto.	8
2.3.1.1.	Desarrollo reproductivo en el cafeto. Floración y fructificación.	10
2.4.	Requerimientos de N por el cafeto. Extracción y exportación	11
2.5.	Análisis foliar como estimador del diagnóstico nutricional.	12
2.6.	La fertilización nitrogenada del cafeto.	15
2.7.	Descomposición de los residuos vegetales en el suelo. Factores de los que depende.	17
2.8.	Algunos indicadores de las propiedades del suelo.	19
2.8.1.	Los microorganismos del suelo.	21
2.8.2.	La respiración biológica del suelo.	22
2.8.3	La amonificación y la nitrificación.	23
2.8.4.	Los indicadores químicos del suelo.	24
3.	MATERIALES Y METODOS.	26
3.1.	Caracterización de las localidades donde se desarrollaron los experimentos.	26
3.2.	Descripción de los experimentos.	27
3.2.1.	<i>Experimento 1.</i> Crecimiento aéreo y radical, la producción de fitomasa y extracción de nitrógeno de <i>Coffea canephora</i> cultivado sobre suelos Pardos.	27
3.2.1.1.	Crecimiento aéreo.	28
3.2.1.2.	Producción de fitomasa y extracción de N.	29
3.2.1.3.	Sistema radical.	30
3.2.2.	<i>Experimento 2.</i> Reciclaje de residuos componentes del agroecosistema cafetalero, su descomposición y liberación del nitrógeno.	30

3.2.2.1.	Evaluación de la fitomasa y el N reciclado por la hojarasca de los árboles de sombra y el cafeto.	30
3.2.2.2.	Descomposición de la hojarasca del cafeto y los árboles de sombra.	31
3.2.3.	<i>Experimento 3.</i> La fertilización nitrogenada para plantaciones de <i>Coffea canephora</i> cultivada sobre suelos Pardos durante dos ciclos productivos.	32
3.2.3.1.	Influencia de la fertilización nitrogenada sobre algunos indicadores microbiológicos edáficos.	34
3.2.3.2.	Influencia de la fertilización nitrogenada sobre algunos indicadores químicos y físico – químicos del suelo.	35
3.2.3.3.	Coefficiente de aprovechamiento del N.	35
3.2.3.4.	Análisis foliar.	36
3.3	Atenciones culturales al cafeto.	37
3.4.	Análisis económico.	37
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	38
4.1.	<i>Experimento 1.</i> Crecimiento aéreo y radical, la producción de fitomasa y extracción de nitrógeno de <i>Coffea canephora</i> cultivado sobre suelos Pardos.	38
4.1.1.	Crecimiento aéreo de <i>Coffea canephora</i> .	37
4.1.2.	Producción de fitomasa y extracción de N.	39
4.1.3.	Crecimiento radical de <i>Coffea canephora</i> .	47
4.2.	<i>Experimento 2.</i> La fertilización nitrogenada para plantaciones de <i>Coffea canephora</i> cultivada sobre suelos Pardos durante dos ciclos productivos.	49
4.2.1.	Primer ciclo productivo.	49
4.2.1.1.	Crecimiento del cafeto en dependencia de los niveles de nitrógeno aplicados al suelo.	49
4.2.1.2.	Producción de <i>Coffea canephora</i> .Primer ciclo productivo.	50
4.2.2.	Segundo ciclo productivo.	53
4.2.2.1.	Crecimiento del cafeto en dependencia de los niveles de nitrógeno aplicados al suelo.	53
4.2.2.2.	Producción de <i>Coffea canephora</i> .Segundo ciclo productivo.	52
4.2.3.	Valoración integral de los dos ciclos productivos.	57
4.2.4.	Efecto de la fertilización sobre algunos indicadores químicos y biológicos del suelo.	62

4.2.4.1.	El pH.	62
4.2.4.2.	La materia orgánica del suelo.	64
4.2.4.3.	La respiración biológica del suelo.	65
4.2.4.4.	La nitrificación del suelo.	67
4.2.5.	Coefficiente de aprovechamiento.	70
4.2.6.	Análisis foliar como estimador del diagnóstico nutricional de <i>C. canephora</i> .	71
4.3.	<i>Experimento 3.</i> Reciclaje de residuos componentes del agroecosistema cafetalero. Descomposición y liberación del nitrógeno.	77
4.3.1.	Caída de hojas y otros componentes del cafeto y los árboles de sombra.	77
4.3.2.	Contenido de N de las hojas y otros componentes del cafeto y los árboles de sombra.	82
4.3.3.	Contribución general del agroecosistema.	84
4.3.4.	Tasa de descomposición.	85
4.3.5.	Liberación del nitrógeno.	88
4.4.	Análisis de la factibilidad económica de la aplicación de nitrógeno a plantaciones de <i>C. canephora</i> .	93
4.5.	Sistema de fertilización nitrogenada para <i>Coffea canephora</i> cultivado sobre suelos Pardos.	94
5.	CONCLUSIONES.	97
6.	RECOMENDACIONES.	98
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	
	ANEXOS.	

## ABREVIATURAS EMPLEADAS EN EL DOCUMENTO

AGRIANUAL	Anuario do Agricultura Brasileira. (República Federativa do Brasil)
ACC	Academia de Ciencias de Cuba
BCC	Banco Central de Cuba
CA	Coefficiente de Aprovechamiento
CIB	Capacidad de Intercambio de Bases
CENICAFE	Centro Nacional del Cafetero Colombiano. (República de Colombia)
CONAB.	Companhia Nacional de Abastecimento de Brasil. (República Federativa do Brasil)
EA	Eficiencia Agronómica
ECICC	Estación Central de Investigaciones de Café y Cacao. (República de Cuba)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
GEAM	Grupo Empresarial de Agricultura de Montaña. (República de Cuba)
IDEAS	Iniciativas de Economía Alternativa y Solidaria.
INCA	Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (República de Cuba)
INSMET	Instituto de Meteorología (República de Cuba)
IIFT	Instituto de Investigaciones de Fruticultura Tropical. (República de Cuba)
MINAG	Ministerio de Agricultura (República de Cuba)
MFP	Ministerio de Finanzas y Precios (República de Cuba)
msnm	Metros sobre el nivel del mar
MSR	Masa Seca Remanente
MTSS	Ministerio del Trabajo y Seguridad Social (República de Cuba)
NP	Nitrificación Potencial
NRAG	Normas Ramales de la Agricultura (República de Cuba)
ONE	Oficina Nacional de Estadísticas. (República de Cuba)
OIC	Organización Internacional de Café. (Reino Unido de la Gran Bretaña)
PROMECAFE	Programa Cooperativo Regional para el Desarrollo Tecnológico de la Caficultura en Centroamérica. (República de Guatemala)
RB	Respiración biológica
SEAGRI	Secretaria da Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária. (República Federativa do Brasil)
WRB	World Reference Base for Soil Resources

## 1.- INTRODUCCIÓN

La introducción del *Coffea canephora* Pierre ex Froehner var. Robusta en Cuba data de 1930 (Díaz y col., 2003). Su cultivo se localiza en aquellas zonas donde la especie *arábica* no puede expresar todo su potencial productivo por limitantes ecológicas o por estar afectado el suelo por nematodos (López y col., 2001; MINAG, 2003). En la actualidad se cultivan 135 000 ha de cafeto (Cuba, ONE, 2010), de ellas 16 800 ha corresponden a la especie Robusta (13 % del total del área cultivada), localizándose el 85 % en cuatro provincias orientales.

En el programa para el incremento de la producción de café del Grupo Empresarial de Agricultura de Montaña se proyecta, para el período 2010 – 2015, la siembra de 6 088,7 ha de *canephora*, que representan el 30 % de las áreas a sembrar en todo el país (Bustamante y col., 2010).

Los cafetales en Cuba, tanto de la especie *C. arabica* como *C. canephora*, se encuentran en suelos muy variados: Fersialíticos, Pardos Sialíticos, Ferralíticos y Alíticos (Hernández y col., 2006). Soto y col. (2002) informan que en el macizo Nipe – Sagua – Baracoa, los suelos Pardos ocupan el 29,53 % (158 916 ha), mientras que en el macizo Sierra Maestra representan el 49 % (166 489 ha).

Resultados de estudios en diversas regiones del mundo reportan que al menos del 30 al 50 % del rendimiento de los cultivos es atribuible a la optimización de los sistemas de suministro de nutrientes (Stewart y col., 2005; Fixen y García, 2007).

El nitrógeno es el elemento que más influye sobre los rendimientos de los cultivos (Dos Reis y col., 2006; Leal y col., 2009), en parte por las altas cantidades que del mismo se requiere, así como por las insuficientes cantidades que de este elemento pudiera aportar el suelo para garantizar elevados rendimientos (Da Silva y col., 2008). A nivel internacional las dosis de N para el cafeto oscilan entre 80 a 412 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y dependen fundamentalmente del nivel de rendimiento esperado, de la tecnología de cultivo y de las condiciones edafoclimáticas (Rivera, 2006; Sadeghian, 2008).

En Cuba durante los quinquenios 1986 – 1990 y 1991 – 1995 se ejecutaron experimentos de fertilización nitrogenada para plantaciones de *Coffea arabica* L. sembradas a altas densidades en diferentes condiciones edafoclimáticas del país, con el objetivo de definir: sistemas de fertilización en función del rendimiento esperado y

fraccionamiento más adecuado, criterios de extracción y exportación de la plantación, la participación del N del fertilizante y del suelo en la nutrición de las plantas, el retorno y la descomposición de las hojas del café y el análisis foliar como evaluador del estado nutricional (Rivera, 2006), quedando pendiente otros dos aspectos, la participación de los árboles de sombra en la propia nutrición nitrogenada del café y un funcionamiento adecuado de la comunidad microbiana.

En aquellos momentos no se trabajó con *Coffea canephora* debido a que las áreas dedicadas a su cultivo eran escasas, orientándose las investigaciones con ésta especie en Cuba a partir de 1993, sobre la base de establecer algunos componentes de la tecnología del cultivo, como el manejo de las altas densidades de plantación (Ortiz, 1993), los ciclos de poda, el manejo de la sombra (Bustamante y Grave de Peralta, 2002; Blanco, 2005) y la conducción de tallos (Díaz y col., 2007).

Sin embargo, los aspectos relacionados con la nutrición nitrogenada de *C. canephora* se han manejado según lo orientado para *C. arabica*, sin tener en cuenta las características propias de la especie: capacidad de formar múltiples tallos, tolerancia a altas temperaturas y mayor potencial de rendimiento en áreas por debajo de los 400 m.s.n.m., lo que puede implicar un manejo nutrimental diferente. De ahí la necesidad de establecer un sistema de fertilización mineral N para *C. canephora* cultivado sobre suelos Pardos de premontaña, como respuesta al siguiente **problema científico**: ¿Es adecuada la dosis de fertilizante nitrogenado aplicada actualmente a *C. canephora* cultivado en condiciones de premontaña, para la expresión de su potencial de rendimiento?

A partir de este problema, se estableció la siguiente **hipótesis**: Se puede incrementar la respuesta productiva de *Coffea canephora* cultivado en suelos Pardos de premontaña, mediante la optimización de la fertilización nitrogenada.

Como **objetivo general**: Establecer un sistema de fertilización racional nitrogenada en función del rendimiento esperado, integrando los requerimientos de nitrógeno, los aportes y transferencia del nutriente dentro del agroecosistema, algunos indicadores del suelo y el estado nutricional nitrogenado del café.

**Objetivos específicos:**

1. Evaluar el crecimiento, la producción de fitomasa, la extracción y exportación del N de *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos; así como los aportes de biomasa y transferencia de N de algunos de los componentes del agroecosistema.
2. Valorar la influencia de las dosis del fertilizante mineral nitrogenado sobre el rendimiento del cultivo y algunos indicadores del suelo, durante dos ciclos productivos.
3. Evaluar el análisis foliar como estimador del diagnóstico nutricional del *C. canephora*.
4. Establecer un sistema de recomendación para una fertilización racional nitrogenada para *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos.

**Novedad científica:** Se hace un aporte al conocimiento sobre el manejo nutrimental de una especie poco estudiada en las condiciones de Cuba, así como el papel de los diferentes componentes del agroecosistema en la propia nutrición nitrogenada del café y se evalúa el efecto de la fertilización N sobre algunos indicadores microbiológicos del suelo.

**Aporte práctico:** Se establecen las dosis de nitrógeno para el manejo de la especie *C. canephora* y se proponen los criterios de corrección del status nutrimental de plantaciones de café Robusta cultivado en suelos Pardos de premontaña, a partir del análisis químico foliar.

## **2. REVISION BIBLIOGRAFICA**

### **2.1. El cultivo del cafeto en el mundo y Cuba**

El cafeto es originario de las altas mesetas de Etiopía y se introdujo en el continente americano a principios del siglo XVIII procedente de Yemen. Su distribución abarca desde los 22 grados de latitud Norte hasta los 26 grados de latitud Sur, con algunas plantaciones fuera de estos límites ecológicos (Valencia, 1998).

El género *Coffea* es, económicamente, el más importante de la familia *Rubiaceae* y está integrado por 100 especies; de ellas solo cuatro se cultivan comercialmente: *Coffea arabica* L., *Coffea canephora* Pierre ex Froehner, *Coffea liberica* Bull ex Hiern y *Coffea excelsa* A. Chev. (Marques de Carvalho y col., 2001; Munguia, 2003; Mora, 2008). Las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora* son cultivadas en América Latina, África y Asia (Blanco, 2005).

En cuanto a la producción de café, en el período 2003 – 2004 fue de 103,9 millones de sacos (60 kg). En el período 2004 – 2005, a pesar de alcanzar los 113,4 millones de sacos, ésta estuvo por debajo de la línea del consumo mundial, que para ese período la OIC (Oficina Internacional de Comercio) la situaba en los 114,1 millones de sacos (PROMECAFE, 2005; IDEAS, 2006). En el 2007 la producción aproximada de café se incrementó, y ascendió a 121 millones de sacos de café (Da Matta y Rodríguez, 2007). A nivel mundial, Brasil es el país con mayor producción y exportación de café (AGRIANUAL, 2005; Martínez, 2005; Grava De Godoy y col., 2008).

En la campaña cafetalera 2010 – 2011, la producción mundial de café ascendió a 133, 6 millones de sacos (OIC, 2011).

En Cuba, las plantaciones de cafeto se encuentran ubicadas en zonas montañosas o de premontaña, las cuales condicionan potenciales de producción diferentes en la medida que se alejen o acerquen a las condiciones óptimas para el cultivo (Rivera, 2006).

Díaz y col. (2003) destacan la importancia de los macizos Sierra Maestra y Nipe – Sagua – Baracoa, en el cultivo cafeto en Cuba, en ellos se obtiene aproximadamente la tercera parte de la producción nacional y más de la mitad de Robusta; informan además como mayores productores, los municipios de Tercer Frente y Contra maestre, en la provincia de Santiago de Cuba, el municipio Buey Arriba, en la provincia de Granma, el municipio

El Salvador, en la provincia de Guantánamo y el municipio Sagua de Tánamo, en la provincia de Holguín.

El país cuenta con clima y suelos adecuados para obtener rendimientos superiores a 1 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, no obstante, el rendimiento real de café oscila alrededor de 0,17 t.ha<sup>-1</sup> (Soto y Caro, 2006).

### **2.1.1. *Coffea canephora* Pierre ex Froehner**

La especie *Coffea canephora* Pierre ex Froehner es la segunda en importancia comercial y se ha extendido considerablemente por todo el mundo, determinada por el consumo en el mercado americano de café de este tipo, para mezclas solubles (Marques de Carvalho y col., 2001; Blanco, 2005; Da Matta y Rodríguez, 2007).

La especie *Coffea canephora*, a pesar de presentar un café de menor calidad en el mercado internacional respecto a *Coffea arabica*, posee mayor rusticidad, alto potencial productivo, resistencia o tolerancia a algunas enfermedades y plagas (roya y nematodos) y una alta adaptabilidad a zonas de baja altitud (SEAGRI, 2001; MINAG, 2003).

La producción de café Robusta alcanzó de 23 – 29 millones de sacos.año<sup>-1</sup> entre 1993 – 1998, con una media de 26 millones de sacos.año<sup>-1</sup>, lo que representó el 28 % de la producción mundial. Los principales países productores fueron Indonesia, Brasil, Vietnam, Costa de Marfil y Uganda (SEAGRI, 2001). En la cosecha cafetalera 1999 – 2000 la producción mundial disminuyó a 17,6 millones de sacos de 60 kg (Cárdenas, 2000, citado por Bustamante y col., 2002). Brasil produjo en las cosechas 2007 – 2008 y 2008 – 2009 hasta 10 000 sacos de café por año (CONAB, 2008).

Según la relatoría de la Organización Internacional de Café en el período 2006 – 2008, el *Coffea canephora* representó cerca de 35 % de la producción y comercialización mundial de café (Gonçalves y col., 2008).

### **2.2. Requerimientos ecológicos del cafeto**

En el caso del cafeto, por su amplia distribución, la respuesta a diferentes manejos del cultivo no es igual de un país a otro ni de una región a otra. Carvajal (1984) y Manú (2005) señalaron que lo disímil de la ecología de las regiones cafetaleras del mundo sugiere que su cultivo no ha de ser idéntico en todas partes y por ende, los resultados experimentales que se obtienen a menudo no concuerdan entre sí o son diametralmente opuestos.

Algunos investigadores plantean que los requerimientos ecológicos se estudian mejor en el área de origen de la especie, otros plantean que a veces es más útil estudiar el crecimiento de la planta en las áreas en las que la especie ha sido distribuida, especialmente si las plantas tienen un buen crecimiento en dichos lugares (Maestri y Barros, 1981). Es por éstas razones que resulta imprescindible realizar las investigaciones con la especie *canephora* en las zonas premontañosa del país donde se cultiva.

Las características climáticas expresadas a través de la temperatura, precipitaciones y los días de lluvia, en unión de las correspondientes al relieve y las propiedades de los suelos, interaccionan e influyen decisivamente sobre el crecimiento y rendimiento de la plantación y por ende sobre los requerimientos nutricionales de la misma (Soto, 2006).

Soto y col. (2002) refieren que los factores ambientales más importantes en el crecimiento y la producción del cafeto son la radiación solar, la temperatura, la lluvia en cantidad y su distribución a través del año, la altitud y el fotoperíodo. Se considera que la temperatura y la lluvia son los factores que más afectan en el cultivo del cafeto. En este sentido, en Colombia se señala que la fenología de la planta de café está estrechamente relacionada con la distribución de la precipitación, la temperatura y el brillo solar (Valencia, 1998).

La temperatura media disminuye con la altitud a razón de 0,5 a 0,6 °C por cada 100 m (Arcila, 1988). Con el incremento en la altitud, se encuentran diferencias en factores físicos como la irradiación, la temperatura del aire y del suelo y la presión atmosférica. El aumento en la intensidad de la energía radiante en cualquier hábitat resulta en un incremento en la temperatura del aire y del suelo.

Para Cuba se señala un rango de temperatura entre 16 °C y 28 °C (MINAG, 1987; Soto, 2006). Se ha indicado además, para las zonas montañosas, donde se cultiva la mayoría del café, un clima con humedecimiento alto, estable y temperaturas frescas (Díaz, 1990).

En Cuba (Cuba, Academia de Ciencias, 1989) se reporta que en las alturas y montañas, el rango de temperaturas mínimas y máximas es de 15 – 20 °C y de 20 – 30 °C, respectivamente. Al valorar este elemento climático, Morales (1986), no señaló limitantes en la isla, ya que las medias mínimas no alcanzan períodos prolongados y con las altas no se han reportado efectos negativos visibles.

La temperatura promedio en las regiones productoras de café son de 12,7 °C como mínimo y de 26,0 °C como máximo y una media de 21,1 °C. Muchos autores definen el rango de temperatura adecuada para el crecimiento y la producción del café entre 16 y 25 °C (Carvajal, 1984; Morales, 1986; Díaz, 1990; Valencia, 1999; Soto, 2006).

La precipitación es otro factor que favorece al cultivo del café, y es determinante en su distribución en el mundo. Castillo (1997) planteó que la precipitación media anual requerida por el café es de 1 800 a 2 000 mm, distribuidos a través del año, con un período de sequía relativa de dos a tres meses; mientras que Valencia (1998) consideró que el café requiere una precipitación media anual superior a 1 200 mm.

De esta manera, la temperatura y precipitación, así como otros factores tales como el manejo del cultivo, pueden afectar o beneficiar la planta del café (Fournier y Di Stéfano, 2004; Villers y col., 2009).

La precipitación media anual requerida por el café en Cuba está entre los 1 800 a 2 000 mm, distribuida a través del año (Díaz, 1990).

En el continente Africano las formas más comunes de *Coffea canephora* aparecen en regiones de baja altitud, con precipitaciones de 1 500 a 1 800 mm anuales. Esta área coincide más o menos con la del *C. liberica*, excepto en el Congo Central donde esta especie no existe y las variedades de *Coffea canephora* se extienden hasta el norte del Lago Victoria (Gorsline, 2000).

La especie *canephora*, se caracteriza por ser altamente tolerante a elevadas temperaturas y estación de seca de moderada a acentuada (Da Matta, 2004). En Brasil, se pueden encontrar plantaciones de *Coffea canephora* cultivada tanto a plena exposición solar como bajo sombra de *Macadamia integrifolia*, con temperaturas que oscilan entre los 20 – 32 °C (Pezzopone y col., 2010).

En Veracruz, México, la especie *C. canephora*, variedad Robusta, se cultiva principalmente en altitudes bajas y medias, debido a su tolerancia a altas temperaturas (Arizpe, 2005).

Matta y col. (2002) encontraron que el déficit hídrico produjo una disminución marcada en la tasa neta de asimilación de C y en menor grado, en la conductancia de los estomas, independientemente de las dosis de fertilizante nitrogenado recibidas.

CENICAFE (2005), aborda que la precipitación y la humedad relativa, la temperatura y la altitud afectan el tamaño y la dureza de la semilla e influyen, además, en ciertos componentes de la calidad de la bebida, especialmente la acidez.

### **2.3. Crecimiento y desarrollo**

Existen diferentes criterios en cuanto a la definición de crecimiento y desarrollo, De Armas y col. (1988) y Azcón – Bieto y Talón (2000) definen el crecimiento como el aumento irreversible del tamaño en la célula, órgano u organismo; mientras que el desarrollo lo consideran como un conjunto de eventos que contribuyen a la progresiva elaboración del cuerpo de la planta y que la capacita para obtener alimentos, reproducirse y adaptarse plenamente a su ambiente.

Sin embargo, no es posible considerar esquemáticamente la separación entre estos dos procesos, pues el crecimiento y el desarrollo ocurren al mismo tiempo en la planta y están estrechamente ligados entre sí, siendo regulados tanto por factores internos como externos. Los internos son fundamentalmente los genéticos y los reguladores del crecimiento, mientras que los externos son la luz, temperatura, oxígeno, CO<sub>2</sub> y los nutrientes del suelo (Soto, 2006).

Las técnicas para analizar el crecimiento han ido evolucionando y se han convertido en herramientas para investigadores de diversas disciplinas, dada su gran utilidad para analizar el rendimiento en función del crecimiento previo. Según Torres (1985), para realizar un análisis del rendimiento de una planta en función de su crecimiento, se requieren de dos principios: 1) la medida del material vegetal existente y 2) la medida de la magnitud del sistema asimilativo de ese material vegetal. En la práctica las variables más comúnmente medidas son la masa seca total de la planta individual y el área foliar total de la misma.

En diferentes estudios, se ha subdividido el ciclo completo de desarrollo de las plantas comestibles en diferentes fases fenológicas, donde se reconoce la importancia de las etapas vegetativas, de floración, de la formación del fruto y la fase de maduración (Camargo y Camargo, 2001).

### **2.3.1. Algunas características del patrón de crecimiento del cafeto**

Las especies perennes tienen ciclos anuales regidos por la estacionalidad o factores climáticos (radiación solar, temperatura y humedad), fotoperiodos y factores biológicos como pueden ser las interacciones entre plantas y animales (Schwartz, 2003).

El patrón de crecimiento y desarrollo del cafeto depende de forma general de las condiciones de precipitación, temperaturas y longitud del día de la zona en que esté ubicada la plantación, siendo señalada la importancia de su conocimiento con vistas a realizar las labores culturales adecuadas e incrementar la producción (Muller, 1966; Fournier y Di Stéfano, 2004; Villers y col., 2009).

Uno de los aspectos fundamentales dentro de la fisiología del cultivo lo es la interacción crecimiento vegetativo aéreo, radical y del fruto. En la mayoría de las áreas productoras del mundo con estaciones bien definidas, coinciden las condiciones adecuadas de temperatura y humedad para el rápido crecimiento vegetativo con la fructificación (Cannell, 1976).

En investigaciones realizadas por Cabrera y col. (1998) con 13 clones de *C. canephora* perteneciente al banco de germoplasma de la Estación Central de Investigaciones de Café y Cacao (ECICC) en la localidad de Tercer Frente, provincia Santiago de Cuba, encontraron como promedio al tercer año de la plantación, alturas en el orden de 197 a 260 cm; diámetro de la copa entre 198 – 210 cm y rendimientos potenciales de 0,33 – 0,91 t.ha<sup>-1</sup> de café oro.

En Brasil, se encontró que la especie *canephora* posee mayor eficiencia para la absorción y transferencia de energía luminosa, mayor área foliar para captar la luz, con una alta tasa fotosintética, de transpiración y conductancia estomática respecto a *C. arabica*, por lo que la hace más eficiente (Marques de Carvalho y col., 2001).

El hecho de que el cafeto produzca siempre en madera nueva, hace que la extensión del crecimiento vegetativo aéreo del año en cuestión defina la producción del siguiente año, por lo cual una alta producción que conlleve un débil crecimiento vegetativo, originará una pobre producción en el próximo año (Rivera, 1988).

Esta interacción fisiológica es la base de la conducta bienal del cafeto, y se origina producto de la ausencia en la planta de un mecanismo regulador de la fructificación en base a sus posibilidades (Cannell, 1976) ocasionando la sobreproducción, y aunque

ocurre más notoriamente en plantaciones a plena exposición solar con bajas densidades, es un problema asociado a todas las regiones caficultoras del mundo.

No obstante, la sobreproducción no es la única causa de la descompensación; la humedad disponible, la sombra y el fertilizante N pueden afectar la razón del crecimiento durante los períodos de crecimiento acelerado (Muller, 1966).

Clowes, 1973, citado por Rivera (2006) consideró el fenómeno de forma más general, como "*die back*" fisiológico, que puede ser debido a un desequilibrio entre el área foliar y la cosecha (sobreproducción) o por una pobre producción de hojas debido a condiciones adversas de crecimiento. Ambas dejan de garantizar la cantidad suficiente de productos de la fotosíntesis para las exigencias de la cosecha.

#### **2.3.1.1. Desarrollo reproductivo en el cafeto. Floración y fructificación**

Kumar (1979) estableció tres fases fisiológicas en la floración del cafeto: 1) iniciación y diferenciación floral, 2) un corto período de reposo o latencia y 3) apertura de las flores.

Por ser muy disímiles las condiciones ambientales en las cuales crece y se desarrolla el cafeto, necesariamente existen diferencias en cuanto a la iniciación floral, la dinámica del crecimiento y desarrollo de las yemas florales. Entre la floración y la maduración de los frutos existe un lapso de tiempo variable, denominado fructificación. La especie, la variedad, los factores climáticos, las condiciones del cultivo, entre otros, son los elementos que más influyen (Soto, 2006).

Rivera y Sam (1983) en evaluaciones realizadas en Cuba, a 138 msnm, con la especie *C. arabica*, plantean que existen tres etapas bien definidas en el crecimiento de los frutos del cafeto; la primera caracterizada por la poca actividad en el crecimiento, enmarcada desde el inicio de las floraciones (febrero) hasta mayo, la segunda etapa se produce con un crecimiento brusco de los frutos (hasta las 20 semanas) y con ello el aumento de las exigencias de productos del metabolismo (mayo – septiembre). A partir de las 20 semanas y hasta las 35 semanas ocurre la tercera fase donde se presenta un período de menor actividad y comienza a madurar el fruto.

Camargo y Camargo (2001) definen varias fases: 1) crecimiento foliar, que agrupa yemas, hojas; 2) floración, que agrupa botón, flor abierta y marchita; 3) crecimiento del fruto, que agrupa inmaduro, maduro, marchito; y 4) maduración y corte.

En investigaciones realizadas en Veracruz, México se ha establecido que para plantaciones de *Coffea canephora*, las etapas fenológicas del cultivo son: crecimiento foliar, desde abril hasta octubre; floración, desde marzo a mayo; crecimiento del fruto, de mayo hasta diciembre y maduración desde enero a abril (Villers y col., 2009).

#### **2.4. Requerimientos de N por el cafeto. Extracción y exportación**

La extracción de nutrientes que hacen los cultivos en el suelo, es un criterio de suma importancia para diseñar los sistemas de fertilización, en unión con la exportación, la participación de las concentraciones asimilables presentes en el suelo y el aprovechamiento del fertilizante (Rivera, 1993 a).

El enfoque descrito anteriormente, clásico en el campo de la nutrición y fertilización de los cultivos, no es muy utilizado en los cultivos perennes como el cafeto, pues para aplicarlo, se hace necesario extraer durante un período de tiempo un grupo de plantas con sus raíces.

En el cafeto se tienen reportes realizados en *Coffea arabica* por Cannell (1970); Rivera y Sam (1983); Rivera y Mederos (1993); Rivera y col. (1994); Rodríguez y col. (1998 a) y Viñals y col. (2001), los cuales demostraron que los requerimientos nutricionales del cafeto dependen de la extracción que realiza la cosecha.

El nitrógeno, junto con el potasio, son los elementos que el cafeto absorbe en mayores cantidades (Carvajal, 1984; Dos Reis y col., 2006).

Blanco (1992) informó que una plantación de 4 000 plantas.ha<sup>-1</sup> de *C. arabica* en Nicaragua, extrajo aproximadamente 257 kg.ha<sup>-1</sup> de N; mientras que Viñals y col. (2001) en Cuba señalaron que la extracción de nutrimentos en *Coffea arabica* cultivado en un suelo Pardo gleyzoso sin carbonatos, aumentó de acuerdo con el desarrollo que alcanzó la plantación y llegó hasta 752,23 kg.ha<sup>-1</sup> de N en el quinto año.

En el caso de los cultivos perennes, uno de los criterios agroquímicos que con más fuerza se maneja es el de la exportación por la cosecha (Snoeck, 1980; Carvajal, 1984) basado en que el resto del N absorbido permanece en el agroecosistema.

De forma general, los resultados de diferentes trabajos (Carvajal, 1984; Rivera, 1988; Krishnamurty, 1992; Rivera y col., 1994) coinciden en que el porcentaje de N en el fruto cosechado oscila entre 1,6 – 2,4 %, lo cual implica exportaciones de aproximadamente

25 – 45 kg.ha<sup>-1</sup> de N por cada tonelada de café oro. Snoeck (1980) informó que la especie *C. canephora* exporta 33 kg de N por cada tonelada de café oro.

Cietto y col. (1991) encontraron que *C. arabica* var. Catuai de cinco años de edad en un suelo Latosol de Brasil acumularon la mayor cantidad de masa seca y nutrientes en los frutos y que estos últimos exportaron con la cosecha el 45 % del N absorbido por las plantas; mientras que Chávez y Molina (2005) en Costa Rica ubicaron la participación de los frutos en el peso seco total en el orden del 25 al 30 %.

Matiello (2006) opina que, actualmente el criterio utilizado es que la fertilización para el café adulto debe ser realizada con base a la retirada de nutrientes por las plantas, las pérdidas de fertilizantes, la disponibilidad en el suelo y la condición de la plantación (edad, variedad, potencial productivo, sistema de manejo, clima, entre otros) y opina que por cada 100 kg de café producido hay una necesidad de reposición de 6,2 kg de N. Como media se considera una adición de 30 % para suplir las pérdidas.

Sadeghian y col. (2006 a) para el café *arábica* en Colombia, informan de la extracción de 30 kg de N por cada tonelada de café oro. Chávez (2002) en Brasil informó para esta misma especie valores de extracción de 22 kg de N por tonelada de café oro.

El término eficiencia nutricional se ha utilizado para caracterizar la capacidad de absorción y utilización de los nutrientes por las plantas (Amaral y col., 2011). El uso eficiente de nutrientes ha ganado más atención con el incremento de los costos de fertilización y la continua preocupación por el impacto ambiental (Stewart, 2007). Para cuantificar el aprovechamiento de los nutrientes se han desarrollado diversos métodos. Entre estos, el método de las diferencias se basa en la suposición que la cantidad de nutrientes del suelo que toma el cultivo es independiente de la cantidad del nutriente aplicado.

El método se ejecuta a través de la evaluación de la absorción del N en dos parcelas, una sin fertilizante nitrogenado (o fuente orgánica nitrogenada), donde se estima la cantidad de N que aporta el suelo. En la parcela con fertilizante se evalúa la cantidad de N que el cultivo absorbe, del suelo y del fertilizante y por diferencia se estima la cantidad del nutriente de la fuente aplicada absorbida por el cultivo (Rivera, 1993 b).

Es un método muy representativo, de fácil aplicación en condiciones de parcelas experimentales o áreas de producción y en el cual se logra calcular con rapidez los efectos de la aplicación de nutrientes (Martín, 2009).

### **2.5. Análisis foliar como estimador del diagnóstico nutricional**

Desde que Lagatu y Maume, 1934, citados por Rivera (1988) sentaron las bases para el diagnóstico nutricional en los cultivos agrícolas, innumerables trabajos se han realizado con vistas a utilizarlo en *Coffea arabica* como método de trabajo agroquímico (Carvajal, 1984; Rivera y Martín, 1980; Martín, 1988; Rivera, 1988; Anónimo, 2007).

Las hojas constituyen los tejidos vegetales que mayormente responden a cambios externos e internos en el suministro de los nutrientes, debido a que juegan un papel significativo en la fisiología de la planta, particularmente en el proceso de fotosíntesis; por tanto, se considera que es el órgano de la planta que desde el punto de vista metabólico, refleja mejor el estado nutricional. Es por ello que al evaluar la condición nutrimental de un cultivo, comúnmente se realiza a partir de las concentraciones de nutrientes en sus tejidos foliares (Oliveira, 2004; Hernández y col., 2009).

Los objetivos del análisis foliar han sido expuestos por Carvajal (1984) y Salgado y col. (2006), algunos de los más importantes son:

- Diagnóstico de deficiencias minerales de elementos mayores y micronutrientes.
- Definición de antagonismos nutricionales o desequilibrios provocados por la fertilización excesiva.
- Estudio de la respuesta a los fertilizantes con respecto a la calidad y cantidad.
- Comprobación de la eficiencia del método de aplicación de los fertilizantes.
- Guía para una fertilización económica asociada con el análisis de suelo.

Rivera (1988) informó que el diagnóstico foliar necesita del establecimiento de tablas de interpretación o definición de las zonas de nutrición en función del contenido del elemento, las cuales deben de ser obtenidas para cada localidad y forma de cultivar el café.

En este sentido, Snoeck y Lotodé (1985) plantean que el diagnóstico foliar no permite precisar la necesidad de los cafetos en cuanto a fertilizantes; además Partielli y col.

(2006) determinaron que una correcta interpretación del análisis foliar en el café, constituye una información auxiliar para el uso racional del fertilizante.

Dentro de los principales criterios para la interpretación del análisis foliar se encuentran, el nivel crítico y los rangos de concentración de nutrientes en los cultivos, los cuales se han definido por Salgado y col. (2006) en: deficiente, bajo, adecuado, alto y tóxico.

*Deficiente*: Es el rango de concentración, que se asocia con síntomas visibles de deficiencia en las plantas y con una severa reducción del crecimiento y la producción. Cada vez que se encuentren valores en este rango se deben aplicar medidas correctivas, mediante aplicaciones dirigidas y específicas de los nutrientes carenciales.

*Bajo*: Es el rango de concentración que se asocia con una reducción del crecimiento o producción, pero la planta no muestra síntomas visibles de deficiencia. Niveles de este tipo sugieren corregir el programa de fertilización para aportar el nutriente que se encuentra a nivel bajo.

*Adecuado*: Dentro de este rango de concentración los cambios que ocurren no provocan aumentos o disminución del crecimiento o producción del cultivo. Si los valores del análisis de la plantación caen en esta clase, es indicativo de que el programa de fertilización es adecuado a las necesidades nutricionales del cultivo.

*Alto*: Esta clase representa el rango de concentración comprendido entre adecuado y tóxico.

*Tóxico*: Este nivel manifiesta exceso en la aplicación de fertilizantes, que daña al cultivo y a la economía del productor.

El nivel crítico se define como la concentración de un nutriente en particular, determinado bajo condiciones experimentales, donde todos los factores de crecimiento se encuentran en un nivel óptimo, que se asocia con un valor predeterminado del rendimiento máximo (Salgado y col., 2006). Generalmente, este valor predeterminado corresponde entre el 90 a 95 % del rendimiento máximo que se puede obtener del cultivo (Roberts y Dow, 1982; Azcón-Bieto y Talón, 2002; Salgado y col., 2006; Hernández y col., 2009).

Los rangos críticos de nutrientes para los cultivos perennes tropicales varían por especies. Así, para el caso del N, en *Coffea arabica* cultivado sobre un suelo Ferralítico de Rojo de montaña en Cuba, los valores obtenidos en el cuarto par de hojas se ubicaron

por encima de 2,5 % y se consideraron como indicativos de un buen estado nutricional en la planta (Rivera y Martín, 1980); mientras que Carvajal (1984) y Partielli y col. (2002) informaron para *C. canephora* contenidos foliares adecuados por encima de 2,8 % de N.

Es importante destacar, que el muestreo foliar debe de realizarse cuidadosamente y considerando la especie vegetal, la edad, la fecha de muestreo y época y la dosis de fertilizantes (Salgado y col., 2006).

Harding (1993) estudió la dinámica de los contenidos foliares de nutrientes en *Coffea arabica* cultivado en Papúa, Nueva Guinea y encontró que las aplicaciones de fertilizantes aumentan generalmente los contenidos de nutrientes en las hojas.

En Cuba, Rivera (2006) estableció que el momento más adecuado para realizar el muestreo foliar es el periodo de máxima demanda de la cosecha en formación, que ocurre normalmente en el mes de julio, en las áreas en que las cosechas son tempranas y esta fecha se desplaza en la medida que lo hace el periodo de cosecha.

Carvajal (1984) recomienda como fecha de muestreo el inicio de la fructificación, ya que refleja cómo se encuentran las plantas para satisfacer las exigencias iniciales de los crecimientos vegetativos y del fruto.

## **2.6. La fertilización nitrogenada del café**

Los fertilizantes minerales son sustancias químicas que contienen uno o más nutrientes que requieren las plantas para su desarrollo. Su producción está sujeta a la síntesis química de algunos derivados del petróleo, del ácido sulfúrico y de otros elementos. Estos a su vez nunca son de extrema pureza y además de aportar los elementos fundamentales, introducen pequeñas cantidades de elementos menores que tienen un papel importante como activadores de los sistemas o complejos enzimáticos microbianos y de las plantas (Rodríguez, 2010).

Las investigaciones a escala mundial han revelado que la respuesta del café a la fertilización mineral puede ser rentable y depende, entre otros factores, del costo de los fertilizantes y del precio del grano en el mercado. La determinación de la eficiencia del uso de los fertilizantes por los cultivos constituye uno de los principales objetivos de las investigaciones agroquímicas, ya que mediante éstas se pueden establecer sistemas de abonado racionales y ecológicos (Bustamante y col., 1997).

La eficiencia de los fertilizantes y la respuesta de los rendimientos en un suelo determinado pueden ser fácilmente analizadas a partir de incorporar diferentes cantidades de fertilizantes en parcelas adyacentes, y comparar los rendimientos de los cultivos consecuentemente (FAO, 2002; Valdez, 2007).

El método que se ha empleado en Cuba y en otras regiones del mundo para conocer las necesidades de fertilizantes del café ha sido el experimento de campo con fertilizantes minerales (Martín, 1988; Rivera, 1988; Bustamante y col., 1989; Rodríguez y col., 1998b; Viñals y col., 2001).

El uso del N en la agricultura debe ser restringido, sujeto a criterios técnicos sobre bases científicas y económicas, por los costos elevados de los insumos y ambientales (Pinochet y col., 2004; Chien y col., 2009; Pablos, 2010). Para el caso del café, el N es el elemento que más influye sobre los rendimientos del cultivo (Alfaro y Ramírez, 1998; Leal y col., 2009), en parte por las altas cantidades que del mismo requiere, así como por las escasas cantidades que aporta el suelo para garantizar los rendimientos (Dos Reis y col., 2006; Da Silva y col., 2008).

La fertilización nitrogenada, permite la renovación adecuada de la madera, por medio de la emisión de brotes vigorosos y la formación de abundante follaje, que aseguran un crecimiento normal de los frutos y una buena floración (Rojas y Pérez, 2001).

Frecuentemente el nitrógeno es agregado a través de fertilización o adición de materia orgánica en descomposición, sujeta a una serie de transformaciones biológicas llevadas a cabo por insectos y microorganismos. En los suelos tropicales, el contenido de nitrógeno varía entre 0,05 y 4,7 %. En general, es común el rango comprendido entre 0,2 y 0,7 % para la denominada capa arable (Santana, 2007).

Entre los fertilizantes minerales, la urea es la fuente de N más utilizada para suplir los requerimientos del café, debido a su alto contenido del elemento (46 %) y a su relativo bajo costo (Leal y col., 2009).

La respuesta de *C. arabica* al nitrógeno es positiva y generalizada mundialmente y ha sido demostrada por numerosos investigadores como Rivera y Martín (1980); Carvajal (1984); Rivera (1988); Martín (1988); Bustamante y col. (1989); Snoeck y Snoeck (1992); Rivera y col. (1994); Rodríguez y col. (1998 b); Sadeghian y col. (2006 b). A nivel internacional las dosis de nitrógeno para *C. arabica* oscilan entre 80 – 412 kg.

ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y dependen de la tecnología de cultivo y condiciones edafoclimáticas concretas (Carvajal, 1984; Matiello y col., 1987; Santana, 2007; Sadeghian, 2009).

En Colombia se recomienda la aplicación de 120 – 300 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N a *Coffea arabica* de acuerdo con el contenido de materia orgánica del suelo, el nivel de sombra y la densidad de siembra (Sadeghian, 2008).

Afolami (1985) en Nigeria informó de la ausencia de respuesta a dosis de N en *C. canephora* y llegó a la conclusión de que el aporte ha permitido corregir la carencia en elementos nutritivos presentes en la plantación antes del experimento y sugirió aplicaciones racionales dirigidas a mantener el vigor de las plantaciones.

En Cuba la dosis óptima anual de nitrógeno en *Coffea arabica* osciló entre 100 kg.ha<sup>-1</sup> para suelos Pardos, 250 kg.ha<sup>-1</sup> para suelos Ferríticos y entre 300 – 350 kg.ha<sup>-1</sup> para suelos Ferralíticos Rojos de Montaña (Rivera y col., 1994).

Las recomendaciones de fertilizantes para *C. canephora* varían de acuerdo a las características de cada país. En la India, se recomiendan 80 kg.ha<sup>-1</sup> de N para garantizar un adecuado crecimiento y productividad (Jayarama y col., 1994). En Costa de Marfil, se encontró una respuesta lineal en la altura y el diámetro de la copa de *C. canephora* al estudiar niveles de N hasta 100 kg.ha<sup>-1</sup> (Oliveira y col., 1980).

Por su parte, Snoeck y Snoeck (1992), en clones de Robusta, incrementaron sus rendimientos con la utilización de 120 kg.ha<sup>-1</sup>; mientras que en Uganda no se pudo establecer una curva de respuesta, sin embargo se reafirma que es económicamente rentable la aplicación de N al caféto *canephora* (Kibirige – Ssebunja y col., 1993).

En Kenya, Njoroge y col. (1989) informaron de la ausencia de respuesta de *Coffea canephora*, cultivado en un suelo de alta fertilidad, ante dosis que variaron de 0 a 320 kg.ha<sup>-1</sup> de N; este último nivel del elemento, con un efecto depresivo en el crecimiento de los cafetos.

Se ha encontrado además que si se deja de aplicar N, la producción del caféto puede reducirse a la mitad, si el contenido de materia orgánica se encuentra por debajo del 8 % en suelos de Colombia (Sadeghian, 2009).

## **2.7. Descomposición de los residuos vegetales en el suelo. Factores de los que depende**

En la década de los ochenta del siglo XX se resumieron los avances científicos en los ciclos biogeoquímicos de los macroelementos que participan en la nutrición del café y marcaron los espacios que requerían de nuevas investigaciones. El ciclo global de un cafetal con sombra incluye tres subsistemas correlacionados, los del café, los del sombrío y las malezas (Aranguren y col., 1982).

El estudio del ciclo de nutrientes en los agroecosistemas es fundamental para comprender la dinámica de los elementos y su disponibilidad, en un manejo sostenible del sistema productivo (Cardona, 2004; Cardona y Sadeghian, 2005).

Los procesos de descomposición y los flujos de nutrientes son complejos en los trópicos y su velocidad aumenta, debido en gran parte, a las condiciones del clima y a las características de la biota y del suelo. Dichos aspectos han sido poco estudiados en los agroecosistemas, en los cuales la sincronización de la liberación de los nutrientes y la absorción por las plantas es de gran importancia en la productividad del cultivo (Rodríguez y Prieto, 2001).

La descomposición es proporcional al contenido de materia orgánica y a la tasa relativa de descomposición o transferencia de material vegetal mensual hacia el suelo y puede ser representada por modelos exponenciales simples (Jiménez y col., 2005).

La hojarasca juega un papel fundamental en el ciclo de nutrientes y en la transferencia de energía entre las plantas y el suelo, especialmente en agroecosistemas desarrollados en suelos pobres, donde la producción depende del aporte de nutrientes a través del proceso de descomposición. Una caída consistente de hojarasca a lo largo del año, acoplado con una lenta descomposición, puede proteger a los suelos contra la erosión (Arellano y col., 2004; Philpott y col., 2006).

La calidad y volumen de los residuos que quedan en el suelo y la forma en que estos son manejados, regulan el grado y extensión de la inmovilización o liberación del nitrógeno. En particular, la relación C:N de los residuos influye decisivamente en la retención o no del nitrógeno (Siqueira y Franco, 1988; Cotrufo y col., 1998).

La relación C:N y la cantidad de lignina y celulosa presentes en los residuos vegetales ejercen una influencia marcada en la velocidad de descomposición de estos. Entre los

factores existe una relación inversa, o sea, a mayor relación C:N y por ende mayor cantidad de lignina y celulosa, más lenta será la descomposición de los residuos, los cuales tienden a acumularse en el suelo de forma parcialmente descompuesta (Jenkinson, 1992).

El proceso de mineralización del nitrógeno consiste en la degradación de los compuestos orgánicos hasta la formación de nitratos. Los factores que determinan las tasas de mineralización del N de los residuos orgánicos son temperatura, mineralogía de las arcillas, pH, humedad y biología del suelo, relación C:N y manejo de los residuos, que condicionan que cada material presente un determinado grado de descomposición (Gunadi y col., 1998; Hartemink y Sullivan, 2001; Mendonca y Stott, 2003).

En residuos con relación C:N menor de 25 la mineralización del N es más rápida; mientras que con relaciones C:N mayores de 30, se inmoviliza el nitrógeno del suelo. Ross y col. (1995) plantean que los microorganismos también pueden inmovilizar el N, particularmente en suelos deficientes, si se le añaden dosis bajas de este nutrientes.

La mayoría de los suelos tropicales pasan por diversos períodos alternos de humedad y secado, lo que probablemente favorece la actividad microbiana del suelo, o una mayor accesibilidad del humus a los microorganismos, por la contracción o hinchamiento de los minerales arcillosos (Stevens y col., 1998).

De forma general la mineralización del N se incrementa con el aumento de la temperatura, (Rivera y col., 1999), con un óptimo para este proceso en condiciones tropicales mayor que en las regiones templadas, a partir de la adaptación de los microorganismos a las condiciones climáticas. Stanford y col., 1972 y Myers, 1975, citados por García (1997) encontraron un óptimo de 35 °C para la nitrificación.

La mineralización es superior en condiciones aerobias que anaerobias, Martín (2002) encontró altas velocidades de mineralización en experimentos de incubación aeróbica, debido a que los microorganismos responsables de este proceso son mayormente aeróbicos. En los agroecosistemas cafetaleros, han sido escasos los trabajos desarrollados sobre estos tópicos. Por estas razones se hace necesario continuar con las investigaciones orientadas a establecer la participación de los diferentes componentes arbóreos de los agroecosistemas cafetaleros en la nutrición y balance de nutrientes, en aras de buscar alternativas adecuadas para la conservación del medio ambiente y una explotación racional de los fertilizantes.

## **2.8. Algunos indicadores de las propiedades del suelo**

Para poder evaluar adecuadamente las propiedades del suelo se deben contar con elementos que permitan conocer su estado actual. El diagnóstico y monitoreo de estos indicadores, es una herramienta fundamental para la implementación de sistemas productivos sustentables (Alkorta y col., 2003; Moscatelli y col., 2007).

Debido a que las propiedades del suelo dependen considerablemente del ecosistema, es de suma importancia determinar las principales características físicas, químicas y biológicas (Chaveli y col., 2003; Bautista y col., 2004; Font y col., 2005).

Si se consideran las múltiples y variadas propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo que pueden ser empleadas como indicadores, su dinámica en tiempo y espacio así como el nivel de escala donde se aplicará (parcela, cuenca, región, entre otros), no resulta sencillo seleccionar un conjunto de propiedades que cubran todas las condiciones para valorar adecuadamente el suelo (Li y Lindstrom, 2001).

Dado que las funciones del suelo están claramente interrelacionadas, para describir la calidad de un suelo en particular, puede otorgarse mayor o menor peso a cada una de las propiedades que las integran; así estará determinada en última instancia por los usos a los cuales se destine éste y el ecosistema en el cual se trabaje. Los criterios para seleccionar los indicadores serán diferentes para los diversos usos del suelo y serán dinámicos en el tiempo (Noble y col., 2000; Astier, 2002).

Un indicador es entonces una variable que resume o simplifica informaciones que hacen que un fenómeno o condición de interés se haga perceptible y que cuantifica, mide y comunica, en forma comprensible, informaciones relevantes (Irigoin, 2004).

Existen en la actualidad dos posturas acerca de la universalidad de los indicadores: una aboga por que no podrían ser un grupo seleccionado para cada situación particular, sino que deben ser los mismos en todos los casos, con el propósito de facilitar y hacer válidas las comparaciones a nivel nacional e internacional. La otra sostiene que los indicadores que se empleen deben reflejar las principales restricciones del suelo, en congruencia con la función o las funciones principales que se evalúan (Bautista y col., 2004).

Garbisu y col. (2007) y Sampaio y col. (2011) hacen referencia a parámetros biológicos con potencialidad para ser utilizados como indicadores de calidad de suelo, como son la biomasa microbiana, la respiración biológica, grupos funcionales de la microflora, las

actividades enzimáticas, la composición y diversidad de la comunidad microbiana, entre otras.

Para evaluar la dinámica de la actividad biológica y la fertilidad de los principales suelos de Cuba en diferentes épocas del año, se han tenido en cuenta los procesos de amonificación y nitrificación y el estudio de las enzimas invertasa, oxido-reductasa, deshidrogenasa y ureasa (Martínez, 1985) e incluso más recientemente se incluyeron dentro de los indicadores del suelo para los estudios biológicos en Cuba, la respiración basal con inducción de C y N (Calero y col., 1999; Font y col., 2003).

No parece haber entonces acuerdo entre los autores acerca de cómo deben seleccionarse los indicadores de calidad de suelo. Según estas definiciones, no habría una dirección única para generar un conjunto de indicadores para cada propósito. Los enfoques pueden cambiar con el tiempo en la medida que se comprendan los problemas ambientales.

Los indicadores serían entonces variables a lo largo del tiempo y su selección pasaría a depender de condiciones espacio – temporales (Noble y col., 2000; Astier, 2002).

Se propone como desafío en este nuevo campo, relacionar las condiciones del suelo actual con las tendencias o cambios que pueden inducirse de dicha condición, priorizar los parámetros y relacionarlos con las funciones del suelo y fijar los valores críticos en el cual se indique qué suelo y cuáles funciones del ecosistema están dañadas (García y col., 2000). Se debe destacar además que, aquellos parámetros catalogados como biológicos y bioquímicos son muy dinámicos, por lo que tienen la ventaja de servir de señales tempranas de degradación o mejoría de los suelos.

### **2.8.1. Los microorganismos del suelo**

Los microorganismos desempeñan un papel decisivo en el proceso de transformación de los compuestos minerales y orgánicos que se incorporan al suelo, influyendo en el contenido y movilización de los macro y micronutrientes; así como en su balance y asimilación por las plantas (Alexander, 1980; Martínez, 1985; Mayea y col., 1998; Hernández y col., 2003).

Dentro de los agroecosistemas, la actividad de los microorganismos juega un papel determinante, ya que la intensidad de este proceso afecta la descomposición y por ende, la liberación e inmovilización de los nutrimentos (Cardona y Sadeghian, 2005). Por lo tanto influyen sobre la fertilidad de los suelos, tanto en el establecimiento de los ciclos

biogeoquímicos, como en la formación de la estructura del mismo (Burbano, 1994; Mayea y col., 1998; García y col., 2000). Los parámetros microbiológicos sirven para indicar posibles cambios netos en el equilibrio del suelo, por causas diversas, que no podrían detectarse con métodos tradicionales (García y col., 2000).

### **2.8.2. La respiración biológica del suelo**

La actividad microbiana del suelo puede ser estimada indirectamente a través de la determinación de la respiración biológica. Esta consiste en establecer la producción de  $O_2$  en el medio o la concentración de  $CO_2$  desprendido, en función de la actividad biológica y del contenido del suelo en carbono orgánico fácilmente mineralizable, mediante la técnica de incubación estática, que captura el producto de mineralización en una solución alcalina, durante un periodo de tiempo, bajo condiciones ambientales óptimas (Alef y Nannipieri, 1995; García y col., 2000).

El dióxido de carbono es el producto final en la mineralización de los compuestos carbonados en el suelo. Se emplea para la caracterización microbiológica de los suelos, teniendo en cuenta la cantidad de  $CO_2$  que se desprende al cual se le denomina también como evolución del  $CO_2$  o capacidad respiratoria del suelo y constituye un índice de la actividad degradativa microbiana en los suelos (Rodríguez, 2010).

Las mediciones también proveen una indicación sensitiva de la respuesta de la actividad microbiana a variaciones de temperatura y humedad, los efectos de humedecimiento – secado, la aplicación de agroquímicos, la exudación de sustancias supresoras y el manejo del medio, entre otros (García y col., 2000).

Puesto que la degradación del carbono orgánico es una propiedad de todos los organismos heterótrofos, la medida de la respiración del suelo es uno de los métodos más comunes usados para determinar su actividad biológica (Moreira y Siguiera, 2002). Este indicador sirve además como un índice del equilibrio de los procesos biológicos, químicos y microbiológicos que ocurren en el suelo (Kuprevich, 1974; DePolli y Guerra, 1997). Asimismo se reportan correlación entre el  $CO_2$  liberado y la cantidad de nutrientes orgánicos del suelo (Martínez, 1985).

La medida del desprendimiento de  $CO_2$  se ha empleado para estimar la biomasa microbiana que realmente es activa (Moreira y Siguiera, 2002; Cabezas, 2008). La medida de la respiración del suelo puede permitir evaluar además, el efecto causado por

productos químicos empleados en la agricultura sobre las funciones fisiológicas de los suelos (García y col., 2000; Bustamante y col., 2002; Assis y col., 2003). En las investigaciones científicas relacionadas con éste tema en Cuba se han empleado métodos volumétricos como el descrito por Mayea y col. (1998) y Calero y col. (1999).

La medida de la respiración del suelo en presencia de productos químicos empleados en la agricultura convencional, puede permitir evaluar los daños causados por éstos sobre las funciones fisiológicas de los suelos. La determinación de éste indicador de calidad del suelo también es útil para conocer el efecto de determinadas variables sobre la oxidación de la materia orgánica *in situ*; sin embargo, en ningún momento puede indicar cuál sustrato orgánico en particular está siendo catabolizado (García y col., 2000).

Puede señalarse además que la mayor parte del carbono de la materia orgánica descompuesta por los diferentes microorganismos del suelo, se libera en forma de CO<sub>2</sub>, pero incorporan cantidades variables de carbono en los compuestos orgánicos de las células microbianas. Para incorporar el carbono en el protoplasma y otros compuestos orgánicos en sus células, los microorganismos deben utilizar, al mismo tiempo, otros elementos nutritivos, de los cuales los más importantes son N, P, y S (Rodríguez, 2010).

De forma general se plantea que, la dinámica microbiana, la temperatura, la humedad, el contenido de materia orgánica, el pH, entre otros factores influyen en la respiración biológica del suelo (Muhr y col., 2008; Pandey y col., 2010).

### **2.8.3. La amonificación y la nitrificación**

El N que se encuentra en el suelo está en forma orgánica, en general, inaccesible por las plantas, pero al descomponerse por la acción de los microorganismos, forma nitrógeno mineral asimilable por los cultivos. En este proceso, conocido como mineralización, se distinguen dos etapas: la amonificación y la nitrificación, que constituyen poderosos parámetros para medir la actividad biológica y la fertilidad del suelo (Martínez, 1985; FAO, 2002).

La amonificación es el proceso mediante el cual se descomponen las sustancias nitrogenadas orgánicas hasta la formación del ión amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>); esto ocurre en todos los suelos dado que en la misma intervienen la mayoría de los microorganismos, mientras que la nitrificación, oxidación del amonio hasta nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), es ejecutada por una microflora específica (Martínez, 1985; Mayea y col., 1998).

La modificación de los sustratos nitrogenados orgánicos por los microorganismos, primero a amonio y después a nitrato, tiene profunda implicación en los ecosistemas terrestres y en la agricultura práctica, como indicador no sólo de la actividad biológica real y potencial de un suelo sino, además, explican los cambios ocurridos en la dinámica del nitrógeno (Martínez, 1985).

#### **2.8.4. Los indicadores químicos del suelo**

Los indicadores químicos del suelo incluyen propiedades que afectan las relaciones suelo – planta y la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas y microorganismos. Doran y Parkin (1994) propusieron como indicadores el contenido de materia orgánica, el pH, la conductividad eléctrica, el N, P y K disponible.

Sin embargo, los cambios químicos generados en el suelo por el uso de los fertilizantes varían de acuerdo a la dinámica propia de cada elemento, la dosis y fuentes empleadas, los sistemas de aplicación y las características particulares del suelo y del clima, entre otros (Stevens y col., 1998; Sadeghian y col., 2006 a).

El incremento en el nivel de nutriente aplicado, así como su persistencia y residualidad a través del tiempo, son aspectos importantes a tener en cuenta junto con el efecto del fertilizante sobre la reacción del suelo y disponibilidad de otros elementos (Guerrero, 1994).

En este sentido, juegan un papel importante los fertilizantes nitrogenados, pues su aplicación genera un excedente de  $H^+$  que gradualmente reemplaza a las bases que son lavadas y transportadas a los horizontes subyacentes, acompañados de aniones en las aguas de percolación (Foth y Ellis, 1997; Havlin y col., 1999).

El efecto acidificante de los fertilizantes nitrogenados depende de la fuente empleada. La acidez provocada por el sulfato de amonio por unidad de nitrógeno aplicada es mayor que la de nitrato de amonio y urea (Guerrero, 1994; Foth y Ellis, 1997).

Los primeros estudios detallados en zonas cafetaleras se desarrollaron en Colombia por López (1965) quien determinó durante 25 meses que la aplicación de sulfato de amonio en un suelo Franco Arenoso provocó pérdidas significativas de Ca, Mg y K, sin que se incrementara la acidez.

Valencia y col. (1975) en un ensayo realizado en macetas con sulfato de amonio y nitrato de amonio durante tres años, encontraron disminución de los valores del pH y el

desplazamiento de las bases intercambiables por los fertilizantes nitrogenados. Valencia (1998) encontró valores bajos de pH, Ca y Mg en la zona de fertilización en comparación con la calle de los cafetos.

Sadeghian y col. (2001) evaluaron las características del suelo en diferentes agroecosistemas y encontraron una mayor acidez y menores contenidos de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en cafetales fertilizados frente al testigo sin fertilizar, tendencia que fue relacionada con una mayor dosis de nitrógeno.

Por otro lado, la materia orgánica de suelo y la biología del suelo desempeñan un papel importante en la calidad del suelo (SQI, 1996). Quiroga y col. (2000) afirman que la materia orgánica es el principal indicador e indudablemente es el que posee una influencia más significativa sobre la calidad del suelo y su productividad. Una meta de la investigación de la calidad del suelo es aprender cómo manejar la dinámica de la materia orgánica y las poblaciones de organismos asociados, de manera que mejore su función. Los suelos responden diferencialmente a la forma en que son manejados, dependiendo de las características inherentes y propias de ellos.

La distribución en cantidad y profundidad de la materia orgánica en el suelo, varía de acuerdo a su manejo, sistemas de explotación y otros (Martín, 2006).

Es importante señalar que los indicadores de propiedades de los suelos han sido utilizados de forma individual por un grupo de autores cubanos para evaluar el estado de fertilidad o deterioro del suelo y estudiar el efecto del factor antropogénico sobre el sistema suelo – planta (Calero y col., 1999; Font y col., 2001; Chaveli y col., 2003; Font, 2007).

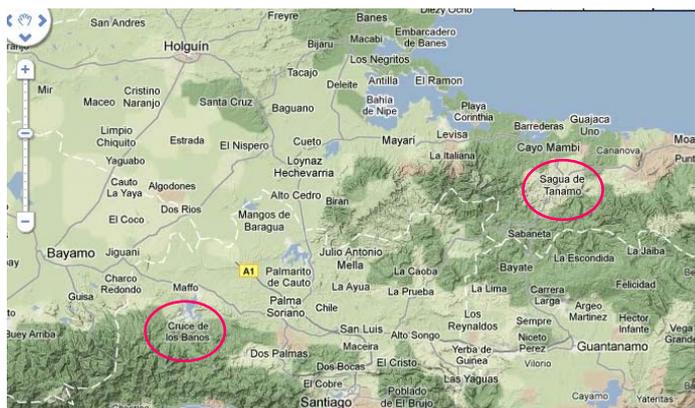
### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Caracterización edafoclimática de las localidades donde se desarrollaron los experimentos

La investigación se desarrolló durante el período de 1995 a 2007 en dos localidades de los macizos montañosos Sierra Maestra y Sagua – Nipe – Baracoa (Figura 1).

##### **Localidad Tercer Frente (sitio Cruce de los Baños):**

situada en el municipio Tercer Frente, macizo Sierra Maestra, a los 20°09' lat N y 76°16' long O, a 35 km ONO de la ciudad de Santiago de Cuba, a 150 m.s.n.m., con una temperatura media anual (promedio de 13 años) de 24,5 °C, temperatura mínima de 15,5 °C, temperatura máxima de 31 °C, precipitación de 1 654 mm en



**Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios experimentales en los macizos montañosos Nipe – Sagua – Baracoa (La Alcarraza, Sagua de Tánamo) y Sierra Maestra (Cruce de los Baños, Tercer Frente).** Fotografía tomada de <http://www.mapalandia.com>

/cuba/  
112 días con lluvia y humedad relativa de 79,8 %. Relieve: Premontaña. Sombra predominante: *Samanea saman* (Jacq) Merril. Tipo de suelo: Pardo ócrico sin carbonatos (MINAG, 1999), que se corresponde con un Cambisol háplico (éutrico) (arcílico) (WRB, 2006).

**Localidad La Alcarraza:** situada en el municipio Sagua de Tánamo, macizo Nipe – Sagua – Baracoa, a los 20°35' lat N y 75°15' long O, a 118 km ESE de la ciudad de Holguín. Con una altura de 300 m.s.n.m. Las principales variables climáticas son: temperatura media anual (promedio de 13 años): 24,1 °C. Precipitación (promedio de 13 años): 1 773 mm y 120 días de lluvia. Relieve: Premontaña. Sombra predominante: *Gliricidia sepium* (Jacq) Walp. Tipo de suelo: Pardo gleyzoso sin carbonatos (MINAG, 1999), que se corresponde con un Cambisol estágnico (éutrico) (arcílico) (WRB, 2006).

El comportamiento de las principales variables climáticas: precipitaciones (mm) y temperatura (°C), así como los días de lluvia que influyeron en el cultivo durante el período de desarrollo de los experimentos, se reflejan en los Anexos 1 y 2.

En los sitios experimentales se hicieron perfiles de suelo al inicio de los experimentos y se determinaron algunas características químicas, físicas y la clasificación de los suelos (Anexos 3 y 4). Algunas propiedades de los suelos se presentan en la Tabla 1.

Para el análisis químico del suelo, se emplearon los métodos descritos por las Normas Rales de la Agricultura (NRAG, 1987 y 1988): pH (H<sub>2</sub>O) por el método potenciométrico, con relación suelo: solución de 1:2.5; materia orgánica (% M.O.) por el método de Walkley y Black; P asimilable por extracción con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N con relación suelo: solución 1:2.5; cationes intercambiables (cmol.kg<sup>-1</sup>) por extracción con NH<sub>4</sub>Ac 1 Mol.l<sup>-1</sup> a pH 7 y determinación por complejometría (Ca y Mg) y fotometría de llama (K).

**Tabla 1. Principales características químicas del horizonte cultivable (0 – 30 cm) de los suelos bajo estudio al inicio de los experimentos. 1996.**

Suelos	pH	M.O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	CIB
			(mg.100 g <sup>-1</sup> )		(cmol. kg <sup>-1</sup> )				
Pardo ócrico sin carbonatos. Sitio Tercer Frente	6.4	2.97	15.20	22.14	0.64	31.5	11.8	0.4	44.3
Pardo gleyzoso sin carbonatos. Sitio La Alcarraza	5.6	3.07	16.72	26.0	0.75	26.8	10.8	0.27	38.6

CIB: Capacidad de Intercambio de Bases =  $\sum$  Bases cambiables.

Los suelos Pardos donde se condujeron las investigaciones poseen contenidos altos de calcio y magnesio, medios de potasio y adecuada relación Ca/Mg. El pH es ligeramente ácido, y se ubicó dentro de los rangos adecuados para el cultivo del cafeto, y se presentaron valores medios de materia orgánica y fósforo (Carvajal, 1984).

### 3.2. Descripción de los experimentos

#### 3.2.1. Experimento 1. Crecimiento aéreo y radical, la producción de fitomasa y la extracción de N por *Coffea canephora* cultivado sobre suelos Pardos

Las posturas de la variedad Robusta se plantaron en octubre de 1995 en Tercer Frente y en diciembre de ese mismo año en La Alcarraza, en ambos casos con un marco de plantación de 3 x 1.5 m, correspondiente a una densidad de 2222 plantas.ha<sup>-1</sup>. El área de extracción estuvo formada por 180 plantas, distribuidas en tres parcelas de 270 m<sup>2</sup>. En cada parcela se sembraron 60 plantas, las que se condujeron a libre crecimiento hasta el

quinto año de edad. En cada año evaluado, se extrajeron dos plantas al azar por parcela, para un total de seis por año.

Las plantas se fertilizaron en el primer ciclo según las recomendaciones establecidas para *Coffea arabica* cultivadas sobre suelos Pardos (Bustamante y col., 1989). Como portadores se utilizaron la urea, el superfosfato sencillo y cloruro de potasio (Tabla 2).

**Tabla 2. Dosis anuales de nutrientes aplicadas en las parcelas de extracción durante los dos ciclos estudiados en el experimento 1.**

Año	kg.ha <sup>-1</sup>		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
<b>Primer ciclo</b>			
1996	90	40	160
1997 - 2000	100		
<b>Segundo ciclo</b>			
2002	100	No se aplicó	160
2003	150		
2004 - 2005	200		

\* Aplicación realizada solo en el año 2005.

La dosis de nitrógeno se fraccionó al 50 %, con dos aplicaciones anuales (abril e inicios de octubre). El potasio se aplicó en dosis de 160 kg.ha<sup>-1</sup> en ambos ciclos productivos y se fraccionó todos los años en dos momentos, en abril el 60 % y el resto en octubre. El fósforo en el primer ciclo se aplicó en dosis de 40 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, en el hoyo, en el momento de la plantación, y el resto de los años en abril. En el segundo ciclo, por los altos contenidos de fósforo en el suelo debido a las aplicaciones del ciclo anterior, solo se realizó una aplicación en el 2005.

### 3.2.1.1. Crecimiento aéreo

Las variables altura, diámetro de la copa y número de ramas plagiotrópicas de primer orden, se evaluaron durante los cuatro primeros años de cada ciclo (1996 – 1999 y 2002 – 2005), según la metodología propuesta por Bustamante y col. (1989):

- Altura de la planta, cm: se midió con una cinta métrica desde la base del eje hasta la yema terminal de los tres ejes seleccionados, promediándose por planta.
- Diámetro de la copa, cm: se utilizó una cinta métrica y se midió la planta por el centro, en dos direcciones (transversalmente) para obtener la media por planta.
- Número de ramas plagiotrópicas de primer orden: se contaron todas las ramas por cada eje y se calculó la media por planta.

### 3.2.1.2. Producción de fitomasa y extracción de N

Se determinó la producción de fitomasa y la extracción de nutrientes en el sistema aéreo y en el radical durante los primeros cinco años de edad de las plantaciones (1996 – 2000), correspondientes al primer ciclo productivo. La poda se realizó en febrero del 2001 y posteriormente se evaluó por cuatro años en el segundo ciclo (2002 – 2005) sólo en el sitio La Alcarraza.

El sistema aéreo se separó en diferentes partes: hojas, ramas (lignificadas y en crecimiento), tallos (lignificado y en crecimiento), frutos y raíces (Rivera, 1988). A partir de los 24 meses del primer ciclo y al año después de la poda, se establecieron mantas de polietileno, que cubrieron  $\frac{1}{4}$  del área vital del cafeto (0,75x1.5 m), en aquellas plantas que se extraerían y se recolectó mensualmente el material vegetal que cayó de las plantas al suelo y separándose en hojas, frutos y ramas ( $t.ha^{-1}$ ).

En todos los casos se determinó la masa seca (secado de cada órgano a 70 °C hasta obtener masa constante) y se expresó en  $t.ha^{-1}$ , así como el correspondiente análisis químico de N, mediante digestión húmeda con  $H_2SO_4 + Se$  y determinación colorimétrica con el reactivo de Nessler y expresado en % de masa seca por órganos (Paneque y col., 2010). Con estos valores se calcularon las extracciones de N, de cada compartimiento u órgano del cultivo en todos los momentos evaluados, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Extracción de N por órgano analizado (kg.ha}^{-1}\text{)} = [\text{Masa seca (kg.ha}^{-1}\text{)} * \% \text{ N en cada órgano}]/100$$

Se calcularon las producciones de fitomasa total del cafeto ( $t.ha^{-1}$ ) y las correspondientes extracciones de N ( $kg.ha^{-1}$ ) en cada fecha de muestreo, a partir del comportamiento de las variables en cada uno de los órganos evaluados, incluyendo la caída del material vegetal, así como se estimaron las extracciones anuales a través de la diferencia entre las extracciones acumulativas de los muestreos sucesivos.

Se evaluó además la exportación de N por las cosechas en el momento que se evaluaron los diferentes órganos, tomándose tres muestras de frutos por parcela (100 g de masa fresca), a las que se determinó el contenido de masa seca y de N de forma similar a la ya descrita.

Análisis estadístico: A todas las variables evaluadas se les determinó la media y la desviación estándar.

### **3.2.1.3. Sistema radical**

Para el estudio del sistema radical se extrajeron bloques de 25 x 25 x 25 cm, en un área formada por 1.5 m (distancia hacia la calle) y 0.75 m (entre plantas), en todos los casos centrado con relación a la planta y hasta un metro de profundidad o hasta que se encontraron raíces. El volumen total del suelo extraído representó 1/4 del volumen de suelo ocupado por la planta a partir de la densidad de plantación utilizada. Las raíces se separaron en: principal, axiales y laterales (Muller, 1966; Rivera, 1988).

### **3.2.2. Experimento 2. Reciclaje de residuos componentes del agroecosistema cafetalero, su descomposición y liberación del nitrógeno**

#### **3.2.2.1. Evaluación de la fitomasa y el N reciclado por la hojarasca de los árboles de sombra y el café en los dos sitios experimentales**

La cuantificación de la caída de la fitomasa del café (hojas) y de los árboles de sombra (hojas, frutos, flores y raquis) al suelo del agroecosistema cafetalero se realizó mensualmente desde enero a diciembre en las dos localidades y durante los dos ciclos productivos. El retorno de los deshojes, otros restos de café (flores, frutos y ramas) y las arvenses se realizó en el segundo ciclo de ambos sitios.

La estimación de la cantidad de hojarasca caída de los árboles de sombra en cada localidad se realizó por medio de mantas de nylon de polietileno de 1m x 1m. Se seleccionaron al azar en cada área experimental, cuatro árboles de sombra y se colocaron ocho mantas por árbol, cuatro en la calle y cuatro en la hilera del café (Anderson e Ingram, 1996).

Cada mes se procedió a reunir todo el material recolectado en cada manta y posteriormente se limpiaron los restos de suelo y se separaron por especie y componente en hojas, ramas, flores y raquis.

Se determinaron la masa seca y el contenido de N (%), por la metodología descrita en el experimento 1, acápite 3.2.1. y se expresaron como  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mes}^{-1}$ . Durante el segundo ciclo productivo, se estimó además el aporte de fitomasa y N asociado que representaron la poda y los deshojes que se le hicieron al café. Para cuantificar el aporte de la poda y los deshojes, se tomaron las muestras de cinco plantas tomadas al azar. Para la poda se colectaron los tallos y ramas de las plantas. La práctica del deshoje se realizó tres veces por año según lo recomendado por Díaz y col. (2003).

Para la estimación de las cantidades de fitomasa ( $t \cdot ha^{-1}$ ) y de las cantidades de N asociado ( $kg \cdot ha^{-1}$ ) se calculó el área neta por hectárea (%) correspondiente a las arvenses, descontando las áreas vitales de los árboles de sombra y de los cafetos. Se identificaron por especies (Anexo 5) y se les determinó su porcentaje de participación en la mezcla mediante la fórmula:

$$(MS_{mezcla} * \%N_{mezcla}) = (MS_{sp1} * \%N_{sp1}) + (MS_{sp2} * \%N_{sp2}) \dots + (MS_{spn} * \%N_{spn})$$

MS = masa seca ( $t \cdot ha^{-1}$ )    sp = especies identificadas    n = total de especies que integraron la mezcla

### **3.2.2.2. Descomposición de la hojarasca del cafeto y los árboles de sombra. Sitio Tercer Frente.**

Para estudiar la velocidad de descomposición de los restos vegetales, se utilizó el método de las bolsas (Anderson e Ingram, 1996) durante los años 2003 a 2005.

Para cada uno de los residuos se prepararon 24 bolsas de malla de polietileno de 20 cm x 15 cm con rejillas de 1 mm x 1 mm. En cada bolsa se depositó el material vegetal en específico a estudiar (50 g de masa fresca) y se distribuyeron de forma homogénea en todo el área de la bolsa, procurando que no quedaran compactas, para facilitar la descomposición y simular el estado en que quedan naturalmente en la superficie del suelo después de su caída. Las bolsas se distribuyeron aleatoriamente en la plantación, debajo de los cafetos y se colocaron en el mes de marzo de cada año.

Se estudió la descomposición de diferentes residuos, para cada uno de los cuales se realizó un ensayo específico. Los residuos estudiados fueron los siguientes:

- Hojas de cafetos: se utilizaron hojas recién caídas.
- Hojarasca de algarrobo: compuesta por hojas, flores y vainas caídas.
- Hijos del café: se tomaron al momento de realizar los deshijos.
- Arvenses: se tomaron de la mezcla de las especies encontradas en el área en el momento de realizar la limpia.

Las evaluaciones se realizaron mensualmente hasta los 210 días, durante los años 2003, 2004 y 2005. Se recolectaron mensualmente tres bolsas para su evaluación. Al material remanente se le eliminaron los residuos de suelo y de otras especies; se secaron a 70 °C hasta alcanzar valores de peso constantes mediante una balanza analítica.

Para evaluar la descomposición de los materiales vegetales se determinó la masa seca remanente (MSR) en las bolsas, en cada momento de muestreo y se expresó como porcentaje de la masa seca inicial.

$$\text{MSR (\%)} = \frac{\text{masa seca muestreo (g)}}{\text{masa seca inicial (g)}} * 100$$

La determinación de la tasa de descomposición del material vegetal, se estimó a través de un modelo exponencial simple del orden:

$$y = y_0 e^{-kt} \text{ (Jiménez y col., 2005)}$$

y = porcentaje de masa seca remanente       $y_0$  = porcentaje de masa seca inicial      t = tiempo  
k = tasa relativa de descomposición mensual o constante de velocidad de descomposición

El coeficiente de descomposición (k) indica la velocidad con que se transforman o descomponen los residuos vegetales, y se determinó por la fórmula (Jiménez y col., 2005):

$$k = - [\ln (y/y_0)]/t$$

Se determinó la concentración de nitrógeno (% N) en la masa seca remanente de los diferentes residuos vegetales y de cada una de las bolsas mediante el método colorimétrico referido en el acápite 3.2.1.

El flujo o transferencia de nitrógeno liberado mensualmente se determinó por la fórmula descrita por Jiménez y col. (2005):

$$\% \text{ N liberado} = 100 - [ (N_m/N_i) * \text{MSR} ]$$

% N liberado = porcentaje del nutrimento liberado mensualmente.  
N<sub>m</sub> = concentración de nutrimento en la muestra residual mensual (%).  
N<sub>i</sub> = concentración del nutrimento en la muestra inicial (%).  
MSR = masa seca remanente (%).

El tiempo medio de vida de la materia seca y del nutriente en el residuo vegetal, o lo que es lo mismo, el tiempo necesario para que la mitad de ese residuo desaparezca o para que el N se libere, se calculó por la ecuación  $t_{1/2} = \ln (2)/k$  (Gourete, 2007). En todas las evaluaciones realizadas se determinó la media y la desviación estándar para cada tipo de material en estudio.

### **3.2.3. Experimento 3. La fertilización nitrogenada para plantaciones de *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos durante dos ciclos productivos**

Con el propósito de determinar el efecto de la fertilización N sobre el crecimiento, rendimiento y algunos indicadores químicos y microbiológicos del suelo, se realizó este experimento en un área aledaña a la de extracción en ambas localidades durante dos

ciclos productivos. Las posturas fueron plantadas en mayo de 1996 a una distancia de 3 x 1.5 m entre plantas, para una densidad de plantación de 2 222 plantas.ha<sup>-1</sup>.

En un diseño experimental de bloques al azar, se estudió la respuesta de cinco sistemas de fertilización nitrogenada (Tabla 3) en presencia de un fondo fijo de PK, con cuatro réplicas. Las parcelas experimentales estuvieron compuestas por tres hileras de siete plantas cada una, de ellas las cinco centrales de cada surco se consideraron como de cálculo.

**Tabla 3. Dosis de nitrógeno (kg.ha<sup>-1</sup>) empleadas en los diferentes esquemas de fertilización estudiados.**

Tratamientos	Primer ciclo productivo			Segundo ciclo productivo		
	1996	1997	1998 - 2002	2003	2004	2005 - 2007
N <sub>0</sub>	0	0	0	0	0	0
N <sub>1</sub>	30	45	50	50	75	100
N <sub>2</sub>	60	90	100	100	150	200
N <sub>3</sub>	90	135	150	150	225	300
N <sub>4</sub>	120	180	200	200	300	400

La dosis de nitrógeno de 1996 se fraccionó al 50 %, con dos aplicaciones anuales (abril e inicio de octubre). En 1997, 1998 y 1999 se fraccionó en tres momentos a partes iguales (abril, julio y octubre), en ambas localidades. El resto de los años se aplicó en dos momentos, al 50 %, en abril e inicios de octubre, para cada sitio experimental.

En el segundo ciclo, la dosis de nitrógeno se fraccionó al 33 % y se aplicó todos los años en tres oportunidades (abril, junio e inicios de octubre).

La aplicación de fósforo y potasio se realizó según lo descrito en el acápite 3.2.1. Como portadores se utilizaron los descritos en el experimento 1. Los fertilizantes se incorporaron a la zona de fertilización, en forma de media luna, alrededor del tallo.

El diámetro de la copa se determinó en los primeros dos años del primer ciclo productivo (1997 y 1998) y de forma similar en el segundo ciclo productivo (2003 y 2004), a través del procedimiento descrito en el acápite 3.2.1.

Todos los años se cosecharon los frutos maduros de cada parcela, se pesaron (kg) y se extrapolaron a t.ha<sup>-1</sup> de café cereza y posteriormente a tonelada de café oro por hectárea (t.ha<sup>-1</sup> de café oro), con un factor de conversión de 0,22 para el Robusta en estas condiciones (Bustamante y col., 2002).

La recomendación de la dosis óptima de fertilización nitrogenada para cada año y sitio, se realizó según el modelo discontinuo rectilíneo descrito por Waugh y col. (1972), a partir de los rendimientos obtenidos en todos los tratamientos. La descripción de la metodología para realizar este tipo de recomendación se ofrece en el Anexo 6.

Se calculó la eficiencia agronómica (EA) para la dosis óptima propuesta en cada año y sitio experimental según la fórmula propuesta por Stewart (2007).

$$EA = (R - R_0)/D$$

R = rendimiento del cultivo con aplicación del nutriente (kg.ha<sup>-1</sup>).

R<sub>0</sub> = rendimiento del cultivo sin aplicación del nutriente (kg.ha<sup>-1</sup>).

D = dosis del nutriente (kg.ha<sup>-1</sup>).

### **3.2.3.1. Influencia de la fertilización nitrogenada sobre algunos indicadores microbiológicos del suelo**

En cada parcela que constituyeron los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada, se seleccionaron cinco plantas y se tomaron tres muestras de suelo por cada planta en la zona de fertilización y en la profundidad de 0 – 30 cm, estas muestras se mezclaron entre sí para conformar una muestra compuesta por cada parcela.

Las evaluaciones de los indicadores microbiológicos se realizaron durante los meses de octubre, noviembre y diciembre de cada año evaluado, al final de la fertilización.

La respiración biológica se determinó en los años 2000 y 2001 (primer ciclo) y desde el 2004 a 2006 (segundo ciclo productivo), en ambos sitios experimentales.

Se utilizó el sistema de frasco cerrado propuesto por Isemeyer (1952), con humedecimiento de 25 g de suelo al 60 % de la capacidad máxima de retención de humedad, determinada según la metodología propuesta por Forster (1995) y la determinación del CO<sub>2</sub> se realizó al cabo de 24 horas de incubación a 30 °C (Dommergues, 1960).

Para determinar la respiración biológica (RB) se utilizó la fórmula descrita por Calero y col. (1999) y Font (1999):

$$RB \text{ (mg CO}_2 \text{ / g suelo)} = [(K - M) * 2.2 * Vt] / P * V$$

K. ml de HCl 0.1 N gastado por el control      V ml que se escogen de la solución colectora para valorar.

M. ml de HCl 0.1 N gastado por la muestra      Vt. Volumen total de solución colectora

2.2. constante para cuando se trabaja con HCl 0.1mol.L<sup>-1</sup>      P peso de la muestra de suelo (g)

La capacidad nitrificadora se determinó en el segundo ciclo productivo durante los años 2004, 2005 y 2006 en los dos sitios experimentales.

Se utilizó el método de incubación de 25 g de suelo durante 15 días, descrito por Bolotina y Abramova (1968). La extracción de nitratos se realizó con K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 0,01 % y se utilizó ácido disulfofenólico para el desarrollo del color. Para la nitrificación potencial (NP) se adicionó sulfato de amonio al 1 % respecto al peso del suelo.

La nitrificación se cuantificó a partir de la fórmula descrita por Calero y col. (1999):

$$\text{mg de NO}_3 / 100 \text{ g suelo} = \frac{a * v * 100}{b * v_1} * (c/c_1)$$

a. lectura en la curva.                    100 coeficiente para llevar a 100 g de suelo  
v. solución extractora                    b. peso del suelo  
v<sub>1</sub>. ml que se evaporan                    c. volumen al cual se lleva la solución  
c<sub>1</sub>. ml tomado para la dilución

### **3.2.3.2. Influencia de la fertilización N sobre algunos indicadores químicos y físico – químicos del suelo**

Se determinó el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el pH y el porcentaje de materia orgánica del suelo en todos los tratamientos por los métodos descritos en el acápite 3.1.

Las evaluaciones se realizaron en diciembre de cada año, excepto el muestreo inicial que se hizo en marzo de 1996, antes del montaje del experimento. Las muestras se tomaron en la banda de fertilización de los cafetos y en la profundidad de 0 – 20 cm. En Tercer Frente las evaluaciones del pH se realizaron en los años 1996, 1999, 2001 y 2006, mientras que en La Alcarraza se hicieron en los años 2001, 2005 y 2006. El contenido de materia orgánica se evaluó en los años 1996, 1998, 2001 y 2006 en los dos sitios.

Análisis estadístico: Se realizó un análisis de varianza a los datos obtenidos. En los casos en que se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, las medias fueron comparadas por la prueba de Rangos Múltiples de Duncan ( $p < 0.05$ ). Se establecieron regresiones entre los indicadores de actividad biológica evaluados en función de las dosis de N y el pH del suelo encontrado en cada uno de los tratamientos y analizados de forma conjunta todos los años.

### **3.2.3.3. Coeficiente de aprovechamiento del N**

El coeficiente de aprovechamiento del N por los cafetos se estimó en los años coincidentes con la tercera y cuarta cosecha del segundo ciclo productivo, a través de las extracciones de plantas a los 35 y 45 meses. En ambos sitios experimentales, se extrajeron seis plantas por parcelas. Se seleccionaron los tratamientos N<sub>0</sub> y N<sub>2</sub>.

El sistema aéreo de estas plantas se separó en hojas, tallos, ramas y frutos, a los que se les determinó la masa seca. Se realizó el análisis químico de los diferentes órganos de las plantas y se determinaron los contenidos de N del cultivo en  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , según la metodología descrita en el experimento 1, acápite 3.2.1.

Mediante el método de las diferencias (Rivera, 1993a; Stewart, 2007) se calculó el coeficiente de aprovechamiento (CA) del fertilizante nitrogenado según la fórmula:

$$\text{CA (\%)} = \frac{\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ extracción anual en tratamiento } N_2 - \text{kg}\cdot\text{ha}^{-1} \text{ extracción anual en tratamiento } N_0}{\text{Dosis de nutriente anual, kg}\cdot\text{ha}^{-1}} * 100$$

$N_0$ : Tratamiento sin fertilizante – N.

$N_2$ : Tratamiento con fertilizante N.

#### **3.2.3.4. Análisis foliar**

Se siguió una dinámica de los contenidos foliares de N en los cafetos. Se tomaron muestras del cuarto par de ramas fructíferas de la parte central de las plantas según la metodología propuesta por Carvajal (1969). Cada muestra correspondiente a las parcelas experimentales estuvo compuesta por 32 pares de hojas, tomándose cuatro pares de hojas por planta de cálculo (Rivera, 1988).

Durante el primer ciclo productivo de los años 2000 y 2001, los muestreos se realizaron en los meses de marzo (ciclo fenológico floración), junio (inicio fructificación), septiembre (crecimiento del grano) y diciembre (maduración), en todos los tratamientos. En el segundo ciclo productivo los muestreos se realizaron en los meses abril (floración), junio, agosto (crecimiento del grano), octubre (crecimiento del grano) y diciembre, desde el año 2003 al 2006. En este caso, se realizaron en las parcelas correspondientes a los tratamientos testigo ( $N_0$ ) y al sistema de fertilización  $N_2$ .

Las hojas correspondientes a cada muestra fueron lavadas, secadas en estufa a  $70\text{ }^\circ\text{C}$  y se les determinó la masa seca y contenido de nitrógeno por el método descrito en el experimento 1, acápite 3.2.1.

Análisis estadístico: Se establecieron regresiones entre los porcentajes de N de cada uno de los tratamientos en cada fecha de muestreo y los porcentajes de rendimiento máximo obtenido por cada tratamiento y en los diferentes años de trabajo. Se utilizaron diferentes modelos matemáticos, seleccionándose el de mayor coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para la obtención del momento de muestreo más adecuado y el estado nutricional asociado al

porcentaje de N foliar. A partir de estos resultados se elaboró la propuesta de inclusión del análisis foliar para la corrección de la fertilización nitrogenada.

### 3.3. Atenciones culturales al cafeto

Las atenciones culturales se realizaron según las indicaciones del Instructivo Técnico de Café y Cacao (MINAG, 1987). El índice de incidencia de la broca (*Hypothenemus hampei* Ferr) se mantuvo en los umbrales económicos mediante la realización de saneamientos en los meses de enero, febrero y diciembre de todos los años.

### 3.4. Análisis económico

Para la realización de la evaluación económica se utilizó la carta tecnológica propuesta a la Vicepresidencia de Café y Cacao del GEAM (MINAG, 2009). Se evaluaron los siguientes indicadores (Trujillo y col., 2007):

- Valor de la producción ( $\$. \text{ha}^{-1}$ ): rendimiento del cultivo multiplicado por el precio de venta de una tonelada de café oro acopiado.
- Costo total de producción por hectárea ( $\$. \text{ha}^{-1}$ ): sumatoria de los gastos incurridos por la aplicación de los fertilizantes más el costo del resto de las labores.
- Ganancia ( $\$. \text{ha}^{-1}$ ): diferencia entre el valor de la producción y los costos de producción.
- Beneficio Económico ( $\$. \text{ha}^{-1}$ ): diferencia entre la ganancia del tratamiento analizado y la del tratamiento testigo sin fertilizante.
- Costo relativo del tratamiento ( $\$. \text{ha}^{-1}$ ): diferencia entre los costos del tratamiento analizado y los del tratamiento testigo sin fertilizante.
- Relación B/C: cociente obtenido de dividir el beneficio económico entre el costo relativo. Valores de la relación B/C mayores a 1 indican el aporte de ganancia y un valor de 2 la obtención de un beneficio del 100 %. Valores de 3 o superiores corresponden a ganancias muy notables. Para el cálculo de estos indicadores, se utilizó como información lo referido en la Tabla 4.

**Tabla 4. Algunos indicadores para el análisis económico.**

Insumo	UM	Valor	Referencia
Precio urea	$\$. \text{kg}^{-1}$	1,09	IIFT (2011)
Precio de café	$\$. \text{t}^{-1}$ . café oro	15 810	Res.14/2010 (MFP, 2010)
Costo de aplicación de fertilizante	$\$. \text{t}^{-1}$ fertilizante	89,30	MINAG (2009)
Costo de cosecha	$\$. \text{t}^{-1}$ café acopiado	1 636,24	MINAG (2009)

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1. Experimento 1. Crecimiento aéreo y radical, la producción de fitomasa y extracción de nitrógeno de *Coffea canephora* cultivado sobre suelos Pardos

###### 4.1.1. Crecimiento aéreo de *Coffea canephora*

El café *canephora* presentó indicadores similares en los dos sitios experimentales en cada año, con valores acumulativos crecientes con el tiempo y un crecimiento mayor entre el segundo y tercer año. En el cuarto año el diámetro de la copa alcanzó valores entre 200 a 215 cm, y la altura estuvo entre 280 a 290 cm (Tabla 5).

Similares resultados obtuvieron Cabrera y col. (1998) en 13 clones de *C. canephora* en la localidad de Tercer Frente, provincia Santiago de Cuba, con valores promedios de las plantaciones, alturas en el orden de 197 a 260 cm y diámetro de la copa entre 198 – 210 cm.

**Tabla 5. Algunas variables del crecimiento de *Coffea canephora* var. Robusta cultivada sobre suelos Pardos durante los cuatro primeros años de la plantación. 1996 – 1999.**

Indicadores	1996	1997	1998	1999
	<b>Tercer Frente</b>			
Altura (cm)	61,70 (± 3,66)	120,10 (± 10,31)	231,40 (± 11,05)	280,15 (± 11,51)
Ø copa (cm)	54,10 (± 10,07)	110,70 (± 8,05)	187,20 (± 11,39)	215,40 (± 7,13)
Altura/Ø copa	1,14 (± 0,67)	1,16 (± 1,24)	1,24 (± 2,31)	1,32 (± 3,28)
Nrp*	30,00 (± 7,08)	46,00 (± 6,30)	70,00 (± 7,40)	56,00 (± 6,50)
<b>La Alcarraza</b>				
Altura (cm)	62,10 (± 5,16)	130,40 (± 11,32)	245,20 (± 10,01)	295,68 (± 10,73)
Ø copa (cm)	53,10 (± 9,33)	108,30 (± 7,26)	190,10 (± 10,06)	210,40 (± 8,09)
Altura/Ø copa	1,16 (± 0,58)	1,20 (± 2,16)	1,28 (± 4,17)	1,40 (± 3,40)
Nrp*	38,00 (± 5,11)	50,00 (± 8,10)	78,00 (± 6,46)	62,00 (± 5,44)

\*Nrp: número de ramas primarias totales por año. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias. Ø diámetro de la copa.

La emisión de ramas primarias se incrementó hasta el tercer año en ambas localidades, y disminuyó en el cuarto año (Tabla 5). El comportamiento de esta variable fue mayor en la plantación del sitio La Alcarraza, sin embargo, los valores encontrados en ambas localidades fueron superiores a los reportados por Ortiz (1993) y Cabrera y col. (1998) en *Coffea canephora* var. Robusta, cultivadas en suelos Ferralítico Rojo compactado y

Pardo ócrico sin carbonatos, las que produjeron, de forma acumulada, entre 50 a 58 ramas primarias hasta el cuarto año.

Al respecto, Carvalho y col. (2010) plantearon que incrementos en el número de las ramas primarias; de nudos, flores y frutos por ramas, se asocian con un buen desarrollo del cultivo del café en la zona donde esté establecido.

Durante el segundo ciclo productivo, los valores de altura y diámetro de la copa para el primer y segundo año después de la poda fueron superiores a lo alcanzado en igual período de tiempo en la fase de establecimiento. Sin embargo, a partir del tercer año, estos indicadores se comportaron muy similares en el tercer y cuarto año después de la plantación (Tabla 6).

**Tabla 6. Algunas variables de crecimiento de *Coffea canephora* var. Robusta cultivada sobre suelos Pardos durante los cuatros primeros años después de la poda. 2002 – 2005.**

Indicadores	2002	2003	2004	2005
	<b>Tercer Frente</b>			
Altura (cm)	122,10 (± 8,03)	162,42 (± 10,07)	230,45 (± 11,31)	285,25 (± 11,40)
Ø copa (cm)	110,20 (± 11,23)	140,90 (± 10,39)	180,30 (± 9,14)	205,15 (± 7,03)
Altura/Ø copa	1,10 (± 0,28)	1,15 (± 1,20)	1,27 (± 3,10)	1,39 (± 2,22)
Nrp*	40,00 (± 7,43)	50,00 (± 5,21)	74,00 (± 4,09)	62,00 (± 2,39)
<b>La Alcarraza</b>				
Altura (cm)	148,70 (± 12,46)	178,27 (± 11,15)	227,33 (± 12,13)	290,40 (± 12,58)
Ø copa (cm)	139,82 (± 9,19)	158,80 (± 18,17)	183,30 (± 9,37)	218,15 (± 9,19)
Altura/Ø copa	1,06 (± 0,26)	1,12 (± 0,12)	1,24 (± 1,42)	1,33 (± 0,26)
Nrp*	44,00 (± 7,08)	54,00 (± 9,11)	82,00 (± 6,26)	68,00 (± 4,34)

\*Nrp: número de ramas primarias/plantón por año. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias.

La producción de ramas primarias se incrementó en el segundo ciclo, con una disminución a partir del cuarto año, tal y como ocurrió en el primer ciclo productivo. Sin embargo, fueron superiores a los obtenidos por Blanco (2005) en *Coffea canephora* cultivado a baja altura sobre un suelo Pardo en el macizo Nipe – Sagua – Baracoa, donde se encontró que esta especie produjo hasta 64 ramas primarias, pero lo hizo al cuarto año después de la poda.

La disminución del número de ramas primarias, a medida que aumentó la edad de la plantación, estuvo relacionada probablemente al agotamiento de la planta por un

incremento de las cosechas, así como por el debilitamiento de las ramas inferiores producto a la poca entrada de luz en dicha zona de la planta.

La relación altura/diámetro de la copa durante los primeros años en ambos ciclos productivos fue superior a uno, con valores que oscilaron entre 1,10 a 1,20; indicativos de un crecimiento adecuado del cafeto, según informa Rivera y col. (1994). Con posterioridad, esta relación aumentó en cada localidad y en los dos ciclos productivos y osciló entre 1,24 – 1,40 en la fase de producción, conducta que indica que en el cafeto están ocurriendo caída de las ramas, pérdida de hojas y probablemente un desequilibrio entre el área foliar y la cosecha, lo que confirma los resultados obtenidos por Rivera (1988), que las elevadas cosechas afectan con más intensidad la longitud de las ramas fructíferas que la altura de la planta.

Si bien es cierto que las variables altura, diámetro de la copa y emisión de ramas primarias pueden reflejar diferencias entre plantaciones de cafeto; se hace necesario utilizar además para evaluar la eficiencia, otras variables no evaluadas anteriormente para esta especie, como son, la producción de fitomasa aérea y radical, la extracción de nitrógeno por los diferentes órganos o compartimientos de la planta y el crecimiento radical.

#### **4.1.2. Producción de fitomasa y extracción de N por el cafeto *C. canephora***

##### **4.1.2.1. Producción de fitomasa total**

En el establecimiento de las plantaciones, la producción de fitomasa total en el primer año estuvo entre 5,4 – 6,0 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca y se incrementó de forma acumulada a 10 t.ha<sup>-1</sup> en el segundo año (Tabla 7). En la etapa productiva, la fitomasa total acumulada se incrementó por año y alcanzó al quinto año entre 27 - 29 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca. En relación con esto, Soto (2006) informó que la producción de biomasa por una planta constituye una variable importante para caracterizar su productividad, pues refleja el rendimiento biológico del vegetal.

La mayor contribución de fitomasa la realizó el sistema aéreo respecto al sistema radical. Al quinto año, la producción de fitomasa aérea acumulada en *C. canephora* representó entre el 79 y el 80 % de la fitomasa total; mientras que la contribución del sistema radical osciló entre 19 – 20 %. En investigaciones realizadas en Brasil con dos

genotipos de *C. canephora*, esta especie fue capaz de producir el 77,39 % de masa seca en la parte aérea y el 22,61 % en la radical (Mattiello y col., 2008).

**Tabla 7. Producción acumulativa de fitomasa seca (t.ha<sup>-1</sup>) de plantaciones de *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos durante los cinco primeros años de la plantación.**

Fitomasa	1996	1997	1998	1999	2000
	<b>Tercer Frente</b>				
<b>Hojas</b>	1,25 (± 0,18)	2,25 (± 0,37)	3,90 (±1,18)	3,80 (± 1,25)	3,70 (± 1,52)
<b>CH acumulada</b>	-	0,35	1,58	3,2	4,75
<b>Ramas</b>	1,61 (± 0,22)	1,94 (± 0,17)	3,60 (± 1,33)	3,49 (± 1,16)	3,38 (± 1,28)
<b>Tallos</b>	1,84 (± 1,38)	2,43 (± 1,25)	3,50 (± 1,27)	4,91 (± 1,37)	4,80 (± 1,10)
<b>Frutos</b>	-	0,71 (± 0,16)	1,60 (± 0,66)	1,70 (± 0,68)	1,60 (± 0,35)
<b>Frutos acumulados</b>	-	0,71	2,31	4,11	5,91
<b>Sistema aéreo</b>	4,70	8,84	14,89	19,51	22,54
<b>Sistema radical</b>	1,37 (± 0,44)	1,47 (± 0,43)	3,54 (± 1,21)	4,75 (± 0,82)	5,70 (± 0,29)
<b>Fitomasa total</b>	<b>6,07</b>	<b>10,31</b>	<b>18,43</b>	<b>24,31</b>	<b>27,24</b>
<b>La Alcarraza</b>					
<b>Hojas</b>	1,20 (± 0,64)	2,72 (± 1,20)	3,80 (± 1,62)	3,68 (± 1,73)	3,60 (± 1,63)
<b>CH acumulada</b>	-	0,36	1,72	3,47	5,12
<b>Ramas</b>	1,24 (± 0,55)	2,65 (± 1,03)	3,50 (± 1,11)	3,38 (± 1,59)	3,30 (± 1,24)
<b>Tallos</b>	1,73 (± 1,48)	2,43 (± 1,12)	4,30 (± 1,20)	4,85 (± 1,16)	4,90 (± 1,61)
<b>Frutos</b>	-	0,60 (± 0,29)	1,95 (± 0,14)	2,16 (± 0,26)	1,90 (± 0,35)
<b>Frutos acumulados</b>	-	0,6	2,55	4,71	6,61
<b>Sistema aéreo</b>	4,17	9,12	15,87	20,09	23,51
<b>Sistema radical</b>	1,26 (± 0,96)	1,43 (± 0,26)	4,10 (± 2,23)	5,35 (± 1,63)	5,80 (± 1,65)
<b>Fitomasa total</b>	<b>5,43</b>	<b>10,55</b>	<b>19,97</b>	<b>25,44</b>	<b>29,31</b>

C.H.: Caída de hojas. Densidad de plantación 2222 plantas.ha<sup>-1</sup>. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias.

La masa seca anual se incrementó en el segundo año con valores de 4,24 t.ha<sup>-1</sup> en Tercer Frente y 5,12 t.ha<sup>-1</sup> en La Alcarraza. En el tercer año, el incremento alcanzó las 8 t.ha<sup>-1</sup> en Tercer Frente y llegó a 9 t.ha<sup>-1</sup> en La Alcarraza. Sin embargo, a partir del cuarto año se encontraron disminuciones de masa seca anual respecto al tercer año y en correspondencia con la disminución del número de ramas primarias y asociado además con el hecho de encontrarse tres años consecutivos con cosechas relativamente altas.

La participación de los frutos como reservorio de la fitomasa aérea anual reflejó incrementos en la medida que el café entró en la etapa de cosecha. En el segundo año, representó del 11 – 16 % de la masa seca anual producida por las plantaciones. Al tercer año la contribución de los frutos estuvo en el 20 % en ambas plantaciones, mientras que

al cuarto año representó el 27 % en el sitio Tercer Frente y alcanzó el 39 % en La Alcarraza; no obstante, de forma general en este primer ciclo el indicador producción/fitomasa total presentó valores promedios en los años de cosecha entre 22 y 25 % con valores ligeramente superiores en la localidad de La Alcarraza.

De manera general, este indicador (producción/fitomasa) reflejó una mayor eficiencia del caféto *canephora* en la localidad de La Alcarraza respecto a Tercer Frente, y lo sitúa en condiciones más favorables para el desarrollo de la especie.

Estos resultados fueron similares a los obtenidos en Kenya, donde se reportó que el caféto puede destinar anualmente para la formación de los frutos hasta un 36 % de la masa seca (Cannell, 1970). De igual forma, en Costa Rica se ubicó la participación de los frutos en *C. arabica* en el orden del 25 – 30 % del peso seco total de la planta (Chávez y Molina, 2005).

Las relaciones de masa seca del sistema vegetativo / sistema radical oscilaron entre tres y cuatro, si bien caen dentro del rango planteado por Muller (1966) para *C. arabica*, son indicativas de un alto desarrollo del sistema radical en *C. canephora*, ya que dicho autor consideró relaciones de tres las correspondientes a valores altos del sistema radical y de cuatro como típicas para el caféto.

Las ramas representaron al cuarto año entre el 13 y 14 % de la fitomasa total de las plantaciones y los tallos del 17 al 18 %. La contribución de las hojas (incluyendo las hojas caídas) representó entre el 24 y 25 % de la producción total de la fitomasa.

La producción total de fitomasa de la plantación situada en La Alcarraza al año después de la poda fue superior a lo alcanzado en igual período del ciclo anterior. A partir del segundo año, la producción de fitomasa anual se incrementó de forma similar al primer ciclo, y alcanzó 23 t.ha<sup>-1</sup> de fitomasa total acumulada en el tercer año. Al cuarto año, la fitomasa aumentó en 4 t.ha<sup>-1</sup> y alcanzó las 27 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca (Tabla 8).

La contribución de los frutos a la fitomasa anual de la plantación en el tercer año del segundo ciclo fue similar al primer ciclo, con un 21 %; sin embargo, en el cuarto año se incrementó y alcanzó el 45 % de la fitomasa anual de las plantaciones. Este hecho reafirma que las plantaciones de *canephora* situadas en las condiciones de La Alcarraza producen eficientemente bajo estas condiciones.

Las ramas representaron entre el 11 – 13 % de la fitomasa; mientras que los tallos contribuyeron del 21 – 23 % de la masa seca total acumulada. Las hojas, incluyendo las hojas caídas, fueron responsables del 28 – 34 % de la producción de fitomasa de la plantación de *C. canephora*.

Los acumulados de fitomasa en el segundo ciclo en La Alcarraza fueron similares a los obtenidos en el primero, lo cual indica que los ciclos manejados de igual forma presentaron indicadores de crecimiento, rendimientos y eficiencia similares.

**Tabla 8. Producción acumulativa de fitomasa seca (t.ha<sup>-1</sup>) de plantaciones de *Coffea canephora* durante cuatro años después de la poda. Sitio La Alcarraza.**

Fitomasa	2002	2003	2004	2005
Hojas	1,38 (± 0,49)	2,22 (± 0,24)	3,00 (± 0,33)	3,24 (± 1,14)
Caída de hojas acumulada	0,24	1,56	3,09	4,69
Ramas	1,13 (± 0,24)	2,02 (± 1,45)	2,95 (± 1,24)	2,80 (± 1,04)
Tallos	1,68 (± 1,10)	3,08 (± 1,25)	5,41 (± 2,72)	5,76 (± 1,18)
Frutos	-	1,62 (± 0,61)	1,93 (± 0,93)	1,86 (± 0,59)
Frutos acumulados	-	1,62	3,55	5,41
Fitomasa total aérea	4,43	10,5	18,00	21,9
Sistema radical	3,17 (± 1,38)	3,65 (± 1,93)	5,03 (± 1,61)	5,20 (± 1,11)
<b>Fitomasa total</b>	<b>7,60</b>	<b>14,15</b>	<b>23,03</b>	<b>27,10</b>

C.H.: Caída de hojas. Densidad de plantación 2222 plantas.ha<sup>-1</sup>. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias.

La producción anual de masa seca en el primer y segundo año fue superior al primer ciclo y estuvo en el orden de las 6,8 t.ha<sup>-1</sup>; mientras que en el tercer año el incremento fue de 9 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca, similar a lo alcanzado en igual período de tiempo en el primer ciclo.

El análisis del crecimiento ha demostrado ser importante en estudios de producción de materia seca en plantas cultivadas bajo diferentes prácticas agronómicas (fertilización, riego, entre otras) o sometidas a diferentes condiciones ambientales (Riaño y col., 2004). En investigaciones realizadas en Brasil, se encontró que la especie *canephora* es muy eficiente en la producción de masa seca, debido a que posee una alta absorción y transferencia de energía luminosa, mayor área foliar para captar la luz, con una alta tasa fotosintética, de transpiración y conductancia estomática (Marques de Carvalho y col., 2001).

La producción de fitomasa total de ambas plantaciones se incluyeron dentro del rango propuesto por Menéndez y col. (1988) en su caracterización de los bosques siempre

verdes de la Sierra del Rosario en Pinar del Río, los cuales oscilaron entre 1,86 – 9,64 t. ha<sup>-1</sup> de masa seca y corroboró lo referido por Rivera (2006), que el café no sólo es un cultivo de importancia económica sino que aprovecha adecuadamente las potencialidades del agroecosistema.

De manera general, la producción de fitomasa se incrementó en la medida que el café se encontraba en etapa productiva. El sistema aéreo contribuyó con mayor fitomasa respecto al radical, pero ambos presentaron un comportamiento diferenciado durante los dos ciclos, entre la etapa inicial de la plantación y la posterior etapa productiva. En el sistema aéreo, los frutos contribuyeron con la mayor producción de fitomasa y le siguieron en importancia las hojas, tallos y ramas.

Estos resultados permiten al menos valorar que la especie *canephora* presentó un ritmo acelerado del crecimiento de la altura, el diámetro de la copa y la producción de masa seca anual hasta su tercer año en ambos ciclos, disminuyendo a partir del cuarto año.

#### **4.1.2.2. Extracción de nitrógeno**

Al evaluar el comportamiento durante el primer ciclo productivo, las extracciones de nitrógeno en el primer año estuvieron en el orden de 56 – 64 kg.ha<sup>-1</sup> de N para La Alcarraza y Tercer Frente, respectivamente (Tabla 9).

Los requerimientos se incrementaron fuertemente en la etapa de producción, en la cual se obtienen además los mayores índices de crecimiento y rendimientos. Las extracciones de nitrógeno en ambos sitios se comportaron de forma similar y se incrementaron hasta el tercer año y con valores de 56,9 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en el primer año, 86 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en el segundo y 126 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en el tercero para el sitio de Tercer Frente; mientras que en la localidad de La Alcarraza fueron de 64,4; 83,1 y 130 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>, respectivamente.

Las extracciones anuales de nitrógeno a partir del cuarto año disminuyeron en ambos sitios y alcanzaron valores entre 122 y 127 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. En el quinto año, las extracciones anuales estuvieron en el orden de 68 y 75 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Estas disminuciones se correspondieron con el comportamiento de la dinámica de otras variables del crecimiento discutidas en los tópicos anteriores.

El café *canephora* exporta anualmente por cosecha importantes cantidades de N, lo cual estuvo en correspondencia con la magnitud de las producciones y la localidad. Así

en el segundo año representó del 20 – 22 %, en el tercer año estuvo entre 21,3 – 24 %, al cuarto año del 32,5 – 39,1 % y se incrementó en el quinto año entre 52 – 64 %. Los mayores valores se encontraron en el sitio La Alcarraza.

**Tabla 9. Extracción acumulativa de N (kg.ha<sup>-1</sup>) de plantaciones de *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos durante los cinco primeros años de la plantación.**

Órganos	1996	1997	1998	1999	2000
	<b>Tercer Frente</b>				
<b>Hojas</b>	36,1 (± 10,18)	55,1 (± 9,11)	62,7 (± 11,19)	69,5 (± 9,48)	66,4 (± 21,25)
<b>C H acumulada</b>	-	6,1	46,6	92,9	133,15
<b>Ramas</b>	9,8 (± 5,32)	24,5 (± 8,18)	43,06 (± 4,43)	39,1 (± 6,45)	38,1 (± 9,31)
<b>Tallos</b>	11,4 (± 2,27)	18,5 (± 4,24)	49,13 (± 11,33)	52,3 (± 3,24)	50,15 (± 2,19)
<b>Cosecha (C)</b>	-	17,4 (± 7,23)	27,3 (± 6,41)	39,8 (± 9,34)	35,6 (± 8,14)
<b>C. acumulada</b>	-	17,4	44,7	84,5	120,1
<b>Sistema aéreo</b>	47,3	121,6	246,19	338,3	408,95
<b>Sistema radical</b>	8,6 (± 3,22)	20,4 (± 6,38)	24,1 (± 9,20)	54,29 (± 10,19)	52,15 (± 12,36)
<b>Total</b>	<b>55,9</b>	<b>142</b>	<b>270,3</b>	<b>392,6</b>	<b>461,1</b>
<b>La Alcarraza</b>					
<b>Hojas</b>	31,45 (± 11,44)	52,97 (± 10,11)	60,6 (± 12,36)	65,4 (± 10,33)	62,1 (± 11,22)
<b>C H acumulada</b>	-	6,25	51,35	99,65	139,8
<b>Ramas</b>	13,83 (± 5,23)	21,04 (± 4,14)	48,1 (± 9,34)	40,15 (± 11,32)	38,15 (± 10,21)
<b>Tallos</b>	13,4 (± 4,46)	19,1 (± 3,28)	41,24 (± 11,11)	48,25 (± 7,41)	48,5 (± 10,17)
<b>Cosecha (C)</b>	-	18,1 (± 2,15)	31,67 (± 9,26)	50,15 (± 10,15)	48,2 (± 12,48)
<b>C. acumulada</b>	-	18,1	50,77	99,92	148,12
<b>Sistema aéreo</b>	58,68	126,74	252,06	353,37	436,67
<b>Sistema radical</b>	5,72 (± 1,20)	20,76 (± 3,43)	25,44 (± 5,39)	51,2 (± 8,43)	53,3 (± 8,15)
<b>Total</b>	<b>64,4</b>	<b>146,5</b>	<b>277,5</b>	<b>404,6</b>	<b>489,9</b>

C.H.: Caída de hojas. Densidad de plantación 2222 plantas.ha<sup>-1</sup>. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias.

Esta situación coincide con la conducta reportada por Matiello y col. (1987) en Brasil, de forma tal que en la medida que las producciones anuales sean mayores, se incrementan los porcentajes del elemento absorbido que el cafeto destina la exportación en un 45 %. También Harmand y col. (2007) en Costa Rica, sitúan la exportación de N en plantas de *Coffea arabica* por encima del 28 %.

El nitrógeno se encontró fundamentalmente en el sistema aéreo y al finalizar el primer ciclo productivo entre el 84 al 89 % del nitrógeno total extraído se detectó en el sistema aéreo y del 11 al 16 % en el sistema radical (Tabla 9). Similares resultados obtuvieron

Fenilli y col. (2007) en plantaciones de *C. arabica* en Brasil, donde el sistema aéreo extrajo el 71 % y el radical el 29 % del N de la planta.

Las hojas caídas de *C. canephora*, reincorporaron al suelo por este concepto entre 16 – 20 % del nitrógeno absorbido, lo cual representó entre 79 – 98 kg.ha<sup>-1</sup>, que pueden en principio ser absorbidos por la planta, dependiendo de las transformaciones específicas a las que esté sometido el elemento en el suelo.

Es importante destacar que la especie *canephora* utilizó para el crecimiento radicular entre 51 y 74 kg de N.

En el segundo ciclo productivo, en La Alcarraza se mantuvo el mismo criterio relacionado con la diferenciación entre la fase de crecimiento y la producción, es decir, en la medida que el cafeto incrementó sus cosechas, la extracción de N aumentó y llegó al cuarto año de podado, en forma acumulativa, a 456 kg.ha<sup>-1</sup> (Tabla 10).

**Tabla 10. Extracción de nitrógeno (kg.ha<sup>-1</sup>) de plantaciones de *Coffea canephora* cultivadas sobre suelos Pardos durante cuatro años después de la poda. Sitio La Alcarraza.**

Fitomasa	2002	2003	2004	2005
Hojas	28,40 (± 9,19)	62,70 (± 13,21)	94,20 (± 10,46)	80,20 (± 13,11)
Caída de hojas	6,00 (± 1,23)	26,90 (± 2,13)	30,10 (± 7,36)	32,70 (± 6,27)
Caída hojas acumulada	6,00	32,90	63,00	95,70
Ramas	5,30 (± 1,21)	29,90 (± 4,27)	43,40 (± 8,21)	35,10 (± 7,32)
Tallos	9,40 (± 2,28)	40,70 (± 10,17)	59,10 (± 8,13)	50,20 (± 6,28)
Cosecha	10,10 (± 3,15)	21,00 (± 3,31)	47,40 (± 5,21)	48,20 (± 9,14)
Cosechas acumuladas	10,10	31,00	78,40	126,40
Total parte aérea	52,27	197,20	338,10	387,60
Sistema radical	40,40 (± 10,34)	48,40 (± 12,28)	63,80 (± 11,45)	64,00 (± 10,43)
<b>Total</b>	<b>92,67</b>	<b>245,60</b>	<b>401,90</b>	<b>451,60</b>

C.H.: Caída de hojas. Densidad de plantación 2222 plantas.ha<sup>-1</sup>. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias.

En relación con esto, Matiello (2006) opinó que los criterios utilizados para establecer la fertilización para el cafeto adulto están relacionados con la retirada o extracción de nutrientes por las plantas, la exportación por la cosecha, las pérdidas de fertilizantes, la disponibilidad de los nutrientes en el suelo y la condición de la plantación (edad, variedad, potencial productivo, sistema de manejo, clima, entre otros).

La extracción de N que realizó el sistema vegetativo fue superior al radical, y se incrementó en la medida que el cafeto entraba en producción. Las mayores extracciones

dentro del sistema aéreo, lo representaron las hojas (17 – 18 %), seguido los tallos (10 %) y luego las ramas (8 – 9 %).

De igual forma, se encontró en el segundo ciclo en La Alcarraza, incrementos de las extracciones anuales de N hasta el tercer año, pero de magnitud superior al primer ciclo, así en el primer año fue de 92,6 kg.ha<sup>-1</sup>, en el segundo alcanzó 153 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y llegó a 156 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en su tercer año. Las menores extracciones anuales fueron a partir del cuarto año, cuantificada después de la tercera cosecha, la cual conllevó a una defoliación de las plantas y por consiguiente a una menor extracción en ese año.

Para la formación de la cosecha se destinaron entre el 14 y el 30,3 % del N extraído anualmente, en dependencia del volumen de producción de cada año. Por cada tonelada de café oro, se exportan entre 24 a 28 kg.ha<sup>-1</sup> de N. En Costa de Marfil, se reporta que, *C. canephora* exporta hasta 33,4 kg de N por cada tonelada de café (Snoeck, 1980).

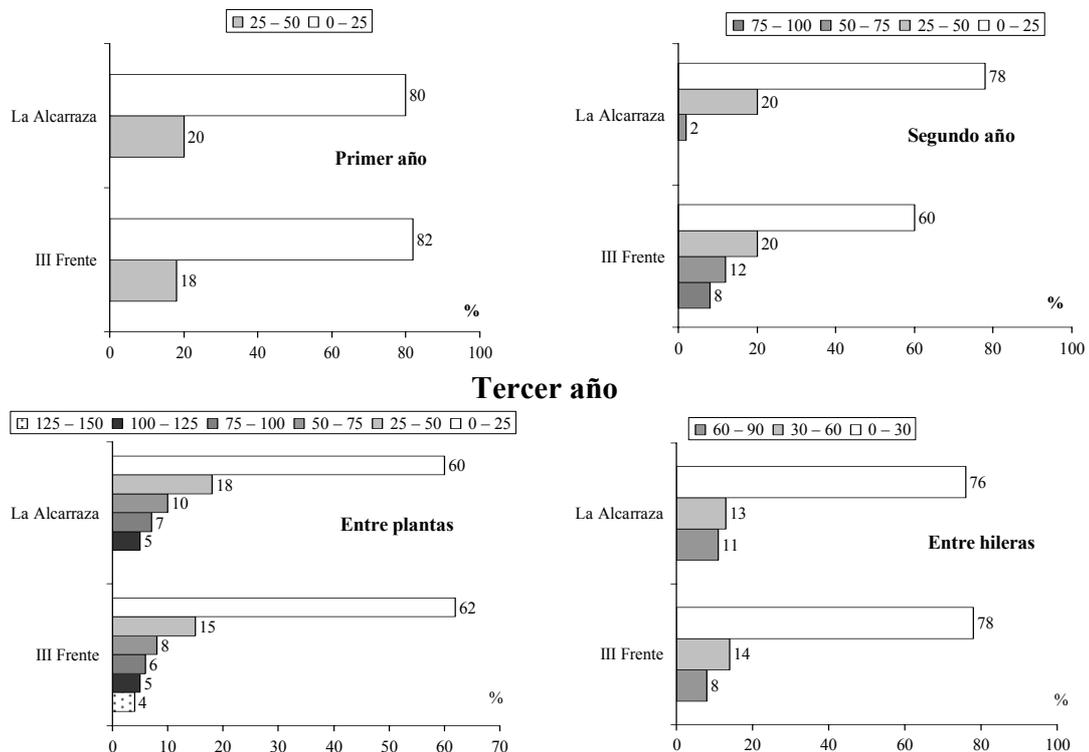
En este estudio, *C. canephora*, con independencia del ciclo productivo y localidad, extrajo altas cantidades de nitrógeno del suelo, con valores similares entre las plantaciones y osciló en el rango de 451 – 489 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N.

En el caféto, se tienen reportes de extracción realizados en *Coffea arabica* por Rivera y Sam (1983); Rivera y Mederos (1993); Rivera y col. (1994); Rodríguez y col. (1998 a) y Viñals y col. (2001), los cuales demostraron que los requerimientos nutricionales del caféto, dependen entre otros factores, de la extracción que realiza la cosecha.

#### **4.1.3. Crecimiento radical de *Coffea canephora***

Otro enfoque utilizado para evaluar el crecimiento incluyó la distribución del sistema radical, el cual se realizó durante los primeros tres años del primer ciclo productivo. No abundan en Cuba los trabajos de evaluar el sistema radical del caféto por lo difícil de la determinación en condiciones de campo, no obstante, se han realizado algunos en *Coffea arabica* (Rivera, 1988; Bustamante y col., 1989; Ochoa, 2000).

El *Coffea canephora* presentó un sistema radical profuso y profundo, y se expandió paulatinamente en el sentido de la calle. En el primer año, el 80 – 82 % del total de las raíces se encontraron en los primeros 25 cm de profundidad, mientras que el 18 – 20 % restante se encontró entre 25 – 50 cm. En el segundo año las raíces en Tercer Frente llegaron hasta el primer metro de profundidad, mientras que en La Alcarraza sólo crecieron hasta los 75 cm (Figura 2).



**Figura 2. Distribución de las raíces de *C. canephora* cultivada en suelos Pardos.**

Los valores expresan el porcentaje del total de raíces evaluadas en la distancia entre plantas. Cantidad de raíces entre hileras sólo se evaluó al tercer año. Profundidad = cm.

Al tercer año, en Tercer Frente, las raíces de *C. canephora* llegaron a los 125 – 150 cm y en La Alcarraza sólo se encontraron raíces hasta los 125 cm de profundidad. Estas características del sistema radical conllevan a que las plantas de *canephora* desde los primeros años dispongan de la capacidad para absorber no sólo los nutrientes que se encuentran en los primeros horizontes del suelo (0 – 30 cm), sino aún en las zonas más profundas.

Este tipo de crecimiento del sistema radical puede ser característico de la especie *canephora* y estar relacionado además con la fertilidad, la profundidad de los suelos, los altos contenidos de Ca intercambiable y un pH adecuado para el café en todo el perfil hasta 1,50 m de profundidad y sin la presencia de Al intercambiable en el suelo. Estos criterios coinciden con lo planteado por Rivera (2006), en una valoración integral sobre *Coffea arabica* cultivado en diferentes tipos de suelos de Cuba.

El café posee un sistema radicular con alta demanda de oxígeno, por lo que exige suelos con buena estructura física, con un mínimo de 50 cm de profundidad, buena aireación y buen drenaje interno (Chirinos, 2002).

Se encontró además un notable crecimiento de las raíces entre plantas de café. Al tercer año representaron a los 30 cm de profundidad, del 76 al 78 % del total de raíces, encontrándose además raíces hasta la profundidad de 90 cm (Figura 2).

Autores como Silva y col. (2010) han planteado que este comportamiento se debe a que *C. canephora* posee la capacidad de transportar grandes cantidades de productos fotosintéticos de la parte aérea para las raíces, lo que le permitió un mayor crecimiento radicular y de esa forma, mayor acceso a no sólo a horizontes superficiales, sino en la profundidad del suelo.

El crecimiento radicular encontrado fue superior a los obtenidos con *C. arabica* en Tercer Frente para plantaciones con altas densidades y semejantes características edafoclimáticas (Bustamante y col., 1989), lo cual puede ser otro indicador de la mejor adaptación de la especie *Coffea canephora* var. Robusta a estas condiciones.

En coincidencia, Jayarama y col. (1994) afirmaron que la actividad radical de *C. canephora* es superior a la de *C. arábica* y por lo tanto facilita una utilización más efectiva de los fertilizantes aplicados y de los nutrientes del suelo.

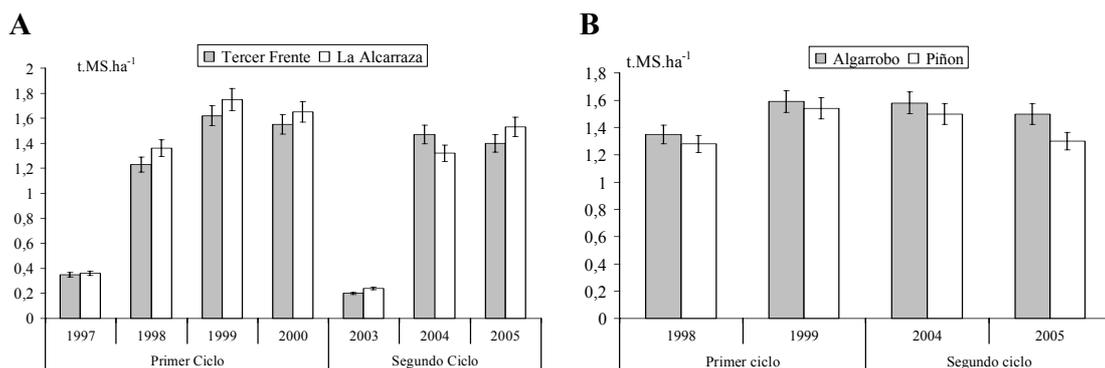
## **4.2. Experimento 2. Reciclaje de residuos componentes del agroecosistema cafetalero. Descomposición y liberación del nitrógeno**

### **4.2.1. Caída de hojas y otros componentes del café y los árboles de sombra**

Este experimento se realizó para cuantificar la participación de los diferentes componentes del agroecosistema cafetalero en la producción de biomasa, su contenido de N y la liberación de este nutriente.

En el primer año de establecimiento del café la planta se encuentra en una etapa de crecimiento vegetativo (aéreo y radical), no estando presente la formación de frutos el cual condiciona entre otros aspectos la caída de las hojas. Es por eso que, en el primer ciclo, el retorno por caída de hojas, apareció a partir del segundo año con valores de 0,30 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca, correspondiente al año del despunte (Figura 3 A).

Al pasar a la etapa propiamente productiva, la caída de hojas se incrementó en ambos sitios, y su magnitud estuvo en dependencia de la cosecha del año en cuestión; así en el tercer año, el retorno de las hojas representó del 24 – 26 % del total de las hojas de la planta, incrementándose en el cuarto año (30 – 32 % del total), correspondiente con altas cosechas del cafeto *canephora* (Figura 3 A).



**Figura 3. Aporte de biomasa (t.ha<sup>-1</sup> de masa seca) por las hojas de cafeto (A) y los árboles de sombra (B).** Barras verticales desviación estándar de las medias.

En condiciones de bajas alturas y temperaturas relativamente altas, condiciones imperantes en las zonas de estudio, ocurre un acortamiento del período de crecimiento del fruto, lo que conlleva a una mayor intensidad de la traslocación de los productos del metabolismo y nutrientes de las hojas hacia los frutos (Rivera y Sam, 1983), todo lo cual puede traer como resultado que las hojas de las ramas fructíferas se caigan antes de completarse el crecimiento del fruto y se expresará con mayor intensidad en función de la magnitud de la cosecha.

Como el cafeto después de la poda adelanta en un año la entrada en producción, se encontraron retornos iniciales de caída de hojas en el orden de 0,20 – 0,24 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca en el primer año del segundo ciclo productivo. La caída de hojas en el segundo y tercer año después de la poda fue superior a la obtenida en igual período del ciclo anterior, con valores que representaron el 33 % del total, pero siempre relacionada con las altas cosechas encontradas en los primeros años de este segundo ciclo respecto al anterior y asociadas con un mayor nivel de precipitaciones.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Jiménez y Martínez (1979) en diferentes sistemas agroforestales con *C. arabica* bajo sombra, donde se obtuvieron entre 1,19 y 1,35 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de masa seca por caída de hojas.

Los retornos por caída de las hojas de los árboles de sombra tuvieron poca variación de un año a otro respecto al café, esto se debe a que los árboles de sombra están en equilibrio y anualmente pueden esperarse, dependiendo del régimen de precipitaciones, un comportamiento homogéneo en las dos zonas, pero variando entre especies; así *Gliricidia sepium* (piñón) puede aportar como media de los años evaluados  $1,40 \text{ t.ha}^{-1}$  de masa seca por caída de hojas, mientras que *Samanea saman* (algarrobo) lo hace anualmente (media de los años evaluados) para  $1,51 \text{ t.ha}^{-1}$  de masa seca de hojas.

En los trabajos de Bustamante y col. (2007) se informa que el aporte al agroecosistema cafetalero por el algarrobo puede llegar a  $2,3 \text{ t.ha}^{-1}$  de masa seca, valores no muy diferentes de los encontrados en este estudio.

La caída de la hojarasca de la mayoría de las especies forestales es especialmente importante, pues además permite la entrada de luz al agroecosistema, necesaria para la formación de yemas florales del café. Por esta razón en Cuba, Blanco (2005) en *Coffea canephora* recomienda un sombreado del 30 %, tal y como se mantuvo en ésta investigación.

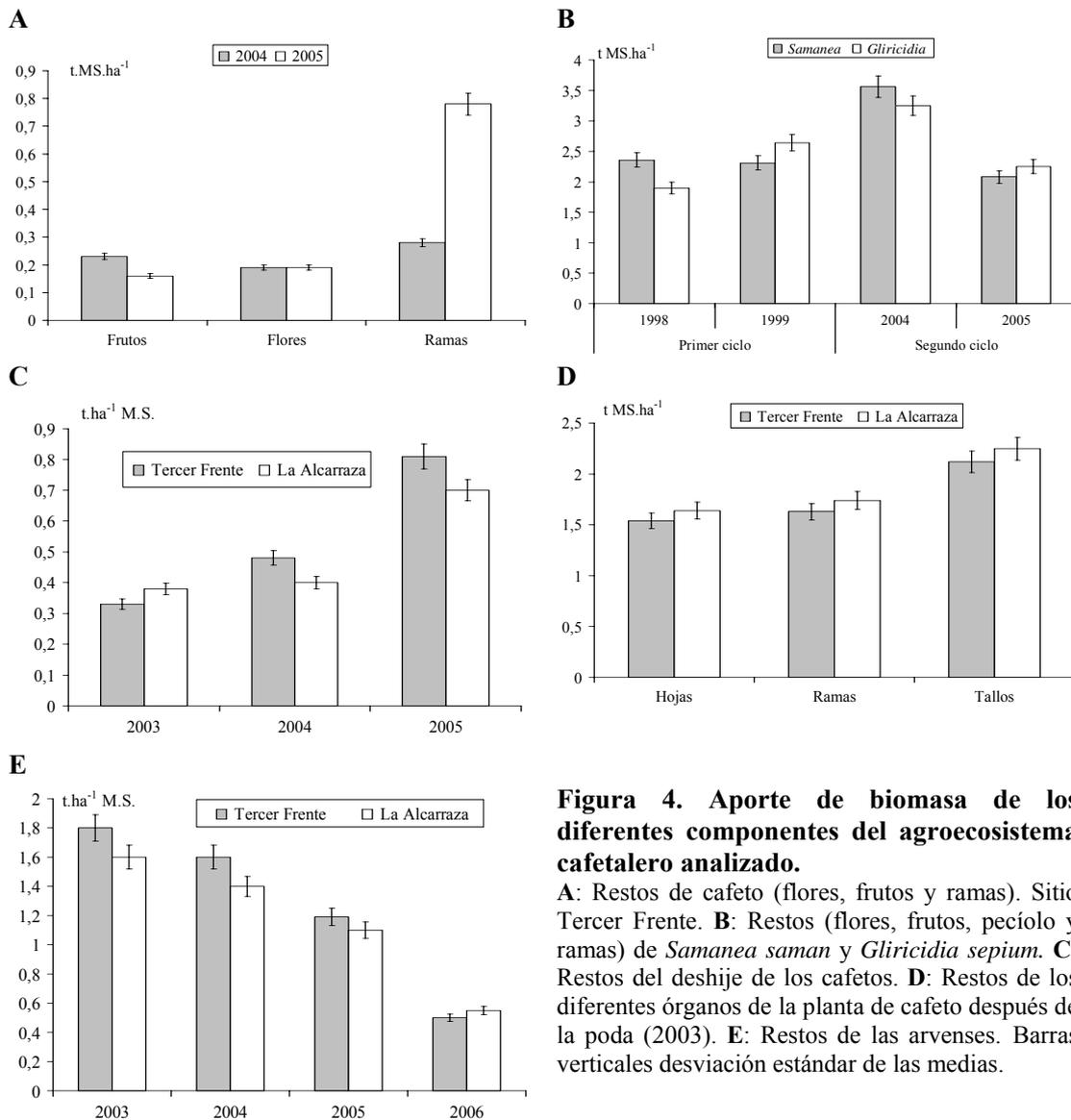
Además de la caída de las hojas del café y de los árboles de sombra, existen otros materiales u órganos que también se reciclan en el agroecosistema, como los frutos, las flores, los pecíolos, las ramas y los propios aportes derivados de las podas anuales de saneamiento y totales realizadas al café.

Se encontró que, a diferencia del café, los mayores aportes de biomasa de los árboles de sombra lo constituyen los otros restos, más que la caída de sus hojas.

El piñón aportó por otros componentes (flores, frutos, pecíolo y ramas)  $2,33 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  y el algarrobo  $2,65 \text{ t.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$  de masa seca (Figura 4 A y B). En Venezuela, Solórzano y col. (1998) encontraron en un suelo Vértico, que *Samanea saman* es una leguminosa que incrementa el contenido de materia orgánica hasta niveles de un 5 %, debido a la cantidad de restos orgánicos que caen.

En relación a esto, Paz y col. (2006) y Philpott y col. (2006) informaron que la sombra proporciona un hábitat propicio para ayudar al ciclo de nutrientes por medio del aporte de hojarasca al suelo, como vía de reciclar los elementos químicos en el mismo y a la conservación del suelo. También, en condiciones de Brasil, Gourete (2007) encontró una

gran cantidad y diversidad de material orgánico de varias especies forestales utilizadas como sombra para café.



**Figura 4. Aporte de biomasa de los diferentes componentes del agroecosistema cafetalero analizado.**

**A:** Restos de café (flores, frutos y ramas). Sitio Tercer Frente. **B:** Restos (flores, frutos, peciolo y ramas) de *Samanea saman* y *Gliricidia sepium*. **C:** Restos del deshije de los cafetos. **D:** Restos de los diferentes órganos de la planta de café después de la poda (2003). **E:** Restos de las arvenses. Barras verticales desviación estándar de las medias.

Asimismo, el cultivo intensivo del café conlleva a la utilización de un sistema de poda que permita renovar sistemáticamente la plantación y de esta forma lograr que siempre se mantenga en su etapa más productiva (Carvajal, 1984), la cual se considera que está asociada con no más de 4 o 5 cosechas por ciclo productivo.

Por concepto de la poda de los cafetos, además de las hojas, se incorporaron importantes cantidades de materiales en forma de ramas y los tallos en el año que se realizó la misma

(2003). La producción de biomasa (incluye todos los materiales) en dicho año estuvo en el rango de 5,29 a 5,63 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca (Figura 4 C), mientras que por los diferentes órganos del cafeto evaluados se retornó 0,8 – 0,92 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de masa seca en el periodo evaluado.

Los tallos y ramas provenientes de la poda, aunque son de lenta descomposición, es una cantidad que no es despreciable y que influye positivamente en el balance de los elementos y en el de la materia orgánica del suelo (Rivera y Mederos, 1993).

Otro de los componentes que contribuyen al aporte de biomasa en el agroecosistema cafetalero, lo constituyó el deshije. La contribución por el retorno de esta práctica dentro del manejo del cafeto *canephora* se incrementó por año (Figura 4 D).

Esta es una medida muy necesaria en la especie, por la formación de numerosos tallos ortotrópicos, con una abundante producción de hijos. Es por eso que, en la tecnología para el manejo de la poda quinquenal en *Coffea canephora* en Cuba, se propone realizar de 3 a 5 deshijes al año, para mantener el número de vástagos seleccionados siempre fijo (Díaz y col., 2007).

Por lo que, con la realización de al menos tres deshijes por año se pueden incorporar de 0,30 a 0,8 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca. El promedio de los años evaluados permitió un retorno de 0,49 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de masa seca por este concepto en el sitio La Alcarraza y de 0,54 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en Tercer Frente.

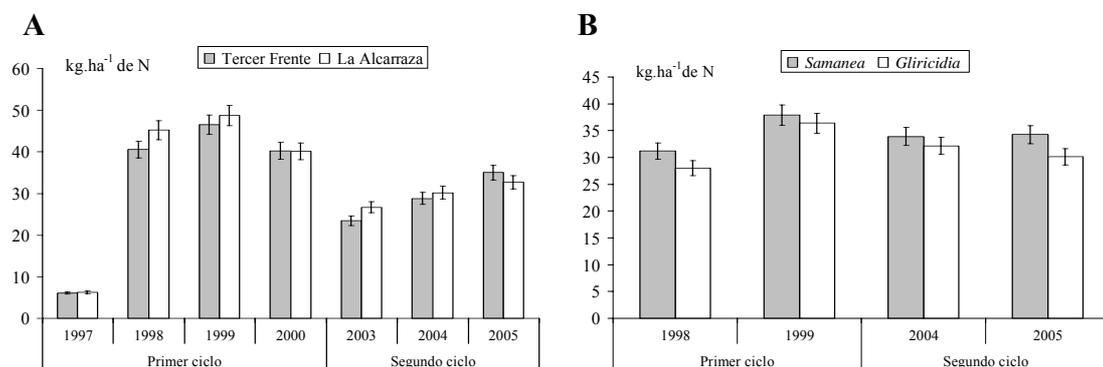
La fitomasa producida por las arvenses dependerá, entre otros factores, del manejo de la sombra y del desarrollo del cafeto dentro del área. Así, la realización de cuatro limpiezas anuales de las arvenses (en las condiciones experimentales se encontraron 16 especies, Anexo 5) y el mantenimiento de un 30 % de la sombra en el *canephora* (Díaz y col., 2003; Blanco, 2005), retornó en el año de la poda (2003) valores de 1,70 – 1,80 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca, pero disminuyó en el tiempo como consecuencia del propio desarrollo del cafeto que tiende a cerrar la calle y en unión con los árboles de sombra, provocan un auto sombreado y limitan el crecimiento de las mismas.

Los retornos realizados el resto de los años fueron de 1,4 a 1,6 t.ha<sup>-1</sup> en el 2004 y de 1,10 a 1,19 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca en el 2005 (Figura 4 E), mientras que en el 2006 se redujo a 0,50 t.ha<sup>-1</sup> de masa seca. Como media del periodo de investigación, el retorno por las arvenses estuvo entre 1,16 – 1,27 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> en todo el ciclo productivo evaluado.

Estos resultados fueron similares a lo alcanzado por Quintero y Ataroff (1998) en Venezuela con aportes de biomasa por el deshierbe de  $1,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de masa seca. La incorporación de los restos de las arvenses dentro del agroecosistema cafetalero constituye una fuente importante de restos orgánicos que se incorporan al suelo y pasan a formar parte de la materia orgánica del mismo.

#### 4.2.2. Reciclaje de N de las hojas y otros componentes del café y los árboles de sombra

Las hojas del café retornaron importantes cantidades de N al suelo, desde  $6,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  en el segundo año de establecimiento del café (año de menor caída de hojas),  $40 - 45 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  en el tercer año y  $46 - 48 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de N en el cuarto año (Figura 5 A). En el segundo ciclo, los retornos de N comenzaron desde el primer año y llegaron en el tercer año a  $35 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Como media, los retornos anuales de N por la caída de las hojas del café *canephora* durante los años evaluados fueron del orden de los  $38,23 - 39,29 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

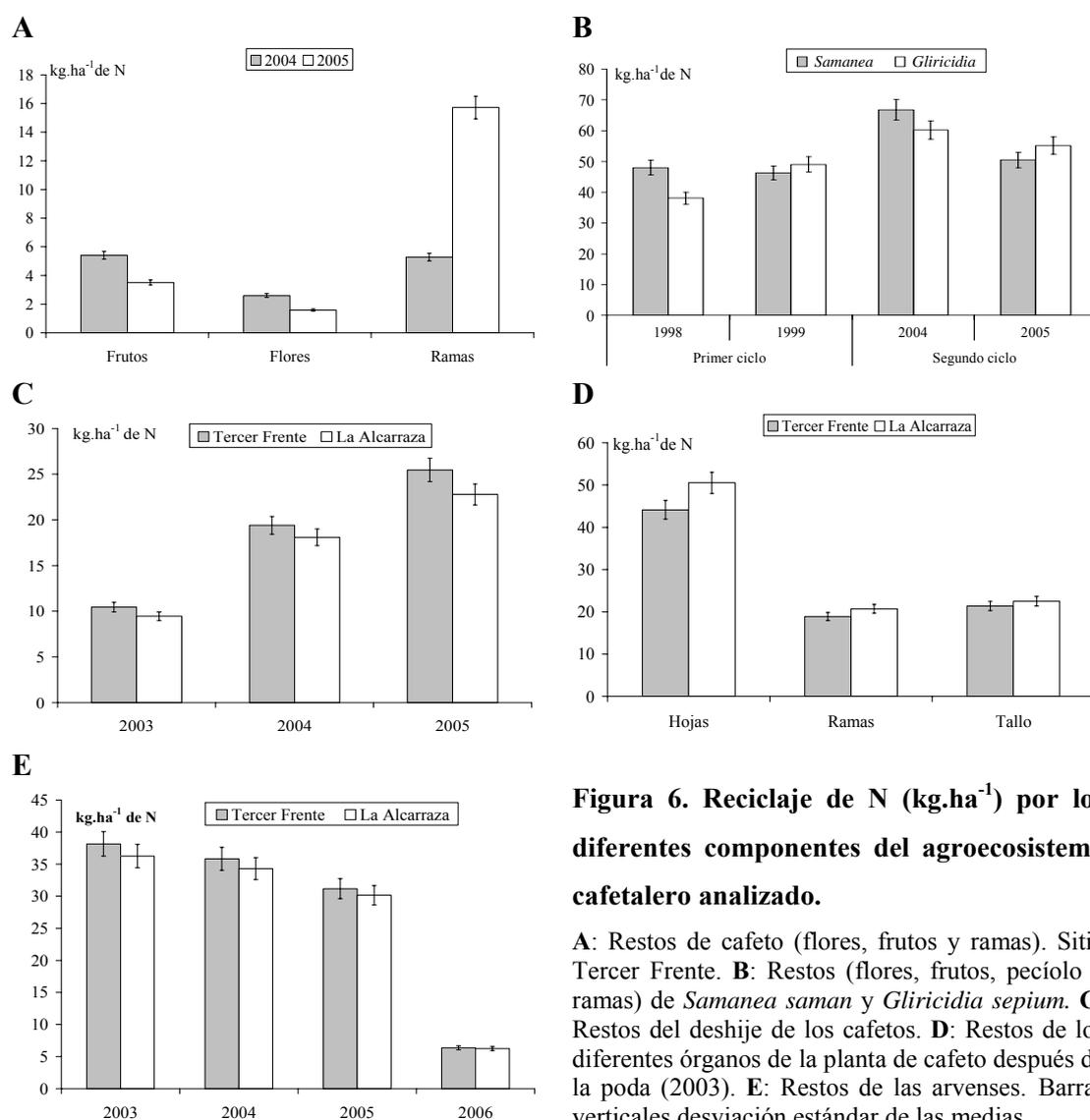


**Figura 5. Reciclaje de N ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) por las hojas de café (A) y los árboles de sombra (B) en el área de goteo. *Samanea saman* en Tercer Frente, *Gliricidia sepium* en La Alcarraza. Barras verticales desviación estándar de las medias.**

El reciclaje de N al agroecosistema por éste concepto (promedio de los años evaluados) fue similar a lo reportado por Medina (2000) en *Coffea arabica*, donde por caída de hojas se cuantificaron  $40,6 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de N.

El contenido de N de los árboles de sombra fue muy similar entre ambas especies, el algarrobo incorporó entre  $31,2$  a  $37,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  y como media de las evaluaciones  $36,86 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Las hojas del piñón retornaron de  $28$  a  $36,36 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ , con un reciclaje promedio anual de  $31,67 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ .

Entre el café y el algarrobo, en el sitio Tercer Frente, se reciclaron  $65,69 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de N. Esta contribución por los restos del café y los árboles de sombra fue superior a lo reportado en Nicaragua por Pérez y Souza, (2006), donde cafetos arábicos plantados a densidad de  $4\,000 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$  bajo sombra de *Gliricidia sepium* contribuyeron con  $37,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ . Los restos del café retornaron por medio de los frutos  $4,96 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ; por las flores,  $2,09 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y las ramas contribuyeron con  $10,50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de N; mientras que los restos del algarrobo incorporaron  $48,14 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de N y los del piñón  $44,09 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de N (Figura 6 A y B).



**Figura 6. Reciclaje de N ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) por los diferentes componentes del agroecosistema cafetalero analizado.**

**A:** Restos de café (flores, frutos y ramas). Sitio Tercer Frente. **B:** Restos (flores, frutos, peciolo y ramas) de *Samanea saman* y *Gliricidia sepium*. **C:** Restos del deshoje de los cafetos. **D:** Restos de los diferentes órganos de la planta de café después de la poda (2003). **E:** Restos de las arvenses. Barras verticales desviación estándar de las medias.

Por el deshije del cafeto se incorporaron al suelo entre 10,4 – 25,45 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Figura 6 C). Como media de las evaluaciones realizadas, por este concepto se aportaron 18,42 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> (sitio Tercer Frente) y 16,77 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N en el sitio La Alcarraza. Estos resultados fueron similares a los encontrados en Venezuela, donde los deshijos del cafeto aportaron como valores medios 19,6 kg.ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de N (Quintero y Ataroff, 1998). Por efecto de la poda total se incorporaron 44,13 – 50,5 kg.ha<sup>-1</sup> por las hojas del cafeto, por los tallos de 21,37 – 22,5 kg.ha<sup>-1</sup> y por las ramas de 18,89 – 20,7 kg.ha<sup>-1</sup> de N.

El deshierbe permite el retorno de toda la biomasa aérea de las especies que conforman el estrato herbáceo del cafetal y con ella, el N, el cual tuvo un comportamiento diferenciado por año, disminuyendo en la medida que las plantas de cafeto crecen y cierran las calles. Los mayores contenidos del elemento se encontraron en el año de la poda (36 – 38 kg.ha<sup>-1</sup>), y disminuyó con el tiempo hasta el 2006, con sólo valores de 6 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Figura 6 E). Como media de los retornos de N por las arvenses, se pueden encontrar entre 33,57 – 35,05 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>.

En estos agroecosistemas, se pueden esperar aportes de N de los árboles de sombra, por fijación biológica en el orden de 40 – 100 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de este elemento (Roskoski, 1980).

Por otro lado, Snoeck y col. (2000) encontraron que el 30 % del N fijado por las leguminosas utilizadas en los agroecosistemas cafetaleros fueron transferidos a los árboles de café asociados.

#### **4.2.3. Contribución general del agroecosistema**

Al realizar una valoración del agroecosistema cafetalero, se encontró que los árboles de sombra contribuyen con el mayor aporte de biomasa y de N, seguido de los retornos del cafeto y por último de las arvenses, con valores muy similares entre los sitios para cada uno de los componentes (Tabla 11).

En los agroecosistemas cafetaleros, Rojas y col. (2005) proponen como soluciones tecnológicas el empleo de especies de leguminosas como árboles de sombra, dentro de ellas a *Samanea saman* y a *Gliricidia sepium* por ser fijadoras de nitrógeno, mejorar los suelos y promover y conservar la fauna silvestre.

De manera general, los agroecosistemas formados por *Coffea canephora* más los árboles de sombra, retornaron al suelo de 7,93 – 8,55 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de masa seca y entre 166 – 169 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>.

**Tabla 11. Producción de biomasa y reciclaje de nitrógeno por algunos componentes del agroecosistema cafetalero (medias anuales de las evaluaciones realizadas).**

Órganos	Biomasa (t.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup> )		N (kg.ha <sup>-1</sup> .año <sup>-1</sup> )	
	Tercer Frente	La Alcarraza	Tercer Frente	La Alcarraza
Hojas de café	1,43 (± 0,22)	1,49(± 0,07)	29,92 (± 10,49)	30,3 (± 1,51)
Restos <sup>1</sup>	0,92 (± 0,05)	0,8 (± 0,04)	12,85 (± 0,89)	12,80 (± 0,84)
Deshijes	0,54 (± 0,02)	0,49 (± 0,24)	18,42 (± 0,92)	16,77 (± 1,63)
<b>Contribución del cafeto</b>	<b>2,89</b>	<b>2,78</b>	<b>61,19</b>	<b>59,87</b>
Hojas del árbol	1,51 (± 0,08)	1,45 (± 0,08)	36,86 (± 1,48)	<b>31,67</b> (± 2,83)
Restos <sup>2</sup>	2,62 (± 0,13)	2,33 (± 0,12)	44,09 (± 2,20)	48,14 (± 2,40)
<b>Contribución de la sombra</b>	<b>4,13</b>	<b>3,78</b>	<b>80,95</b>	<b>79,81</b>
Arvenses	<b>1,53</b> (± 0,07)	<b>1,37</b> (± 0,06)	27,75(± 1,75)	26,50 (± 1,68)
<b>Total del sistema*</b>	<b>8,55</b>	<b>7,93</b>	<b>169,89</b>	<b>166, 18</b>

<sup>1</sup>Restos de la planta de cafeto: flores, frutos, ramas; <sup>2</sup>Restos de los árboles de sombra: flores, frutos, ramas y pecíolo, En Tercer Frente: Algarrobo (*Samanea saman*) y Alcarraza: Piñón (*Gliricidia sepium*), \*Sin incluir la poda. Número entre paréntesis: desviación estándar de las medias.

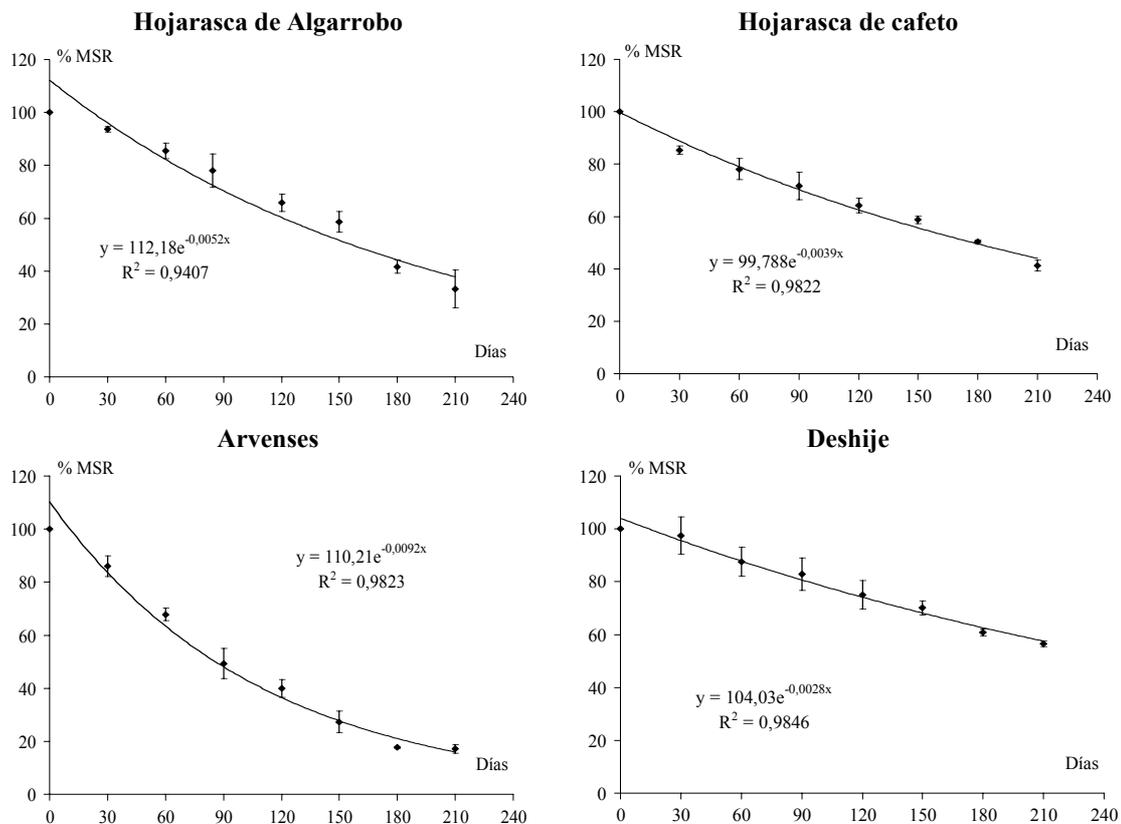
El nitrógeno del suelo se encuentra asociado a la materia orgánica, la cual sufre una serie de transformaciones en el suelo. Además de ser una fuente de nutrientes, ofrece una serie de beneficios sobre las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, al suplir sustratos para un mejor desarrollo de los microorganismos y la microfauna del suelo (Hernández y Rayo, 2007).

#### 4.2.4. Tasa de descomposición de los diferentes componentes del agroecosistema

La tasa de descomposición varió por cada material y se incrementó con el tiempo, así las arvenses fueron las más rápidas en descomponerse, con una masa seca remanente (MSR) a los 210 días de sólo 17 %, seguida del algarrobo con una MSR del 33 % (Figura 7).

Las arvenses presentaron una favorable relación C/N de 12,20; influenciada tal vez por la propia mezcla de especies existente en el agroecosistema (Anexo 5), muchas de ellas leguminosas; mientras que la hojarasca del algarrobo tuvo una relación C/N de 13,43; muy apropiada para una rápida descomposición.

La tasa de descomposición encontrada en el algarrobo fue similar a lo reportado por Gourete (2007), donde la hojarasca de las especies *Erythrina sp.* e *Inga sp.* presentaron las menores masas remanentes a partir de los 150 días, y llegó a ser alrededor del 30 %.



**Figura 7. Tasa de descomposición de los diferentes restos estudiados. Medias de tres años de estudios (2003 – 2005). Sitio Tercer Frente.** MSR. Masa seca remanente. Barras verticales: desviación estándar de las medias.

Las hojas del cafeto presentaron una MSR a los 210 días del 41 %, similar al comportamiento obtenido por *C. arabica* cultivado en Costa Rica con valores del 44 % de masa remanente del follaje a los 240 días (Moreno, 2004).

En un estudio realizado en *Coffea arabica* bajo otras condiciones edafoclimáticas de Cuba, la masa seca remanente de las hojas se descompuso completamente a los 360 días (Rivera, 1993 a).

La lenta descomposición de las hojas de café respecto a las hojarasca de algarrobo y de las propias arvenses, pudo estar influenciada por diversas causas, entre ellas se pueden mencionar una mayor relación C/N (20,08) y a la presencia de contenidos de lípidos, resinas, celulosa, taninos y lignina, que ejercen un efecto resistente que prolonga la biodegradación de las hojas por inhibición del crecimiento y el funcionamiento de los microorganismos (Munguía, 2003; Moreno, 2004).

Hay autores que plantean que aunque los rangos de descomposición del material vegetal añadido al suelo dependen de numerosos factores biológicos y ecológicos (Dawoe y col., 2009), la composición química de las plantas es el factor más importante de la mineralización (Gunadi y col., 1998; Vigil, 2001).

Sin embargo, las abundantes precipitaciones del período (1 600 – 2 200 mm), así como las altas temperaturas de la zona de Tercer Frente, fueron condiciones propicias para la rápida y continua descomposición, típicas de regiones tropicales, similar a lo encontrado por Rivera (1988).

La tasa de descomposición de los restos de los deshojes (relación C/N de 30,2) fue la más lenta dentro de los materiales evaluados; así a los 210 días quedaba el 56 % de la MSR. Navarro y Navarro, (2003) informan que, el aumento de la proporción de celulosa, disminuye el porcentaje de N en el material y por consiguiente se eleva la relación C/N. El hecho que los deshojes tuvieran menor tasa de descomposición que el resto de los materiales estudiados, se debe a que, normalmente, las hojas presentan mayor tasa de descomposición, en razón de su concentración inicial más elevada de nitrógeno y de fósforo que los materiales más lignificados, estos últimos son más resistentes a la descomposición (Caldato y col., 2010).

Como resultado, el patrón de descomposición de los diferentes residuos estuvo en función de los materiales vegetales, su relación C/N y el tiempo de duración del experimento. Esto concuerda con lo referido Poggiani y Schumacher (2004) y Pallardy (2008) quienes informaron que la forma y velocidad de descomposición de los restos están relacionadas principalmente con las condiciones climáticas, la relación C/N y los microorganismos que efectúan el proceso.

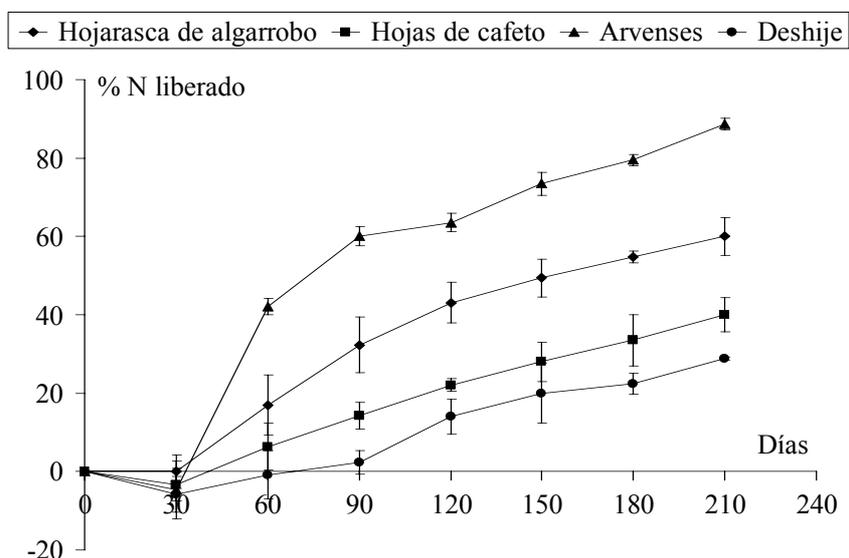
Así, en los primeros días después de la caída de las hojas, ocurre mayor pérdida de compuestos solubles, de más fácil descomposición como los azúcares, aminoácidos y proteínas (Lupwayi y col., 2004). Después de este período, este proceso se hace más lento por la presencia de materiales recalcitrantes como la celulosa (Gourete, 2007). La fase final es llevada a cabo por hongos y bacterias del suelo (Reynolds y Hunter, 2001) y está más relacionada con los contenidos de ligninas presentes en los materiales.

En términos generales, puede decirse que si la relación C/N es mayor que 30, no existe una liberación inmediata del nitrógeno aprovechable en el suelo, por el contrario, si

dicha relación es de 20, algo del N se mineraliza y queda a disposición de la planta (Núñez, 2007; Córdova, 2010).

#### 4.2.5. Liberación del nitrógeno

Las hojas de café, la hojarasca de algarrobo, las arvenses y los deshijes tuvieron inicialmente un proceso de inmovilización del N y su magnitud dependió del material evaluado. Las hojas de café tuvieron un período de inmovilización entre los 30 – 50 días, a partir del cual se comenzó a liberar N al suelo de forma creciente hasta los 210 días que duró la investigación y alcanzó el 40 % de liberación (Figura 8). En *Coffea arabica*, Munguía (2003) encontró que a los 365 días de descomposición, la biomasa seca producida por el café transfirió al suelo el 64,8 % del N.



**Figura 8. Flujo de N en diferentes restos del agroecosistema cafetalero. Medias de los tres años evaluados (2003 – 2005). Tercer Frente.** Barras verticales: desviación estándar de las medias

El incremento del % de N en el material remanente de las hojas de *canephora*, es un fenómeno que había sido detectado con anterioridad en las hojas de *C. arabica* por Rivera (1988), considerando diferentes causas de este incremento, como las relacionadas con la actividad microbiológica y biológica en general.

El período de inmovilización del N en la hojarasca de algarrobo estuvo por debajo de los 30 días, a partir de ese momento comenzó la liberación del N por parte de la hojarasca del algarrobo. A los 210 días se habían liberado 60 % de nitrógeno que se encontraba en

la masa seca (Figura 8). En coincidencia, la hojarasca de las especies de leguminosas *Erythrina poeppigiana*, *Inga edulis* y *Albizia gumífera* como árboles de sombras en los agroecosistemas cafetaleros, presentaron inmovilización inicial de los nutrientes, para luego incrementar la tasa de mineralización (Moreno, 2004; Teklay, 2007).

Estos resultados coinciden además, con los obtenidos por Gourete (2007) al evaluar diferentes especies forestales, en relación con los primeros 15 días, donde no hubo liberación de nutrientes (N, P, K), pero difieren en el porcentaje de liberación de N, debido a que las especies forestales utilizadas como sombra para el café en Brasil (*Erythrina sp.* e *Inga sp.*) a los 150 días ya habían liberado aproximadamente el 80 % del nitrógeno.

Al respecto, Partielli y col. (2009) explican que la liberación de los nutrientes para el suelo ocurre en función de algunos factores, como la época del año (estación seca o lluviosa, verano o invierno), la localidad, la edad de la planta y la especie utilizada.

El nitrógeno en las arvenses, también se inmovilizó durante un mes, pero su liberación en el tiempo fue superior al resto de los materiales y llegó a los 210 días al 88 % del contenido inicial.

Los restos de los deshijes también se inmovilizaron en un período de 30 – 50 días, pero la magnitud de liberación de N fue la más lenta de todas, al alcanzar a los 210 días el 28 % de nitrógeno inicial contenido en la masa seca.

Los estudios sobre la dinámica de liberación del N contenido en restos orgánicos demuestran que casi siempre ocurre una inmovilización inicial del N del suelo. Este comportamiento se debe a que primeramente se estimula la actividad de los microorganismos del suelo, los que fijan el N incorporado, debido a la necesidad de nutrientes demandada por su metabolismo (Martín y Rivera, 2004).

La tasa de descomposición y el tiempo de vida media, varió para cada uno de los restos evaluados (Tabla 12). La mayor descomposición se encontró en las arvenses > hojarasca de algarrobo > hojas de café > restos del deshije del café.

La tasa de descomposición de las hojas de café en las condiciones objeto de estudio fue superior a lo alcanzado en la hojarasca de *C. arabica* cultivado a pleno sol (0,0017 k.día<sup>-1</sup>) y bajo sombra de *Gliricidia sepium* (0,0012 k.día<sup>-1</sup>) en Nicaragua (Pérez y

Souza, 2006); mientras que, la hojarasca del algarrobo fueron similares a los encontrados en la especie *Inga* sp. (0,0030 k.día<sup>-1</sup>) en Brasil por Gourete (2007) e inferiores a *Gliricidia sepium* (0,012 k.día<sup>-1</sup>) en Nicaragua (Pérez y Souza, 2006).

**Tabla 12. Coeficiente de descomposición y período de vida media de los restos vegetales. Sitio Tercer Frente. 2003 – 2005.**

Restos vegetales	Coeficiente de descomposición (k.día <sup>-1</sup> )	Período medio de vida t <sub>½</sub> (días)
<b>Hojas de cafeto</b>	0,0039	203,02
<b>Hojarasca de algarrobo</b>	0,0052	188,54
<b>Arvenses</b>	0,0092	76,3
<b>Restos de deshijes</b>	0,0028	252,99

La liberación de nutrientes durante la descomposición de la hojarasca, es conocida como uno de los procesos cuantitativamente más importantes, que contribuyen con el ciclo de los nutrientes en los agroecosistemas. Este puede tardar días o meses, dependiendo de múltiples factores como condiciones climáticas y edáficas, especie vegetal, edad y densidad de las poblaciones, y la tasa de fijación puede variar ampliamente dependiendo del proceso y de los microorganismos que lo efectúan (Prause y col., 2003).

Los restos del algarrobo tuvieron un período de vida media de 188 días, inferior a los resultados obtenidos con la especie *Inga* sp. utilizada como sombra para el cafeto en Brasil, con un tiempo de vida media de su hojarasca de 236 días (Gourete, 2007), y a lo reportado para la descomposición de la hojarasca de la selva mixta del sur de Brasil, donde se encontró un tiempo de vida media de 3,89 años (Caldato y col., 2010).

En el caso de las hojas café, la vida media de sus residuos fue de 203 días aproximadamente, mientras que los residuos del deshije no perdieron el 50 % de su peso durante los 210 días que duró la investigación.

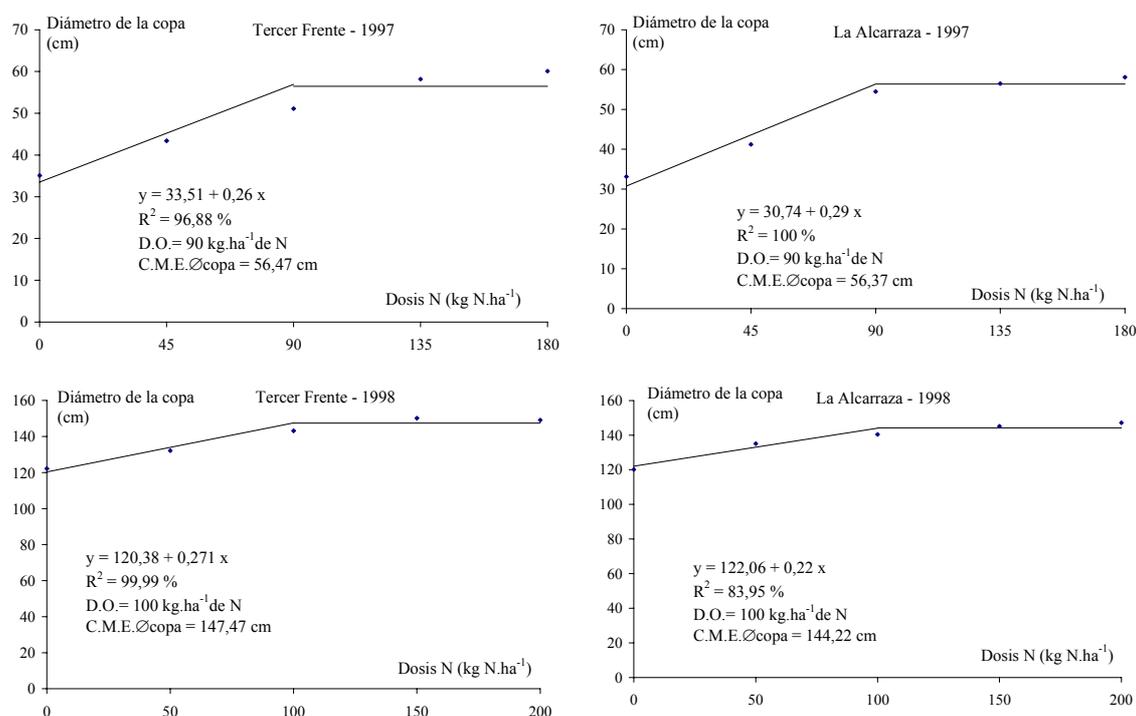
De manera general, las especies que producen materias de diferente velocidad de descomposición pueden interactuar en el mismo sistema, de forma que los diversos restos se mezclen y pasen a tener una tasa de descomposición intermedia, liberando continuamente nitrógeno, pudiendo realizar un reciclaje de este elemento más equilibrado en el agroecosistema y ser aprovechado de una manera más eficiente por el cafeto.

### 4.3. Experimento 3. La fertilización nitrogenada para plantaciones de *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos durante dos ciclos productivos

#### 4.3.1. Primer ciclo productivo

##### 4.3.1.1. Crecimiento del café en dependencia de los niveles de N aplicados al suelo (1997 – 1998)

En el primer ciclo productivo se encontró, en ambos sitios, una respuesta positiva y significativa a la aplicación del fertilizante nitrogenado desde las primeras evaluaciones (Figura 9). En el primer año los mayores crecimientos en el diámetro de la copa en ambos sitios, se alcanzaron con dosis de  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de nitrógeno, mientras que en el segundo año los mayores valores del diámetro de la copa se encontraron entre 144 y 147 cm y para los cuales fueron necesarias dosis de  $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  de N.



**Figura 9. Respuesta del diámetro de la copa a diferentes dosis de N. Primer ciclo productivo.** CME∅ copa: crecimiento máximo estable del diámetro de la copa. D.O. Dosis óptima.

Las dosis propuestas estuvieron dentro del rango establecido en otras localidades para esta fase de crecimiento de *C. canephora*; así en la India se recomiendan  $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de N (Jayarama, y col., 1994). En Costa de Marfil, se encontró una respuesta lineal en el

diámetro de la copa de *Coffea canephora* al estudiar niveles de nitrógeno hasta 100 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Oliveira y col., 1980). Sin embargo, fueron ligeramente inferiores a lo reportado por Snoeck y Snoeck (1992) en esta misma localidad, donde obtuvieron el mayor crecimiento con la utilización de 120 kg.ha<sup>-1</sup> de N.

Rivera y Martín (1980) demostraron que el diámetro de la copa se comportó como un indicador sensible para evaluar el estado nutricional del cafeto en relación con la altura, debido a que esta expresa el crecimiento primario y es priorizado a expensas del crecimiento de las ramas, siendo necesario que existan deficiencias importantes para que la planta restrinja su crecimiento apical.

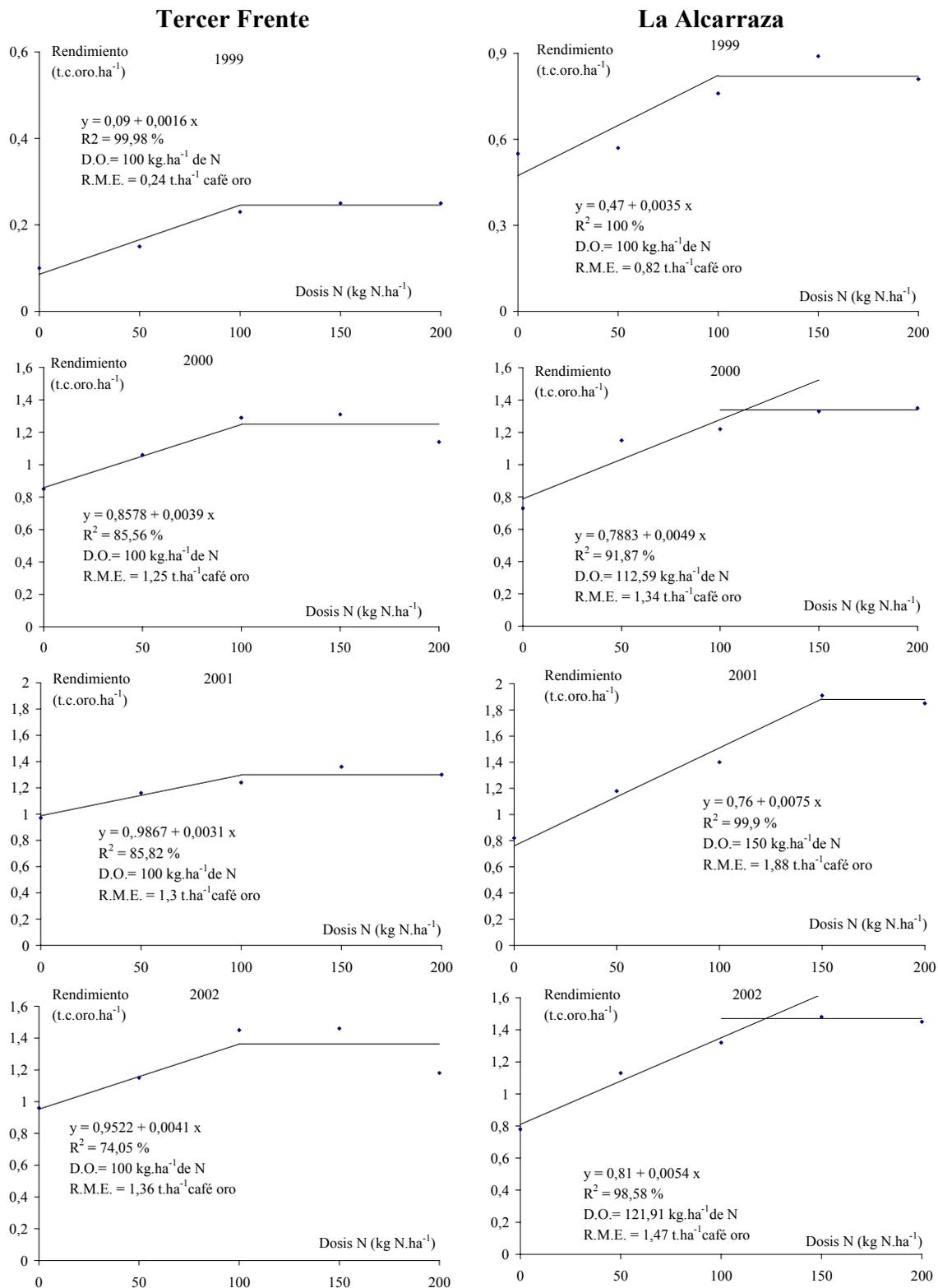
En Cuba se ha demostrado el efecto positivo de la fertilización nitrogenada en el cultivo del cafeto, en condiciones edafoclimáticas que abarcan los suelos Ferralíticos (Martín, 1988; Rivera, 1988), los Pardos (Bustamante y col., 1989; Rodríguez y col., 1998 b) y los Ferríticos (Ochoa, 2000).

#### **4.3.1.2. Producción de *Coffea canephora* (1999 – 2002)**

Se encontró una respuesta significativa del rendimiento a la fertilización nitrogenada, encontrándose como en la medida que el rendimiento máximo estable fue mayor, se incrementaron las necesidades de fertilizante N, en todos los sitios y en todas las cosechas evaluadas.

En la primera cosecha (1999), para garantizar rendimientos máximos estables de 0,24 y 0,82 t.ha<sup>-1</sup> de café oro fueron suficientes 100 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N, en los sitios de Tercer Frente y La Alcarraza, respectivamente (Figura 10 A y B). A partir de la segunda cosecha, en que el cafeto entro en su etapa productiva, los rendimientos aumentaron en ambos sitios experimentales, siendo superiores en las plantaciones de La Alcarraza en relación con las situadas en Tercer Frente.

En el sitio Tercer Frente, las cosechas en la etapa productiva fueron relativamente similares, con rendimientos máximos estables que oscilaron entre 1,25 – 1,36 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de café oro y para las cuales fueron necesarios dosis de 100 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de nitrógeno (Figura 10 A). En la segunda y cuarta cosecha se alcanzaron rendimientos máximos estables de 1,34 y 1,47 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de café oro, para los cuales fueron necesarios aplicaciones de 112 y 121 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N, respectivamente.



**Figura 10. Efecto de la fertilización nitrogenada) sobre el rendimiento de *C. canephora* en su primer ciclo. D.O. Dosis óptima recomendada. RME Rendimiento máximo estable.**

En la tercera cosecha (2001) de La Alcarraza se encontró un alto rendimiento máximo estable de 1,88 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, para el cual entonces fue necesario aplicar en ese año una dosis óptima superior y del orden de 150 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Figura 10 B).

Por otra parte, en el sitio La Alcarraza y en este primer ciclo los rendimientos máximos estables promedio en toda la etapa productiva fueron 1,56 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de café oro, superiores a los 1,3 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> obtenidos en el sitio Tercer Frente.

Durante el año 2001 en la Alcarraza las precipitaciones fueron del orden de 1 920 mm.año<sup>-1</sup> y con 122 días de lluvia, lo que explica los altos rendimientos que se obtuvieron en dicho año.

En relación a esto, Veloso y col. (2003) informaron que una fertilización adecuada confiere a las plantas de *canephora* mayor productividad, mejor calidad de los frutos y mayor tolerancia a plagas y enfermedades. Stewart, (2007) planteó que el rendimiento en la mayoría de los cultivos es específico del sitio, época del año y dependen del cultivar, prácticas de manejo y clima.

También Valencia (1998) y Soto (2006) hacen alusión a que las temperaturas y las precipitaciones son los factores climáticos que más afectan el cultivo del café.

Un déficit hídrico en el café produce una disminución en los rendimientos y en la tasa neta de asimilación de carbono de esta especie, independientemente de las dosis de fertilizante nitrogenado recibidas (Matta y col., 2002).

Los estimados del índice de eficiencia agronómica (Tabla 13) mostraron valores superiores en La Alcarraza que en el sitio Tercer Frente, de forma tal que dosis similares de fertilizante N garantizaron rendimientos mayores en La Alcarraza, con incrementos entre 10 – 20 %, con excepción del año 2001, en que el índice de eficiencia agronómica fue 2,5 veces mayor

**Tabla 13. Eficiencia agronómica del café durante su primer ciclo productivo en ambas localidades (kg incremento rendimiento. kg<sup>-1</sup> N aplicado).**

Año	Tercer Frente		La Alcarraza	
	Eficiencia	RME	Eficiencia	RME
2000	3,90	1,25	4,88	1,34
2001	3,10	1,30	8,65	1,88
2002	4,10	1,36	5,41	1,47

RME. Rendimiento máximo estable (t.ha<sup>-1</sup> de café oro)

La determinación de la eficiencia del uso de los fertilizantes por los cultivos constituye uno de los principales objetivos de investigaciones agroquímicas, ya que mediante ésta se puede establecer un sistema de abonado racional (Bustamante y col., 1997).

#### 4.3.2. Segundo ciclo productivo

##### 4.3.2.1. Crecimiento del café en dependencia de los niveles de N aplicados al suelo (2003 – 2004)

En el primer y segundo año después de la poda no se encontró efecto significativo de las dosis de fertilizantes estudiadas sobre el diámetro de la copa (Tabla 14) en ninguno de los dos sitios estudiados.

**Tabla 14. Efecto de las dosis de nitrógeno en el diámetro de la copa de *Coffea canephora* (cm). Segundo ciclo productivo.**

Dosis	Tercer Frente		La Alcarraza	
	2003	2004	2003	2004
N <sub>0</sub> (0)	134,1	160,9	120,4	154,52
N <sub>1</sub> (50)	139,82		122,45	
N <sub>1</sub> (75)		164,65		156,17
N <sub>2</sub> (100)	153,8		122,2	
N <sub>2</sub> (150)		168,8		156,9
N <sub>3</sub> (150)	146,45		121,4	
N <sub>3</sub> (225)		171,7		158,1
N <sub>4</sub> (200)	155,97		123,12	
N <sub>4</sub> (300)		175,52		160,6
ES $\chi$	7,79 N.S.	14,40 N.S.	3,21 N.S.	13,72 N.S.

Número entre paréntesis: Dosis de N aplicada ese año (kg.ha<sup>-1</sup>). Comparación de medias según d. Duncan (p<0.05). Tratamientos, Dosis de N aplicadas los dos años.

Similar comportamiento se obtuvieron en el primer ciclo de poda de la especie *C. arabica* cultivada en un suelo Pardo ócrico sin carbonatos de Tercer Frente, pero con valores que no llegaron a 1m de diámetro de la copa (Rodríguez y col., 1998 b), lo que ratifica el mejor desarrollo del *canephora* en estas condiciones e incluso después de haber realizado la poda.

A partir de estos resultados, no se hace necesario realizar aplicaciones de N en el año en que se realice la poda. Al parecer los aportes que realiza el suelo, los restos de los diferentes componentes del agroecosistema, garantizaron el crecimiento del café en el primer año del nuevo ciclo productivo.

La ausencia de respuesta del cultivo a la aplicación de N en esta fase inicial de desarrollo coincide con lo planteado por Krishnamurty (1994) quien expresó que la respuesta a la fertilización mineral bajo un sistema de sombrero con leguminosas es generalmente no lineal, no significativo y no consistente.

En el segundo año si bien tampoco se encontró una respuesta definida a la aplicación del fertilizante N sobre el crecimiento, el hecho de que ya en este año se obtenga una importante producción, hace que el principal indicador para evaluar los requerimientos de fertilizante sea la respuesta sobre el rendimiento.

#### **4.3.2.2. Producción de *Coffea canephora* (2004 – 2007)**

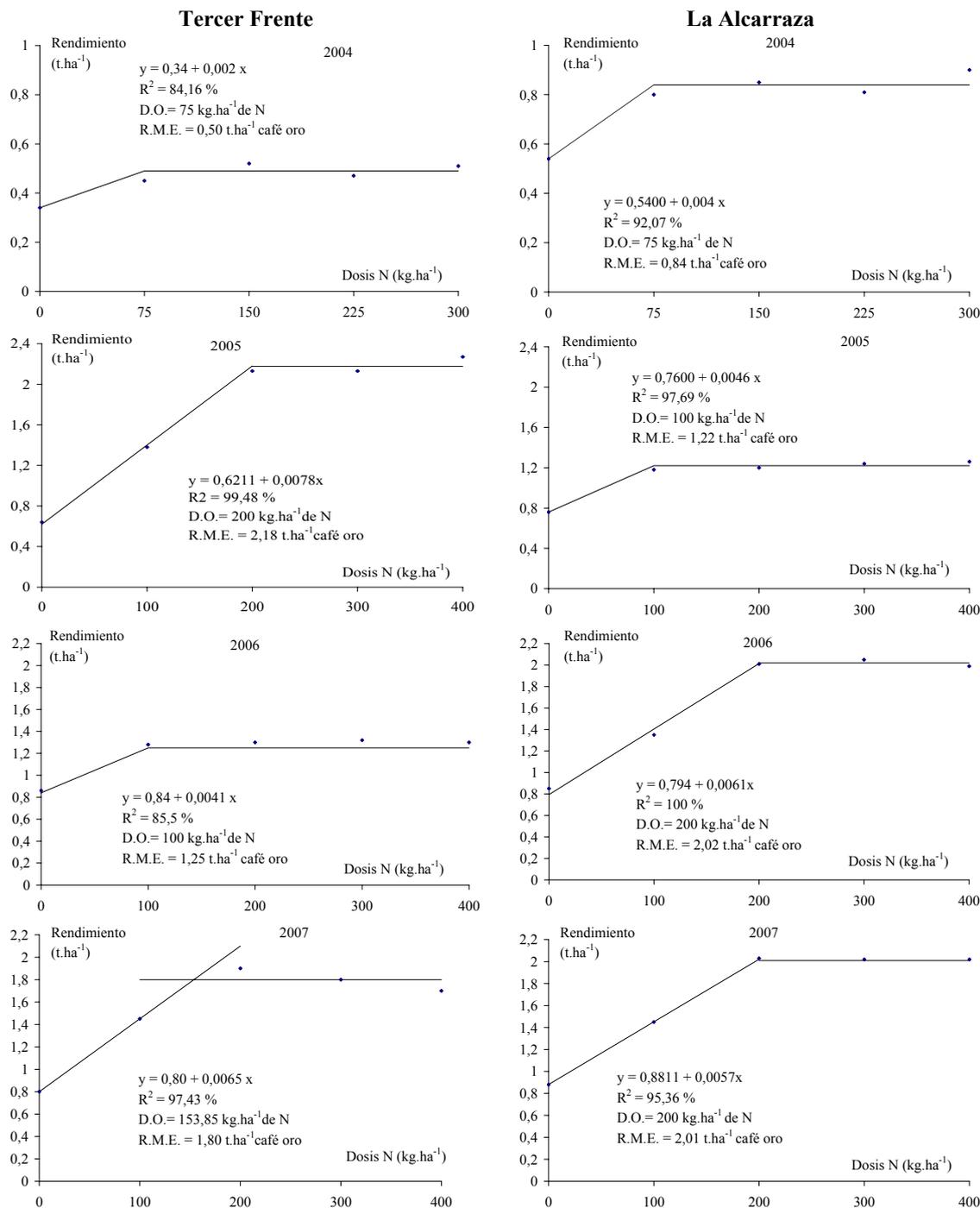
El café Robusta, respondió positivamente a la poda baja total, expresado en que en el año siguiente de haber realizado esta actividad (2004), se obtuvo la primera cosecha del nuevo ciclo, la cual, si bien fue inferior a las obtenidas posteriormente en el resto de los años, fue superior a las obtenidas en la primera cosecha del primer ciclo productivo.

En todos los años y en ambos sitios se encontró una respuesta positiva y significativa sobre el rendimiento, de forma tal que mientras más elevados fueron los rendimientos máximos estables obtenidos cada año, mayores fueron los requerimientos de N y viceversa. Los rendimientos de la primera cosecha estuvieron entre 0,50 – 0,84 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, y que requirieron de una dosis óptima de 75 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Figura 11 A y B), es por esto que, aunque no se encontró respuesta del diámetro de la copa a la aplicación de N en este año, se hace una recomendación de dosis de fertilizante nitrogenado basado en los rendimientos obtenidos.

En relación con esto, Ochoa y col. (1993) y Rivera (2006) informaron igual comportamiento en *C. arabica*, quien floreció y produjo el año posterior al de la poda con un despunte o primera cosecha superior al despunte del primer ciclo productivo.

Al analizar la etapa productiva del segundo ciclo, se encontró que los rendimientos máximos estables en el sitio Tercer Frente se incrementaron con respecto al primer ciclo, alcanzándose un promedio de 1,74 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de café oro y muy similar a los 1,75 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de café oro obtenidos en el sitio de La Alcarraza.

En condiciones normales de cultivo y poda, la fertilización mineral proporciona incrementos rentables de la producción del café *canephora* (Snoeck y Snoeck, 1992).



**Figura 11. Efecto de la fertilización nitrogenada) sobre el rendimiento de *C. canephora* en su segundo ciclo. D.O. Dosis óptima recomendada. RME Rendimiento máximo estable.**

En este segundo ciclo se mantuvo un régimen de precipitación adecuado en La Alcarraza, con una precipitación promedio anual en el período de 1 936 mm, mientras

que en el sitio Tercer Frente se incrementó con respecto al primer ciclo y alcanzó en este periodo un valor promedio anual de 1 921 mm.

En el sitio Tercer Frente, para rendimientos máximos de 2,17 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, fueron necesarios 200 kg.ha<sup>-1</sup> de N, los cuales disminuyeron a 100 kg.ha<sup>-1</sup> de N cuando el rendimiento máximo estable disminuyó hasta 1,25 t.ha<sup>-1</sup> de café oro; al incrementarse los rendimientos máximos hasta 1,8 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, aumentaron consecuentemente los requerimientos de fertilizante N hasta 153 kg.ha<sup>-1</sup> (Figura 11 A).

En el sitio La Alcarraza, se encontró una conducta similar y para rendimientos máximos de 1,22 t.ha<sup>-1</sup> de café oro fueron necesarias dosis de 100 kg.ha<sup>-1</sup> de N, mientras que para rendimientos de 2 t.ha<sup>-1</sup> de café oro fueron necesarias dosis de 200 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrógeno.

En la India se recomiendan 80 kg.ha<sup>-1</sup> de N para garantizar un adecuado crecimiento y rendimientos de 1 t.ha<sup>-1</sup> de *Coffea canephora* (Jayarama y col., 1994).

En consecuencia a lo anterior, los valores de eficiencia agronómica de las dosis de fertilizante N recomendadas para cada nivel de rendimiento máximo anual en este segundo ciclo (Tabla 15) se comportaron de forma similar en ambos sitios, obteniéndose siempre los mayores valores de eficiencia con altos rendimientos.

**Tabla 15. Eficiencia agronómica del cafeto durante su segundo ciclo productivo en ambas localidades (kg incremento rendimiento. kg<sup>-1</sup> N aplicado).**

Año	Tercer Frente		La Alcarraza	
	Eficiencia	RME	Eficiencia	RME
2005	7,80	2,18	4,60	1,22
2006	4,10	1,25	6,15	2,02
2007	6,50	1,80	5,65	2,02

RME. Rendimiento máximo estable (t.ha<sup>-1</sup> de café oro)

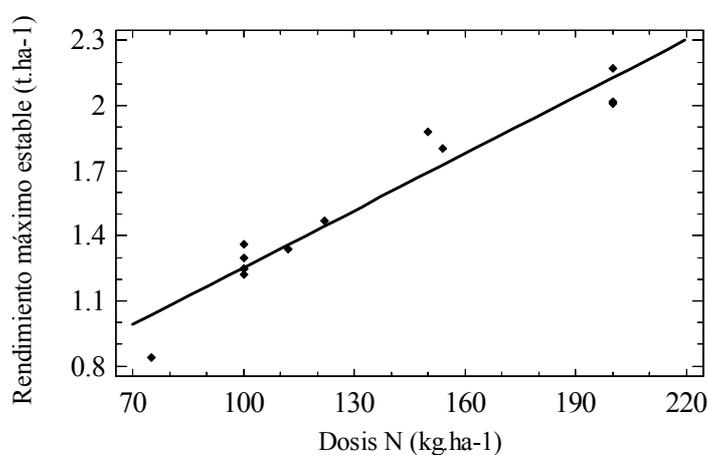
En el caso de La Alcarraza, el rango de eficiencia agronómica anual encontrado fue parecido en ambos ciclos del cultivo, asociado con el hecho de que tanto el régimen de precipitación como el rango de rendimientos máximos obtenidos para cada ciclo de crecimiento fueron respectivamente similares.

Para el caso del sitio Tercer Frente, se encontraron los mayores valores de eficiencia agronómica en este segundo ciclo, en correspondencia con los mayores rendimientos obtenidos y posiblemente asociados con las mayores precipitaciones del período.

La eficiencia con la que los cultivos utilizan el fertilizante aplicado es de suma importancia tanto económica, dado que esta relacionada directamente con el beneficio de la fertilización, como medioambiental, ya que cuanto mayor sea la eficiencia de uso, menor N residual susceptible de ser lixiviado quedará en el sistema, y por tanto, menor será el riesgo de contaminación (Alva y col., 2003).

#### 4.3.3. Valoración integral de los dos ciclos productivos

Un aspecto de alto valor metodológico y práctico para la recomendación de fertilizantes nitrogenados en el café, fue la relación positiva encontrada entre las dosis óptimas de N y los rendimientos máximos estables anuales, para las diferentes cosechas en ambos ciclos productivos ( $R^2 > 93,65\%$ ), lo que indicó que el esquema de recomendación de dosis de fertilizante N, en función de los rendimientos máximos anuales, es válido a su vez para cualquiera de los dos sitios y ciclos, y sugiere su extrapolación para condiciones de plantaciones de Robusta sobre suelos Pardos, en regiones con precipitaciones anuales entre 1 450 y 2 000 mm (Figura 12).



$$y = 0,378295 + 0,008752 * x \quad R^2 = 93,65 \% \quad Es\hat{y} = 0,11$$

**Figura 12. Relación entre dosis óptima de N y los rendimientos máximos estables obtenidos en ambos sitios estudiados durante los dos ciclos productivos analizados.**

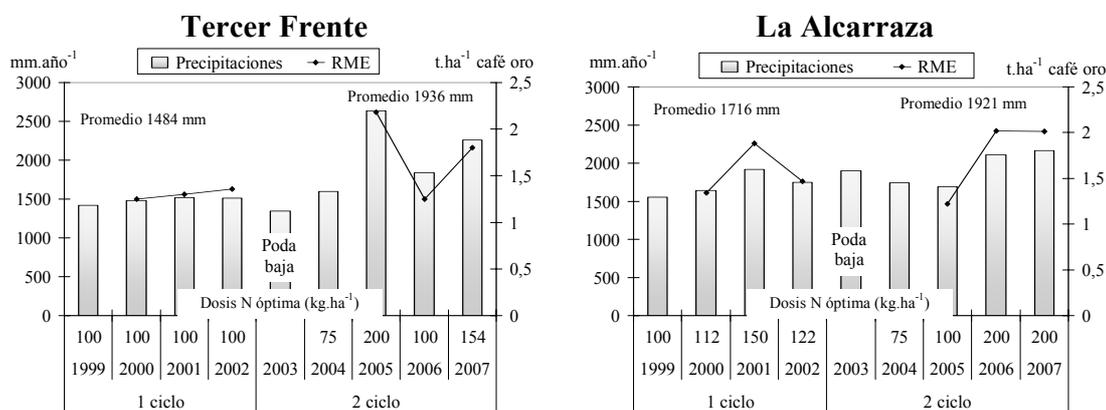
Estos resultados corroboran los obtenidos por Ochoa y col. (1993) al analizar durante 18 cosechas, cuatro ciclos productivos, en los que no se encontró influencia del ciclo en el esquema de recomendación de fertilizante N para la especie *C. arabica*, sino que la recomendación de fertilizante fue consecuencia del nivel de rendimiento

esperado y que la relación de rendimientos/dosis de fertilizantes se mantuvo a lo largo de los ciclos, de forma similar a como se encontró en este trabajo.

En coincidencia, Rojas y Pérez (2001) informaron que la aplicación de nitrógeno permite la renovación adecuada de la planta, por medio de la emisión de brotes vigorosos, la formación de abundante follaje que asegura un crecimiento normal de los frutos y una buena floración.

Un aspecto que debe quedar claro para entender adecuadamente las relaciones entre rendimiento máximo anual, fertilización nitrogenada y precipitaciones, es el hecho de que el rendimiento del cafeto depende de la variedad, cantidad de ramas nuevas en el momento de la floración, densidad de plantación, nivel de precipitaciones, intensidad de la cosecha anterior, tipo de suelo y relieve (Forestier, 1967, Rivera, 1988) de forma tal que estas variables predeterminan un nivel de rendimiento, y la fertilización permitirá alcanzar este.

En relación con este planteamiento, se evaluó el efecto de las precipitaciones sobre el rendimiento de las plantaciones de *C. canephora*, las cuales poseían un suministro adecuado de nutrientes y se encontró que, con precipitaciones en el orden de 1 400 – 1 600 mm en ambas localidades, no se obtuvieron más de 1,30 t.ha<sup>-1</sup> de café oro.año<sup>-1</sup>; mientras que, incrementos entre 1 750 – 1 900 mm permitieron alcanzar rendimientos anuales de 1,4 a 1,8 t.ha<sup>-1</sup> de café oro. (Figura 13).

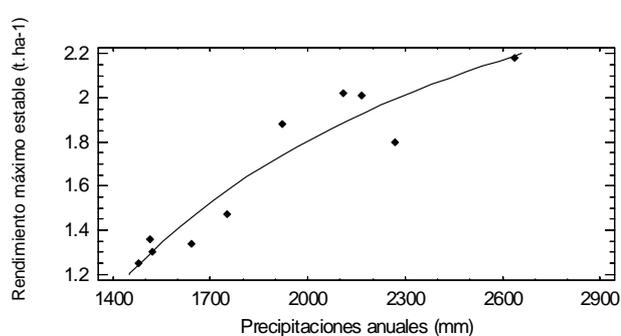


**Figura 13. Comportamiento de los rendimientos máximos estables (RME) y las precipitaciones anuales durante los dos ciclos del cafeto estudiados en ambos sitios experimentales.**

Sin embargo, cuando las precipitaciones ascendieron a 2 000 mm en ambos sitios, se obtuvieron 2 t.ha<sup>-1</sup> de café oro.año<sup>-1</sup>. Lo anterior conlleva a destacar la importancia del nivel de precipitación anual sobre el rendimiento.

Esta es una característica frecuente en el sitio La Alcarraza, pues al analizar una serie de datos desde 1983 al 2007, en el 52 % de los años se encontraron precipitaciones en el orden de 2 000 mm, no así en Tercer Frente, donde solo en el 20 % de estos años se alcanzaron tales valores de precipitaciones anuales.

Así, al integrarse los resultados de las diferentes cosechas en las etapas productivas de los dos ciclos en ambos sitios, se obtuvo una fuerte relación positiva entre las precipitaciones anuales y los rendimientos máximos estables, con una alta asociación entre las variables ( $R^2 > 90\%$ ), la cual explica en gran medida las diferencias encontradas en los rendimientos anuales entre los sitios (Figura 14).



$$y = 3,40 - 3190,95/x \quad R^2 = 90,00\% \quad Es\hat{y} = 0,12$$

**Figura 14. Relación entre los rendimientos máximos estables (y) encontrados y las precipitaciones anuales caídas (x) en ambos sitios experimentales.**

En relación con esto, Bosveld y Bouten (2001) determinaron que, la existencia de condiciones favorables de humedad propician que las plantas de *C. canephora* puedan manifestar un buen crecimiento y productividad en cualquiera de sus ciclos productivos.

Por su parte, Palacios y col. (2008) al evaluar la variabilidad climática en el oriente cubano determinaron

que la precipitación total anual es la variable que determina la mayoría de las variaciones en los rendimientos del cultivo, reafirmando a la lluvia como el elemento climático de mayor variabilidad en el país. No ocurre así con la temperatura, dado el carácter preponderadamente cálido del clima.

De forma general, las características climáticas expresadas a través de las precipitaciones, días de lluvia, en unión con las correspondientes a las temperaturas, relieve y propiedades de los suelos (Valencia, 1998; Soto, 2006) entre otros, interrelacionan e influyen sobre el crecimiento y el rendimiento del café.

El hecho de obtener una alta relación entre las precipitaciones anuales y los rendimientos máximos estables, así como que la especie *canephora* en Cuba se cosecha a partir de

enero, sugiere que el crecimiento del fruto se va a extender desde mayo hasta diciembre y por lo tanto puede aprovechar tanto las precipitaciones anuales como el fertilizante que se aplicó a inicios del mes de octubre.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Villers y col. (2009) en investigaciones realizadas en México, quienes encontraron que las precipitaciones comprendidas en el período de mayo a diciembre, aseguran el crecimiento del fruto de *C. canephora*, comenzando la cosecha a partir del mes de enero, con el inicio de la fase de maduración del grano.

Es de destacar que la relación rendimiento – precipitación no es tan simple y aquí influye además la distribución de la lluvia en función de la etapa fenológica del cultivo, el número de días de lluvia, y la propia alternancia del cultivo (Rivera, 2006).

Un ejemplo de esta interacción positiva se da en las condiciones de Pinares de Mayarí, provincia de Holguín sobre suelos del tipo Ferríticos (Ferralsoles ródicos – géricos), donde se obtienen plantaciones de *C. arabica* con un suministro adecuado de nutrientes, relacionado con un adecuado régimen de temperatura, precipitaciones (1 650 mm anuales), con 180 días de lluvia.año<sup>-1</sup> y en un relieve de meseta, todo lo cual condiciona un abastecimiento adecuado de agua para el caféto (Ochoa, 2000).

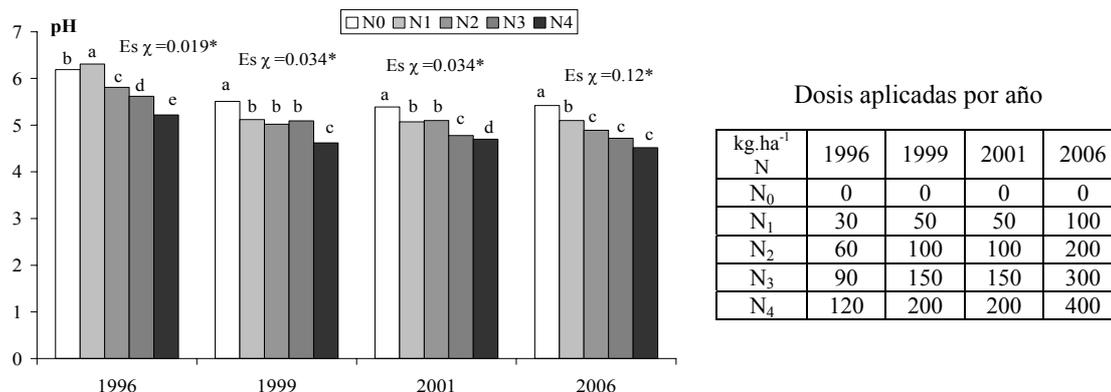
En estas condiciones de suelos Ferríticos y durante 18 años, con poda baja total cada cuatro cosechas, se obtuvieron rendimientos anuales entre 1,5 – 2,5 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, con dosis que oscilaron entre 164 y 240 kg.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de N, en función del nivel de rendimiento, las precipitaciones y del fraccionamiento utilizado (Rivera, 2006).

La situación encontrada en estos sitios, conlleva a plantear que, la especie *canephora*, cuando se favorece con las precipitaciones anuales, puede alcanzar rendimientos entre 1,5 y 2 t.ha<sup>-1</sup> de café oro, con independencia de la localidad y tipo de suelo.

#### **4.3.4. Influencia de la fertilización N sobre algunos indicadores químicos, físico – químicos y microbiológicos del suelo**

##### **4.3.4.1. pH**

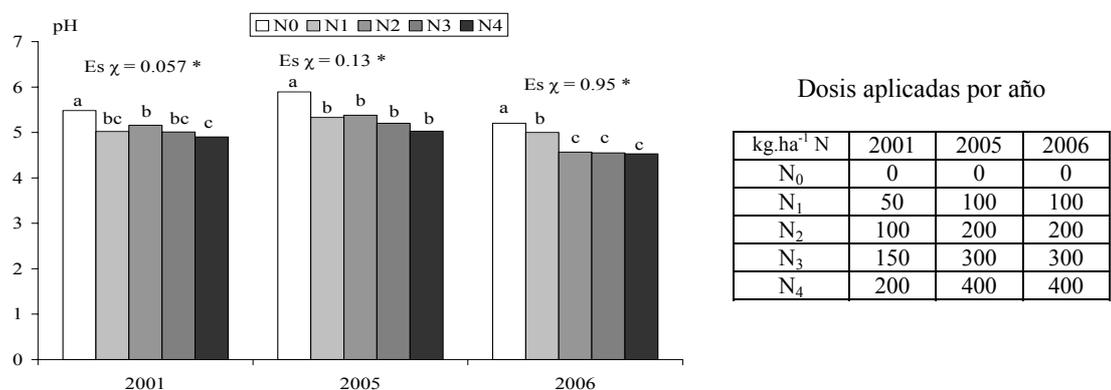
Como tendencia se encontró disminución del pH del suelo respecto a su estado inicial en la medida que se incrementaron las dosis de nitrógeno por año, la cual se acentuó con la aplicación de 400 kg.ha<sup>-1</sup> de N, hasta alcanzar valores de 4,52 – 4,60 en ambos sitios experimentales (Figuras 15 y 16).



**Figura 15. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el pH del suelo. Sitio Tercer Frente.**

Medias con letras iguales no difieren significativamente según Duncan ( $p < 0.05$ ).

Ramírez (1980) informó como valores bajos de pH para el café por debajo de 5. Similar comportamiento de disminución del pH por efecto de la fertilización nitrogenada fue encontrado por Bustamante y col. (1989) en suelos Pardos de Cuba y Sagedhian y col. (2006 a) en suelos de 25 municipios cafetaleros colombianos.



**Figura 16. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el pH del suelo. Sitio La Alcarraza.**

Medias con letras iguales no difieren significativamente según Duncan ( $p < 0.05$ ).

En coincidencia, estudios realizados sobre las características del suelo en diferentes agroecosistemas, encontraron mayor acidez en cafetales fertilizados, tendencia que fue relacionada con una dosis de nitrógeno de 300 kg.ha<sup>-1</sup> (Sadeghian y col., 2001).

Esto se debe a que los fertilizantes nitrogenados generan un excedente de H<sup>+</sup> que gradualmente reemplaza a las bases, que son lavadas y transportadas a los horizontes

subyacentes, acompañados de aniones en las aguas de percolación (Foth y Ellis, 1997; Havlin y col., 1999; Villa-Boas y col., 2005; Leal y col., 2009).

Valencia y col. (1975) en un ensayo realizado en macetas con sulfato de amonio y nitrato de amonio durante tres años, encontraron disminución de los valores del pH por los fertilizantes nitrogenados. Este mismo autor encontró valores bajos de pH, Ca y Mg en la zona de fertilización en comparación con la calle de los cafetos (Valencia, 1998).

De igual forma, Sadeghian y col. (2001) evaluaron las características del suelo en diferentes agroecosistemas y encontraron una mayor acidez en cafetales fertilizados frente al tradicional, tendencia que fue relacionada con una mayor dosis de nitrógeno.

No obstante, los valores encontrados de pH con el sistema recomendado de fertilización N para altos rendimientos ( $100 - 200 \text{ kg.ha}^{-1}$ ) en los dos ciclos productivos, fueron de  $5 - 5,81$  (ligera y ácida) y se encontraban dentro del rango establecido para el café, entre  $5 - 6,5$  (Ramírez, 1980; Carvajal, 1984; Matiello y col., 1987), no siendo por tanto un problema la aplicación de estas dosis.

#### **4.3.4.2. La materia orgánica del suelo**

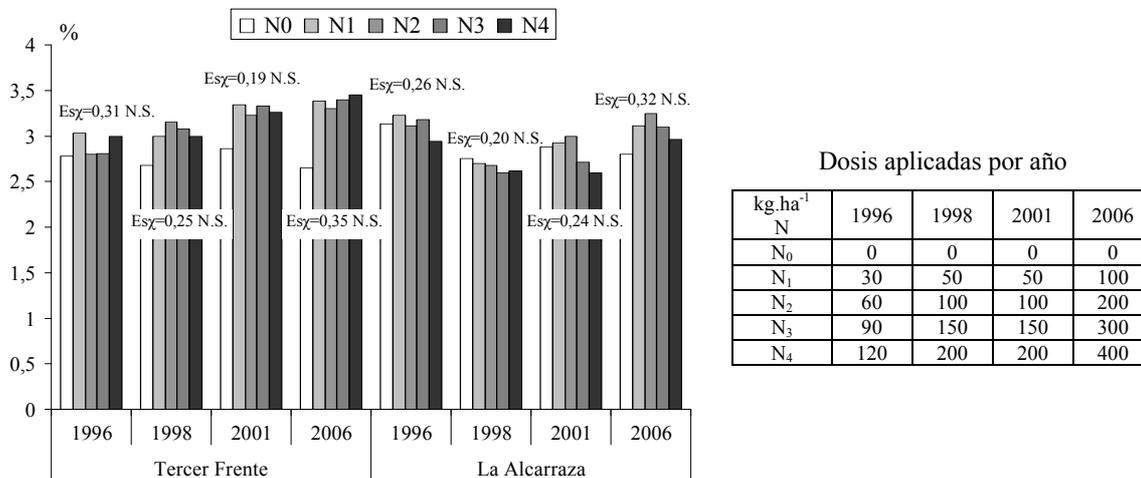
En los dos sitios no se observaron efectos negativos de la fertilización sobre la materia orgánica durante los años evaluados, sólo se encontraron incrementos de los contenidos de esta variable respecto al inicio de la investigación en 1996 (Figura 17).

Esto pudo estar influenciado por el aporte de hojarasca que realizan, no sólo el café sino también los árboles leguminosos que se utilizan como sombras, lo que permite que en los agroecosistemas cafetaleros existan suficientes reservas energéticas para mantener la actividad microbiana del suelo.

La materia orgánica y la biología del suelo desempeñan un papel importante en la calidad del suelo (SQI, 1996). Quiroga y col. (2000) afirmaron que la materia orgánica es el principal indicador e indudablemente es el que posee una influencia más significativa en la productividad del suelo; mientras que Cardona y Sadeghian (2005) opinan que la materia orgánica es un buen indicador de la disponibilidad de nitrógeno en el suelo.

Respecto a esto, Sadeghian (2003) en Colombia, con la aplicación de  $240 \text{ kg.ha}^{-1}$  de urea, no encontró cambios en la materia orgánica a través del tiempo. En Cuba, Bustamante y Rodríguez (2005) no encontraron efecto negativo de la fertilización

nitrogenada a base de nitratos sobre las propiedades químicas y físicas de un suelo Pardo ócrico sin carbonatos en un cafetal bajo sombra, durante su primer ciclo productivo.



**Figura 17. Efecto de las dosis de N en la materia orgánica (%) del suelo.** Medias con letras iguales no difieren significativamente según Duncan ( $p < 0.05$ )

De igual forma, Pavan y col. (1999) encontraron que en 15 años, el establecimiento de cafetales de alta densidad contribuye a incrementar el carbono orgánico del suelo como consecuencia de la acumulación de residuos orgánicos.

#### 4.3.4.3. La respiración biológica del suelo

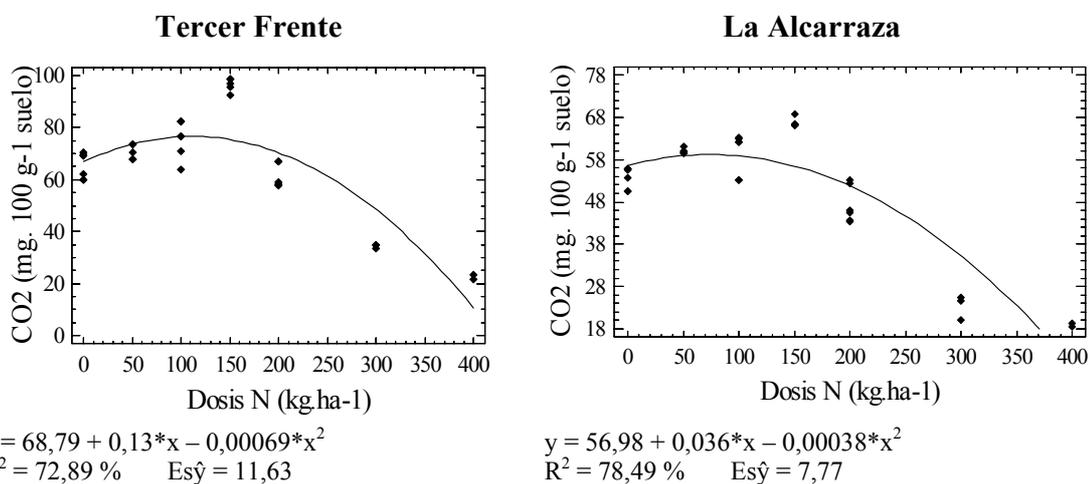
Al valorar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la respiración biológica del suelo de los diferentes sitios experimentales, se encontró que esta actividad se vio favorecida con la aplicación de dosis de N entre 100 – 150 kg.ha<sup>-1</sup> de N (Figura 18).

Se ha observado que, la presencia de determinadas cantidades de nitrógeno mineral en el suelo, permite altos niveles de descomposición del material carbonado, al posibilitar una adecuada relación C/N en el protoplasma microbiano, aumentando de esta manera el CO<sub>2</sub> desprendido producto de la biodegradación microbiana (Rodríguez, 2010).

Esto pudo estar relacionado además, con el posible efecto de las dosis de N sobre los grupos microbianos como máximos exponentes de los procesos de degradación de la materia orgánica.

El dióxido de carbono es el producto final en la mineralización de los compuestos carbonados, el cual constituye un índice de la actividad microbiana. Para la caracterización microbiológica de los suelos, se puede emplear la evaluación de los

contenidos de CO<sub>2</sub> que se desprenden al medio por este proceso, al cual se le denomina también como evolución del CO<sub>2</sub> o capacidad respiratoria del suelo y constituye un índice de la actividad microbiana en los suelos (García y col., 2000; Rodríguez, 2010).



**Figura 18. Relación entre las dosis de N y la respiración biológica de los suelos durante los dos ciclos productivos estudiados.**

Las poblaciones microbianas y los factores abióticos del suelo influyen en la emisión del CO<sub>2</sub>, lo que ha sido reportado en los sistemas tropicales y subtropicales (Muhr y col., 2008). Estos resultados coinciden con lo informado por Pandey y col. (2010) en un estudio realizado en un agroecosistema forestal de la India, donde se encontraron relaciones positivas entre las poblaciones microbianas con la respiración del suelo.

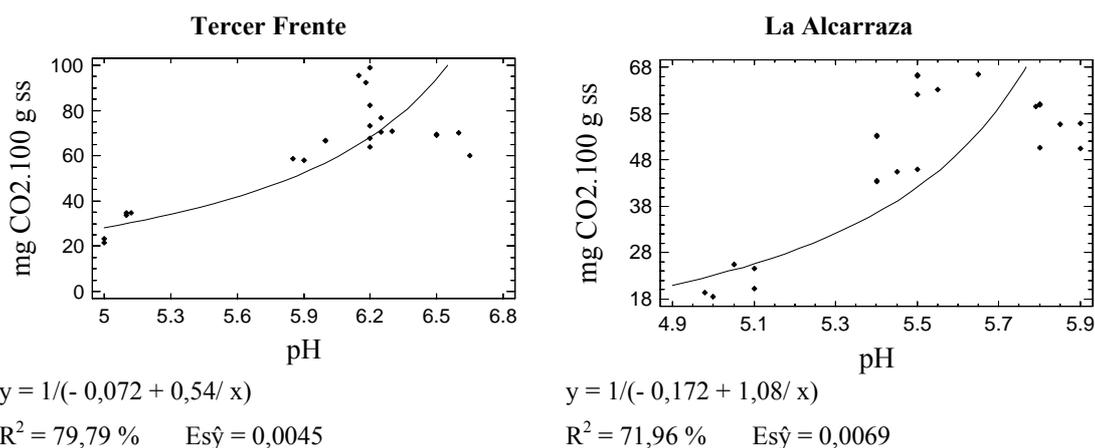
En los dos sitios experimentales, se encontró además que, en la medida que las dosis de N aumentaron hasta 400 kg.ha<sup>-1</sup> este indicador se vio deprimido.

Es importante señalar que la descomposición de las sustancias orgánicas es un proceso complejo resultante de la acción, principalmente, de hongos, bacterias y actinomicetos. No puede señalarse en la mayoría de los casos un solo organismo como causante de los cambios y aunque se postulan teorías sobre éstos, vale aclarar que han sido establecidas basadas en el comportamiento de los microorganismos en cultivos puros y sin dudas, el efecto de la población mixta de un suelo agrícola es diferente en la mayoría de los casos. Esta disminución de la respiración con dosis elevadas de N (300 – 400 kg.ha<sup>-1</sup> de N) pudo deberse a que los productos ácidos derivados de la nitrificación (ácidos nitroso y nítrico) provocan rápidamente la acidificación del suelo, en grado tal, que se inhibe la respiración del suelo (Rodríguez, 2010).

En suelo Pardo ócrico sin carbonatos (sitio Tercer Frente) se encontró mayor actividad microbiana en la rizosfera del cafeto, asociada con una mayor respiración biológica, con relación al suelo Pardo gleyzoso sin carbonatos (sitio La Alcarraza).

De esta forma, la obtención de rendimientos entre 1,22 – 1,8 t.ha<sup>-1</sup> de café oro con la aplicación de N entre 100 – 150 kg.ha<sup>-1</sup>, no provocaron afectaciones en la respiración microbiana como indicadores biológicos del suelo e incluso la aplicación de 200 kg.ha<sup>-1</sup> aunque disminuyó la respiración biológica respecto al tratamiento N<sub>1</sub>, esta actividad se mantuvo en valores semejantes o superiores al testigo sin fertilización.

Al valorar el efecto del pH sobre la respiración microbiana, se encontró relación positiva entre la respiración biológica obtenida en ambos suelos y el pH, en la medida que este disminuyó por debajo de 5, la respiración biológica se deprimió (Figura 19). Valores de pH por encima de 5,5 incrementaron la respiración biológica en ambos tipos de suelos.



**Figura 19. Relación entre el pH y la respiración biológica de los suelos durante los dos ciclos productivos**

Estos resultados coinciden con lo reportado por Heinze y col. (2010), en el cultivo de cereales en Alemania en un suelo Cambisol Haplic fertilizado con 140 kg.ha<sup>-1</sup> de N, donde encontraron relación positiva entre el pH del suelo y la respiración biológica.

Por lo que la posible causa de variación en las actividades microbianas en la zona rizosférica del cafeto producto de la fertilización nitrogenada, estará más bien influenciada por la disminución del pH en dicha zona y por la tasa de mineralización e inmovilización del nitrógeno en el suelo, que por una disminución del carbono contenidos en la materia orgánica, como fuente de energía para su metabolismo.

#### 4.3.4.4. La nitrificación de los suelos

Al analizar la actividad de nitrificación, se encontró similar tendencia en relación a las dosis de N propuestas para alcanzar rendimientos máximos estables de café en ambos sitios experimentales, es decir, que la aplicación de 75 kg.ha<sup>-1</sup> de N en el 2004 no afectó este indicador (Tabla 16).

**Tabla 16. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la nitrificación de los suelos (mg NO<sub>3</sub>,100g). Segundo ciclo productivo.**

Dosis	Tercer Frente			La Alcarraza		
	2004	2005	2006	2004	2005	2006
N <sub>0</sub> (0)	24,63 c	25,73 c	38,80 b	21,46 c	20,18 c	22,35 b
N <sub>1</sub> (75)	52,92 a			32,45 b		
N <sub>1</sub> (100)		50,50 a	53,80 a		30,15 a	33,70 a
N <sub>2</sub> (150)	53,00 a			36,17 a		
N <sub>2</sub> (200)		47,78 ab	42,05 b		30,63 a	29,15 b
N <sub>3</sub> (225)	35,33 b			34,12 b		
N <sub>3</sub> (300)		38,43 b	24,51 c		25,47 b	20,17 c
N <sub>4</sub> (300)	36,85 b			24,56 c		
N <sub>4</sub> (400)		24,30 c	21,55 c		19,40 c	18,45 c
ES <sub>χ</sub>	1,74*	3,34*	1,59*	1,25*	1,64*	1,41*

Número entre paréntesis: Dosis de N aplicada ese año (kg.ha<sup>-1</sup>). Medias con letras iguales no difieren significativamente según Duncan (p<0.05).

En el 2005, no se encontraron diferencias significativas en la nitrificación del suelo Pardo ócrico sin carbonatos de Tercer Frente, entre las dosis 100 kg.ha<sup>-1</sup> de N y 200 kg.ha<sup>-1</sup>. En ese año la dosis propuesta para el sitio fue de 200 kg.ha<sup>-1</sup> de N. No se apreciaron diferencias significativas sobre la nitrificación entre las dosis de 200 y 300 kg.ha<sup>-1</sup> de N, y entre el testigo y la aplicación de 400 kg.ha<sup>-1</sup> de N.

Sin embargo, posteriormente éste indicador se deprimió en el año 2006 y decreció con respecto al tratamiento N<sub>0</sub> con la aplicación continuada de 300 – 400 kg.ha<sup>-1</sup> de N. En el sitio La Alcarraza, a pesar de encontrarse menor cuantía de la nitrificación en el suelo Pardo gleyzoso sin carbonatos, se mantuvo igual tendencia que en el sitio Tercer Frente en relación con las dosis de N aplicadas.

Las variaciones encontradas en la nitrificación con las diferentes dosis de N, pudieron ser consecuencia de la disminución del pH en la rizosfera de la planta. El pH óptimo del suelo para la respiración y desarrollo de las bacterias nitrificantes es 6,5. No obstante,

estas bacterias pueden respirar lentamente en los suelos ácidos hasta pH 3,5 y en los alcalinos, hasta un pH 10, pero su máxima respiración y desarrollo tienen efecto en medios cercanos a la neutralidad (Rodríguez, 2010).

Por lo que las diferencias encontradas en índice de nitrificación pudo ser atribuida a ecotipos adaptados a diversos niveles de acidez, además de la existencia en los agroecosistemas cafetaleros de posibles sustancias amortiguadoras, las que resisten un cambio en la concentración de iones hidrógeno provocados por los ácidos nitroso y nítrico.

Los valores de nitrificación alcanzados en las dosis propuestas en el suelo Pardo ócrico sin carbonatos oscilaron entre 42 – 53 mg NO<sub>3</sub>.100g de suelo; mientras que en el suelo Pardo gleyzoso sin carbonatos alcanzaron de 29 – 33 mg NO<sub>3</sub>.100g de suelo.

Al respecto, Primavesi (1990) y Font (2007) informaron que en la medida en que la nitrificación sea mayor, revelará la presencia de microorganismos capaces de llevar a cabo el proceso de conversión del amonio a nitrato de forma favorable.

En investigaciones realizadas a escala de laboratorio, la presencia de amonio estimula el proceso de nitrificación, pues constituyen su sustrato inicial. Sin embargo, una fuerte concentración de iones amonio tiene acción inhibitoria sobre el género *Nitrobacter*, (Rodríguez, 2010). Este hecho, aunque no se determinó, puede estar ocurriendo en las parcelas donde se aplicaron más de 300 kg.ha<sup>-1</sup> de N al suelo.

En relación a su mayor capacidad nitrificante de los suelos Pardos ócrico sin carbonatos de Tercer Frente sobre los suelos Pardos gleyzoso sin carbonatos de La Alcarraza, puede ser atribuible a que éstos últimos permanecen por un período de tiempo prolongado con elevada humedad, lo que propicia condiciones adversas para la permanencia de la microflora nitrificante (Primavesi, 1990; Font y col., 2003) en algunos meses del año.

Las dosis de N propuestas para el segundo ciclo (100 – 200 kg.ha<sup>-1</sup> de N), no afectaron la nitrificación de los suelos, si no que favorecieron éste proceso.

En la evaluación del suelo se tuvieron en cuenta los criterios planteados por diferentes autores (Doran y Parkin, 1994; Font, 2007), tomando en consideración aquellos indicadores posibles de evaluar en las condiciones de Cuba y con resultados efectivos en los diferentes escenarios, pero que no habían sido utilizados en los agroecosistemas cafetaleros.

En general, la utilización de un conjunto mínimo de indicadores seleccionados (respiración biológica, nitrificación, materia orgánica y pH) en ambos sitios, permitió integrarse al sistema racional de recomendación de dosis N para el café y coincidió con los criterios de valores aceptables según la tabla de interpretación que se dispone en cada indicador para los suelos Pardos de Cuba recomendada por Font (2007).

#### 4.3.5. Determinación de los coeficientes de aprovechamiento. Segundo ciclo productivo

Al calcular el coeficiente de aprovechamiento del N, se obtuvieron valores que oscilaron entre 37 % y 38 % para la dosis N<sub>2</sub> (200 kg.ha<sup>-1</sup>) en los sitios Tercer Frente y La Alcarraza, respectivamente (Tabla 17). En este estudio, los valores de coeficiente de aprovechamiento se pueden considerar medios y reflejan que aun se deben buscar alternativas para incrementar la eficiencia de la fertilización, entre estas pudieran mencionarse el uso de biofertilizantes (Fernández, 2003; Rivera, 2006).

**Tabla 17. Coeficiente de aprovechamiento de N (%) por *C. canephora* cultivado sobre suelos Pardos el tercer año después de la poda. 2006.**

Sitio	Extracción total anual de N (kg.ha <sup>-1</sup> )		Coeficiente de Aprovechamiento (%)
	N <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	
<b>Tercer Frente</b>	94,20	19,50	37,35
<b>La Alcarraza</b>	98,50	22,10	38,20

N<sub>0</sub>: testigo; N<sub>2</sub>: 200 kg N.ha<sup>-1</sup>

Este aprovechamiento dependió del método empleado para estimar el mismo, que se basa en la suposición que la cantidad de nutrientes del suelo que toma el cultivo es independiente de la cantidad del nutriente aplicado (método de las diferencias).

A pesar de ser un método muy representativo, de fácil aplicación en condiciones de parcelas experimentales o áreas de producción y en el cual se logra calcular con rapidez los efectos de la aplicación de nutrientes (Martín, 2009), son mínimos los trabajos realizados para estimar el coeficiente de aprovechamiento de los fertilizantes aplicados por el método de las diferencias en el cultivo del café (Rivera, 1988; Rivera, 1993 b).

Otro aspecto que pudo haber incidido en el coeficiente de aprovechamiento del fertilizante nitrogenado obtenido fueron las altas precipitaciones ocurridas en el período, pues si bien es cierto que a mayor precipitación, mayores serán los rendimientos y estos a su vez requieren de niveles de fertilización de N más elevado, ocurre también que, a

mayores precipitaciones, se incrementan las pérdidas de N por lavados y por tanto, el aprovechamiento del fertilizante nitrogenado debe disminuir.

Es conocido que el coeficiente de aprovechamiento es un indicador en el que inciden numerosos factores: dosis del nutriente, fraccionamiento, variedad, estado fisiológico, manejo, entre otros (Snoeck, 1980; Carvajal, 1984; Rivera, 1988).

#### **4.3.6. Análisis foliar como estimador del diagnóstico nutricional de *C. canephora***

Para determinar el efecto de la fertilización mineral sobre los contenidos foliares de nutrientes, en este caso nitrógeno, en el cafeto *canephora* cultivado en suelos Pardos de premontaña durante dos ciclos productivos, se evaluó la dinámica del % N foliar, el momento de muestreo más adecuado, así como establecer los criterios para el análisis del estado nutricional de este elemento en base a sus contenidos (% masa seca) en el cuarto par de hojas de ramas fructíferas y su relación con el rendimiento, como ha sido práctica usual en las investigaciones realizadas al respecto con la especie *C. arabica* (Muller, 1966; Carvajal, 1984).

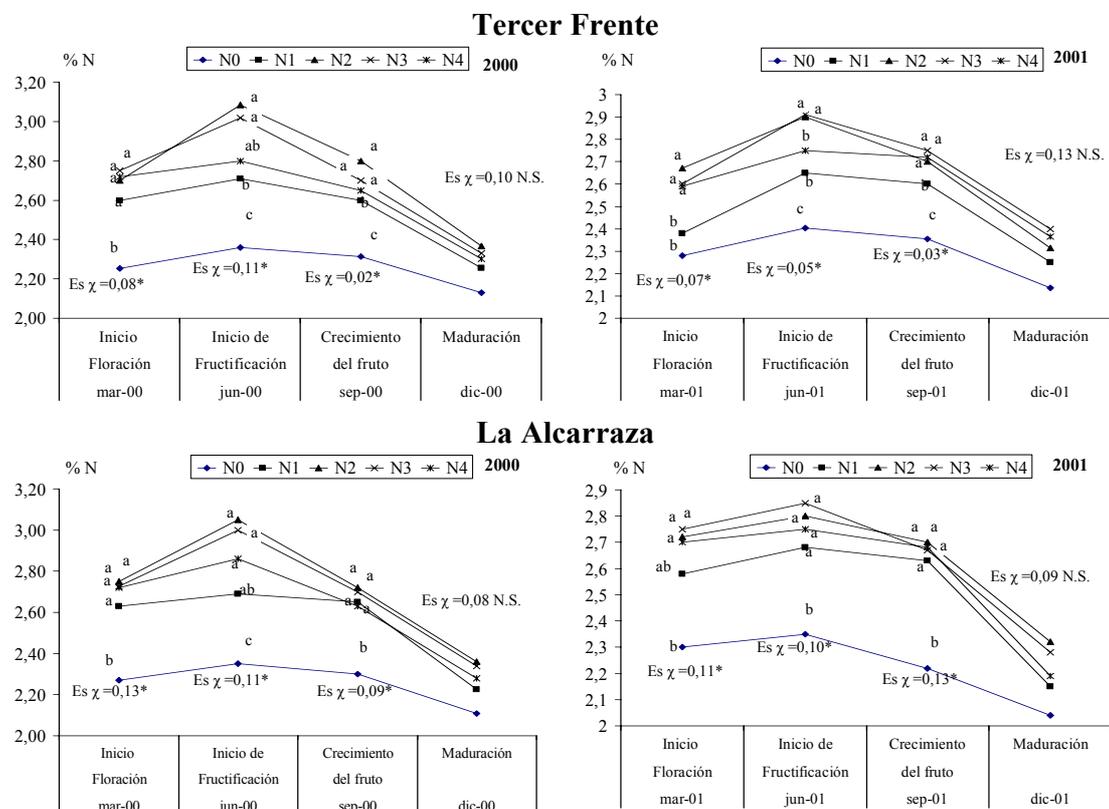
Los resultados obtenidos evidenciaron la existencia de una dinámica estacional de los contenidos foliares en los diferentes años y para cada uno de los sitios, con una respuesta positiva y significativa a la fertilización N, que desaparece en la última evaluación de diciembre, coincidente con el período de maduración (Figura 20).

La variación de los contenidos foliares de N según la época del año, denominado comúnmente variación estacional, ha sido también establecida por diversos autores en *C. arabica* (Carvajal, 1984; Matiello y col., 1987).

El tratamiento testigo (sin fertilización nitrogenada) siempre presentó valores inferiores a los tratamientos fertilizados. Estos resultados ratifican los estudios realizados en dos localidades en Costa Rica y Colombia en *Coffea arabica*, donde las bajas concentraciones de N en las hojas se encontraron en las parcelas no fertilizadas con nitrógeno (Alfaro y Ramírez, 1998; Sadeghian y col., 2006 b).

En el mes de marzo (inicio de floración), se encontraron diferencias entre los tratamientos, esto pudo deberse a la fertilización realizada el año anterior, que se refleja en mayores contenidos foliares, a pesar de aún no haberse iniciado las aplicaciones de las dosis correspondientes al año evaluado, las que comienzan a partir del mes de abril con el inicio de las precipitaciones. Este resultado parece indicar que la última

fertilización que se realiza en el año anterior, no sólo influirá en la cosecha, sino además en la formación vegetativa y en el proceso de floración del próximo año.



**Figura 20. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la concentración foliar de N durante el primer ciclo productivo para cada etapa fenológica evaluada.**

En el mes de junio (inicio de la fructificación), se encontró la mayor respuesta de la fertilización nitrogenada sobre los contenidos foliares de N, asociado con un incremento en la disponibilidad de nitrógeno y absorción por parte de la planta para garantizar la formación del grano.

Esta información permite plantear que al menos, uno de los momentos adecuados para evaluar el grado de suministro de N de un sistema de fertilización, fue el inicio de la fructificación, lo cual coincide con lo reportado por Carvajal (1984) y reflejará el estado en el que se encuentra la planta de café para satisfacer las exigencias iniciales del crecimiento de los frutos. En relación con esto, Rivera (2006) planteó que, normalmente en este momento, los contenidos de nutrientes deben ser más altos y de encontrarse valores bajos de los mismos, se cuenta con la ventaja que se puede actuar con más facilidad en la corrección del suministro de nutrientes en el propio año.

A pesar de que en septiembre (etapa del crecimiento del fruto) aún se mantiene la respuesta a la fertilización, los contenidos de N foliar de forma general disminuyen, debido a las necesidades crecientes de la planta para garantizar la formación de los frutos, lo cual origina un patrón de traslocación cuya intensidad depende de la magnitud de la cosecha, según refieren Rivera (1988) y Gallo y col. (1999).

En el mes de diciembre de cada año y sitio, se encontraron los más bajos contenidos de N foliar, sin diferencias entre los tratamientos, fenómeno asociado con los altos requerimientos de la maduración del grano y la disminución del ritmo de absorción de N en esta etapa.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Labouisse y Charmetant (2001) en diferentes clones de *C. canephora*, quienes encontraron diferencias en los contenidos de N foliar, en dependencia de la fase del cultivo.

Una vez obtenido que en estas condiciones el cafeto presentó respuesta a la fertilización mineral sobre el rendimiento y los contenidos foliares, es conveniente establecer cual es el momento de muestreo que le permita al análisis foliar ser un estimador del estado nutricional del cultivo y que refleje mejor los efectos de la fertilización sobre el rendimiento.

En la Tabla 18 se presentan los coeficientes de determinación correspondientes a las ecuaciones de mejor ajuste establecidas entre los porcentajes de rendimientos máximos estables obtenidos en cada tratamiento de fertilización y la concentración de nitrógeno foliar (%) en las fechas de muestreo, para las dos cosechas y en ambos sitios de trabajo.

El análisis integral de toda la información demostró que el muestreo de junio (inicio de fructificación) no sólo garantizó los mayores contenidos de N foliar para cada una de las dosis de nitrógeno, sino que además presentó las mayores diferencias entre los porcentajes de N en los tratamientos, de forma tal que se encontraron las mayores relaciones con los porcentajes de los rendimientos máximos estables obtenidos en cada cosecha y sitio, con altos coeficientes de determinación.

Estos resultados coinciden además, con la información que se dispone en *C. arabica* (Carvajal, 1984; Rivera y Sam, 1993) y permiten plantear que al menos uno de los momentos adecuados para evaluar el grado de suministro de N, es precisamente en el periodo de máxima demanda de la cosecha en formación. Por lo que, los valores de

nitrógeno en esta etapa podrían servir como indicadores del estado nutricional de los cafetos.

**Tabla 18. Relación entre el porcentaje de rendimiento máximo esperado y el contenido de N foliar en ambos sitios. Primer ciclo productivo.**

Meses de muestreo	Etapas fenológicas	Ecuación	R <sup>2</sup>	Es $\hat{y}$
<b>Sitio Tercer Frente</b>				
Marzo/00	Inicio de floración	y= -93,61+69,86x	86,89	6,29
<b>Junio/00</b>	Inicio de fructificación	<b>y= -68,31+56,76x</b>	<b>99,3</b>	<b>1,45</b>
Septiembre/00	Crecimiento del fruto	y= -320,00+162,73x	89,19	5,71
Diciembre/00	Maduración	y= -577,43+315,91x	38,82	13,6
Marzo/01	Inicio de floración	y= -96,39+76,15x	90,51	4,14
<b>Junio/01</b>	Inicio de fructificación	<b>y= -154,42+88,22x</b>	<b>96,4</b>	<b>2,54</b>
Septiembre/01	Crecimiento del fruto	y= -334,76+206,14x	55,87	8,93
Diciembre/01	Maduración	y= -462,75+260,07x	31,47	11,1
<b>Sitio La Alcarraza</b>				
Marzo/00	Inicio de floración	y= -109,07+74,16x	84,9	8,43
<b>Junio/00</b>	Inicio de fructificación	<b>y= -88,37+64,77x</b>	<b>98,4</b>	<b>2,73</b>
Septiembre/00	Crecimiento del fruto	y= -489,13+275,34x	63,16	13,2
Diciembre/00	Maduración	y= -66,18+89,41x	26,98	18,5
Marzo/01	Inicio de floración	y= -155,17+91,30x	82,38	11,8
<b>Junio/01</b>	Inicio de fructificación	<b>y= -123,25+75,94x</b>	<b>99</b>	<b>2,79</b>
Septiembre/01	Crecimiento del fruto	y= -209,68+140,94x	51,7	19,2
Diciembre/01	Maduración	y= -209,42+139,46x	15,36	25,4

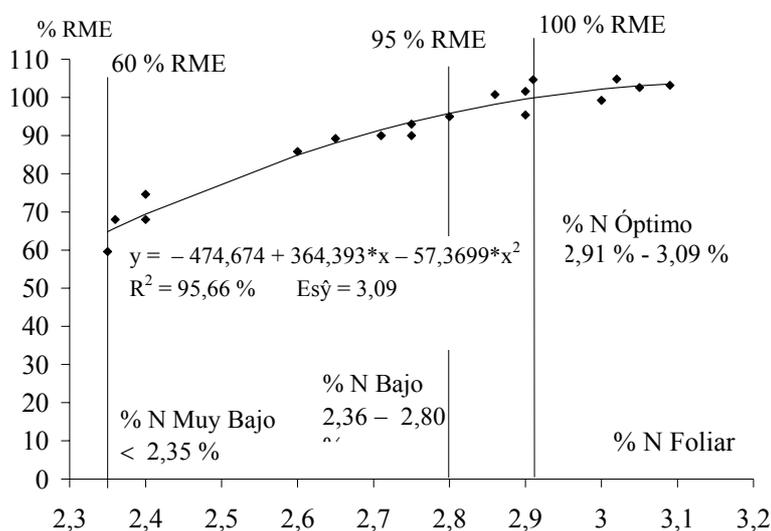
Es importante señalar la necesidad de expresar el rendimiento como porcentaje del rendimiento máximo estable anual (% RME) obtenido, si se busca relacionarlo con el contenido foliar como indicador del grado de satisfacción de la nutrición por el sistema de fertilización en cuestión y además es una consecuencia del planteamiento de Forestier (1967) de que “la relación entre los contenidos de un elemento (en este caso el N) y el rendimiento no tiene por que ser una relación sencilla, ya que la producción es la integración de diferentes factores de los cuales uno de ellos es la nutrición”.

En el caso del café esta relación se vuelve más complicada por ser un cultivo indeterminado, en el cual el rendimiento está predeterminado por el crecimiento vegetativo del año anterior (Rivera, 1993 a), ocurriendo con facilidad que dos recomendaciones de fertilización para años diferentes garanticen contenidos similares de N en las hojas y sin embargo, se obtengan diferentes rendimientos en cada año, por tener distintas cantidades de ramas nuevas en el momento de la floración del café y por tanto

no se puede usar el análisis foliar para establecer relaciones con los rendimientos absolutos, ni con las dosis de fertilización que estos requirieren.

Con relación a esto, Rivera (1988) informó que, la producción de madera nueva y el estado nutricional del cafeto, están relacionados con el rendimiento, pero no siempre la primera es una consecuencia de la segunda, estando influenciada por las condiciones climáticas, manejo, estado de la plantación, densidad y sobreproducción, haciendo que un mismo contenido pueda estar asociado con diferentes producciones.

En la Figura 21 se presenta la relación entre los porcentajes del rendimiento máximo estable y los contenidos de N foliar en el mes de junio, para los dos años evaluados en ambos sitios, proponiéndose además una valoración del estado nutricional asociado. Se consideró como valores adecuados del porcentaje de N foliar, aquellos que garantizaron más del 95 % del rendimiento máximo estable (Roberts y Dow, 1982; Rivera, 1988; Azcon-Bieto y Talón, 2000; Salgado y col., 2006; Hernández y col., 2009). Como valores bajos o indicativos de un sistema de fertilización insuficiente, aquellos que garantizaron rendimientos entre un 60 al 94 % y como valores muy bajos aquellos que se encontraron por debajo del 60 % del RME.



**Figura 21. Relaciones entre el porcentaje de rendimiento máximo estable (% RME) y el contenido de N foliar (% masa seca) en el mes de junio y el estado nutricional asociado en ambos sitios experimentales.**

Se encontró una alta y directa relación entre las variables, encontrándose que a medida que disminuyen los contenidos de N foliar, los porcentajes del rendimiento máximo

estable fueron menores; aunque los valores encontrados con el tratamiento testigo (no fertilizado) no fueron menores al 60 % RME, en correspondencia con el suministro de nitrógeno de los suelos Pardos. Al respecto, Bustamante y col. (1989) encontraron que el suministro de nitrógeno relativamente alto de los suelos Pardos permite que se alcance hasta un 60 % del rendimiento máximo estable.

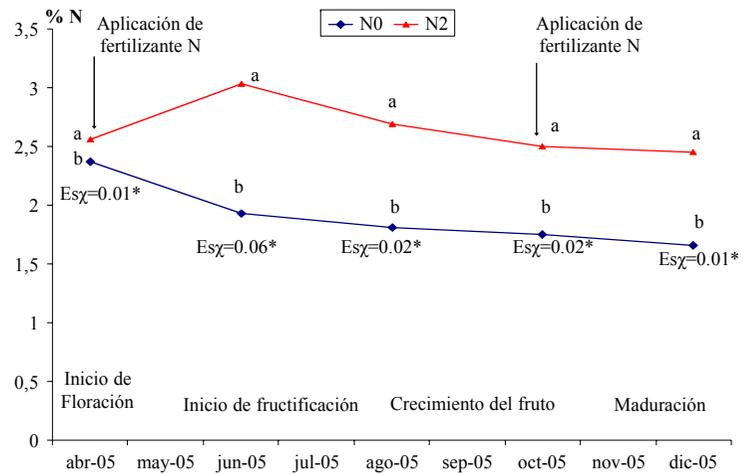
En este caso, se encontró que en cualquiera de los sitios, los mayores porcentajes del rendimiento máximo estable se obtienen con contenidos foliares de N entre 2,80 % y 3,10 % de N, lo cual indica que el suministro de N fue adecuado.

Valores por debajo de 2,80 % N se asociaron con porcentajes de rendimiento máximo estable indicativos de que el esquema del suministro de nutrientes fue insuficiente. Estos contenidos foliares condicionan menores rendimientos y un estado nutricional no adecuado de la plantación. Estos resultados son similares a los reportados por Carvajal (1984) y Partielli y col. (2002), quienes informaron como adecuados para *C. canephora* contenidos foliares por encima de 2,80 % de nitrógeno.

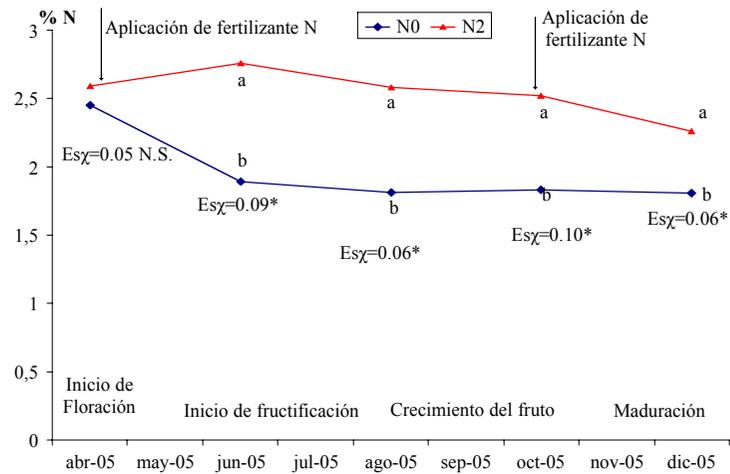
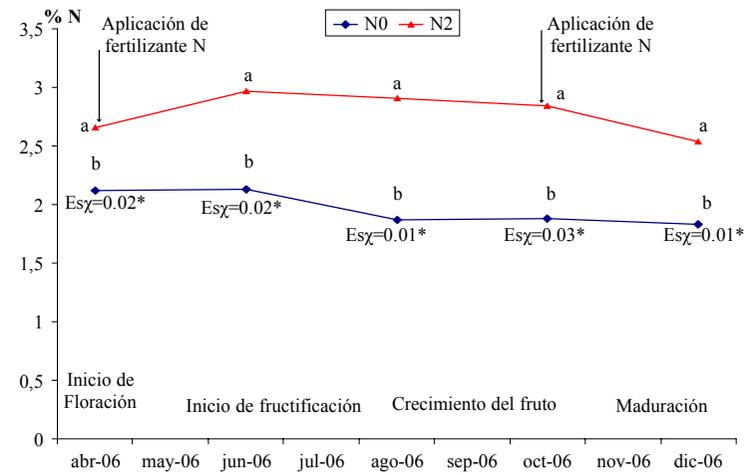
Stephens (1968) en Uganda, informó que aplicaciones de nitrógeno incrementaron los niveles de nutrientes en las hojas, pero no encontró relación significativa entre el N foliar y los rendimientos de *C. canephora*, muy posiblemente asociado a que este autor no trabajó con los porcentajes del rendimiento máximo estable. Sin embargo, esta relación se puede encontrar si se trabaja con el porcentaje de rendimiento máximo estable.

Es válido aclarar que, la zona donde se presentan rendimientos entre 95 – 100 % del RME es considerada por algunos autores como “rango crítico” (Roberts y Dow, 1982; Salgado y col., 2006; Hernández y col., 2009; Campbell, 2011), la que constituye una zona dudosa en la que no se justifica la necesidad de incrementos en el sistema de fertilización empleado.

Al comparar los resultados de la dinámica del contenido de N foliar durante el segundo ciclo (Figura 22) en los sistemas de fertilización  $N_0$  y  $N_2$ , se observó una conducta similar a la obtenida en el primer ciclo, con elevados valores de N foliar en el tratamiento fertilizado, que se hicieron más marcados en el mes de junio y a partir del comienzo del llenado del grano, disminuyó hasta alcanzar los más bajos valores en el mes de diciembre.



### Tercer Frente



### La Alcarraza

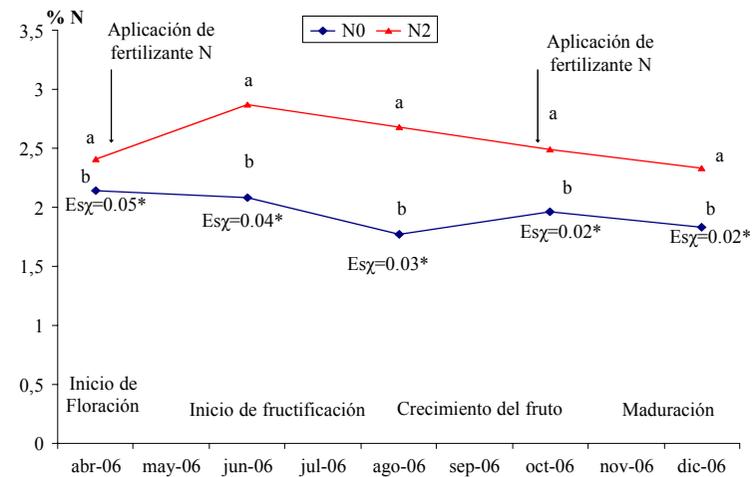


Figura 22. Efecto de la fertilización nitrogenada recomendada en el N foliar (%). Segundo ciclo.

Es de destacar como los tenores foliares de N en el tratamiento N<sub>0</sub> (testigo absoluto) fueron muy inferiores a los encontrados en este mismo tratamiento durante el primer ciclo y asociados a porcentajes de rendimiento máximo estable del orden del 60 %, mientras que en el primer ciclo representó un 70 %, explicable a que cosechas sucesivas en las mismas parcelas, sin ninguna aplicación de nitrógeno, deben llevar a un agotamiento paulatino de la fertilidad del suelo, a partir del segundo ciclo productivo.

Es en la fase de crecimiento de los frutos, donde la planta de café demanda más nitrógeno para poder satisfacer sus necesidades. Por tanto, se debe disponer de N durante ese período, mediante un manejo adecuado de fertilización, con el fin de evitar deficiencias en el cultivo (Fournier, 1980; Osorio, 2004).

De manera general, estos resultados demuestran, que en el cafeto las relaciones obtenidas entre las dosis óptimas de fertilización N y los rendimientos máximos anuales (Figura 12), así como los criterios de interpretación de los contenidos foliares de N como estimadores del estado nutricional, fueron independientes del ciclo del cultivo, todo lo cual presenta un alto valor para el establecimiento de criterios de fertilización para la especie *canephora* en suelos Pardos de premontaña.

#### **4.4. Sistema de fertilización racional nitrogenada para *Coffea canephora* cultivado sobre suelos Pardos de premontaña**

Los resultados de este estudio permiten hacer una recomendación de un sistema de fertilización racional y económica para el cafeto *canephora* cultivado sobre suelos Pardos en condiciones de premontaña de la región oriental de Cuba.

En la Tabla 19 se observa el sistema de fertilización química recomendado durante el establecimiento de la plantación, la poda y etapa productiva, en base a los rendimientos en cada año de desarrollo de los cafetos y comparado con el sistema empleado actualmente para el cafeto.

En el sistema propuesto, para garantizar el desarrollo vegetativo del cafeto, se deben aplicar, en el momento de la plantación, 90 kg.ha<sup>-1</sup> de N, posteriormente, se incrementan a 100 kg.ha<sup>-1</sup> de N en el segundo año, con un ahorro de dosis de fertilizante entre 37 y 45 kg.ha<sup>-1</sup> de N.

**Tabla 19. Sistema racional de fertilización nitrogenada recomendado para diferentes fases del cultivo de *Coffea canephora* cultivado sobre suelos Pardos en condiciones de premontaña en sus dos primeros ciclos.**

Etapas de desarrollo del café	Sistema propuesto para <i>C. canephora</i>		Instructivo Técnico del Café basado en <i>C. arabica</i> *		Diferencias (2 - 1)
	Rendimiento esperado	Dosis a aplicar (1)	Rendimiento esperado	Dosis a aplicar (2)	
	(t.ha <sup>-1</sup> café oro)	(kg.ha <sup>-1</sup> de N)	(t.ha <sup>-1</sup> café oro)	(kg.ha <sup>-1</sup> de N)	(kg.ha <sup>-1</sup> de N)
<b>Establecimiento</b>					
Primer año		90		127	37
Segundo año		100		145	45
<b>Poda (segundo ciclo)</b>					
Primer año después de la poda		75		127	52
<b>Etapa productiva</b> (para ambos ciclos)	1,00 – 1,36	100	1,00 – 1,36	228	128
	1,36 – 1,50	120	1,36 – 1,50	240	120
	1,50 – 1,80	150	1,50 – 1,80	250	100
	> 1,80	200	> 1,80	268	68

\* MINAG (1993).

La poda se ejecuta después de la cuarta cosecha y se aplican 75 kg.ha<sup>-1</sup> de N durante el primer año después de esta práctica de manejo y se ahorran 52 kg.ha<sup>-1</sup> de N a aplicar.

En la etapa productiva, se encontró una relación estrecha entre los niveles de rendimiento y las dosis de N, por lo que se debe de fertilizar en función del rendimiento esperado, manteniéndose los mismos criterios para ambos ciclos. Los ahorros por aplicación de nitrógeno entre el sistema propuesto y el actual para el café estuvieron entre 68 a 128 kg.ha<sup>-1</sup> de N.

Es importante destacar, que las dosis recomendadas en el experimento 3 se calcularon en presencia de todos los componentes del ecosistema cafetalero, por lo que el análisis de la producción de biomasa y reciclaje de N, contribuye a una mejor comprensión de estos procesos en el sistema, a la vez que coadyuvaron a que las dosis óptimas recomendadas no fueran mayores.

#### **4.5. Integración del análisis foliar con el sistema racional de fertilización nitrogenada**

A partir del estado nutricional asociado a los contenidos de N foliar determinados en el mes de junio (Figura 21) y a la relación obtenida entre las dosis óptimas de N y los rendimientos máximos estables anuales en ambos sitios estudiados (Figura 12, acápite

4.3.3), se propone una integración de estos resultados para la corrección de la fertilización nitrogenada del café Robusta.

En el caso de obtener contenidos foliares entre 2,8 – 3,10 % de N (95 – 100 % del RME), se deben mantener las dosis recomendadas para ese año. Para contenidos inferiores a 2,79 % N (< 94 % del RME), se comienzan a corregir las dosis propuestas (Tabla 20). La metodología de trabajo, basada en las ecuaciones de las Figuras 12 y 21, se describe en el Anexo 7.

**Tabla 20. Integración del análisis foliar con los resultados de recomendación de dosis de nitrógeno al café Robusta.**

Rendimientos esperados (t.ha <sup>-1</sup> café oro)			1,25 ± 0,2	1,7 ± 0,2	2,1 ± 0,2
Dosis N recomendada (kg.ha <sup>-1</sup> ) fraccionada al 50 % en abril y octubre			100	150	200
% N Foliar	Estado nutricional asociado	RME (%)	Sistema de corrección de dosis según análisis foliar realizado en el mes de junio		
3,01 - 3,10	Óptimo	100	Mantener el sistema de fertilización propuesto		
2,80 - 3,00	Adecuado	95 - 99			
2,41 - 2,79	Bajo	70 - 94	Corregir la dosis de fertilización propuesta		
< 2,40	Muy Bajo	< 69			

RME. Rendimiento máximo estable

En la Tabla 21 se presentan ejemplos de corrección de las dosis de fertilización anual utilizadas, a partir de resultados experimentales obtenidos en esta investigación. En la medida que los tenores foliares determinados en el mes de junio fueron más bajos, necesitaron una mayor dosis de N para la corrección, siempre en base a la relación encontrada entre las dosis de fertilizante N y los rendimientos máximos estables anuales y entre los porcentajes de rendimiento máximo y los porcentajes de N foliar.

**Tabla 21. Ejemplo de corrección de la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar, al obtener valores bajos de N foliar, determinados en el mes de junio.**

Rendimientos estimados (t.ha <sup>-1</sup> café oro)		1,25	1,7	2,1
Dosis N a aplicar en abril (kg.ha <sup>-1</sup> )		50	75	100
% N Foliar	RME (%)	Fraccionamiento a aplicar (kg.ha <sup>-1</sup> )*		
2,7	90,96	31,9	47,66	60,28
2,6	84,93	37,47	55,25	69,65
2,5	77,75	45,24	65,81	82,7
2,4	69,42	56,26	80,79	101,21

\*Dosis a aplicar a finales de junio o inicios de julio y a inicios de octubre. En el Anexo 7 se ofrece todo el procedimiento detallado del cálculo del fraccionamiento a aplicar.

La corrección de las dosis aplicadas en el primer fraccionamiento debe realizarse a finales de junio o en los primeros días de julio, para evitar una fuerte depauperación de la plantación por un inadecuado estado nutricional, debido a las altas exigencias de la cosecha en formación (Snoeck, 1980; Carvajal, 1984). Con posterioridad, en el último fraccionamiento planificado para los primeros días de octubre, debe también aplicarse la corrección ya estimada.

En relación con esto, Salgado y col. (2006) informaron que valores bajos de contenidos de nutrientes foliares asociados con una reducción del rendimiento, sugieren corregir el programa de fertilización; mientras que una concentración adecuada será indicativo de que el programa de fertilización es adecuado a las necesidades nutrimentales del cultivo.

#### **4.6. Análisis de la factibilidad económica de la aplicación de nitrógeno a plantaciones de *C. canephora***

En las Tablas 22 y 23 se presenta el análisis económico realizado a los tratamientos con las dosis óptimas de nitrógeno recomendadas en cada sitio experimental y por ciclo productivo. En todos los años se encontró una relación beneficio/costo superior a 4, la cual se incrementó en la medida que aumentó el rendimiento del café. En el primer ciclo la relación B/C estuvo entre 4,34 – 7,49; mientras que en el segundo fue de 4,84 – 7,62.

En el sitio La Alcarraza se alcanzaron los mayores valores de relación beneficio / costo, con un valor promedio de 6.88 y que oscilaron entre 6,1 y 7,5, con valores medios muy similares entre ambos ciclos productivos y asociado con los altos y estables rendimientos encontrados a lo largo del periodo experimental debido a la fertilización nitrogenada y las condiciones edafoclimáticas del lugar.

En el sitio de Tercer Frente si bien la relación beneficio / costo promedio fue de 6,17 y evaluada también de alta, fue menos homogéneo el comportamiento de esta relación y los valores anuales se encontraron entre 4,3 y 7,6 porque los rendimientos en valores absolutos tuvieron una mayor variabilidad debido a las condiciones de precipitaciones en ese sitio.

**Tabla 22. Análisis económico del experimento 3. Sitio Tercer Frente.**

	Año	Dosis óptima (kg N.ha <sup>-1</sup> )	R.M.E (t.c.oro.ha <sup>-1</sup> )	Valor de la producción (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Costos de producción (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Ganancia (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Beneficio económico (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Costo relativo (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Rel B/C
Primer ciclo	1999	100	0,24	3794,40	591,00	3203,40	1927,76	443,74	4,34
	2000	100	1,25	19762,50	2243,60	17518,90	5329,47	836,43	6,37
	2001	100	1,30	20553,00	2325,41	18227,59	4195,57	705,53	5,95
	2002	100	1,36	21501,60	2423,59	19078,01	5612,94	869,16	6,46
Segundo ciclo	2004	75	0,50	7905,00	989,17	6915,83	2096,75	432,85	4,84
	2005	200	2,17	34307,70	3857,94	30449,76	21662,03	2843,47	7,62
	2006	100	1,25	19762,50	2243,60	17518,90	5612,94	869,16	6,46
	2007	154	1,80	28458,00	3202,39	25255,61	13916,60	1893,40	7,35

Rel B/C: Relación Beneficio/Costo; R.M.E. rendimiento máximo estable. \*Valores expresados en CUP.

**Tabla 23. Análisis económico del experimento 3. Sitio La Alcarraza.**

	Año	Dosis óptima (kg N.ha <sup>-1</sup> )	R.M.E. (t.c.oro.ha <sup>-1</sup> )	Valor de la producción (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Costos de producción (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Ganancia (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Beneficio económico (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Costo relativo (\$.ha <sup>-1</sup> )*	Rel B/C
Primer ciclo	1999	100	0,82	12964,20	1540,02	11424,18	4762,52	770,98	6,18
	2000	112	1,34	21185,40	2403,94	18781,46	7584,19	1111,31	6,82
	2001	150	1,88	29722,80	3328,93	26393,87	15621,81	2085,39	7,49
	2002	121	1,47	23240,70	2626,46	20614,24	9133,49	1301,11	7,02
Segundo ciclo	2004	75	0,84	13280,40	1545,49	11734,91	4081,08	661,92	6,17
	2005	100	1,22	19288,20	2194,51	17093,69	6321,63	950,97	6,65
	2006	200	2,02	31936,20	3612,50	28323,70	17126,42	2319,88	7,38
	2007	200	2,01	31778,10	3596,14	28181,96	15709,05	2156,25	7,29

Rel B/C: Relación Beneficio/Costo; R.M.E. rendimiento máximo estable. \*Valores expresados en CUP.

Con relación a esto, la FAO (2002) informó que valores del B/C de 3 o superiores corresponden a ganancias muy notables, debido al alto valor de la producción obtenida en los tratamientos donde se aplicó fertilizante N en comparación con la parcela sin fertilizar.

Los resultados demuestran la factibilidad de fertilizante nitrogenado al cafeto, que garantizará elevadas producciones, que harán que las inversiones realizadas sean rentables dentro del propio año.

El análisis económico de esta investigación confirma la decisión del Estado Cubano de financiar los gastos para el fomento de las plantaciones de *Coffea canephora* en condiciones de premontaña.

Los resultados de esta investigación tributan de manera directa a la confirmación científica – técnica de la necesidad de establecer un sistema racional de fertilización nitrogenada para lograr incrementos significativos y económicos de la producción de *Coffea canephora* para condiciones de suelos Pardos de premontaña.

## 5.- CONCLUSIONES.

- El crecimiento, la producción de masa seca, la extracción anual y la productividad del *Coffea canephora* en ciclos de cuatro cosechas, no dependieron del ciclo productivo y presentaron un ritmo acelerado anual hasta su tercer año, disminuyendo a partir del cuarto año.
- El retorno de biomasa por los componentes del agroecosistema formado por *Coffea canephora* – árboles de sombra, estuvo en los rangos de 7 – 8 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de masa seca, con una liberación de N en dependencia del patrón de descomposición de los diferentes materiales estudiados.
- Se encontró una respuesta positiva y significativa entre el rendimiento y la fertilización nitrogenada, similar en ambos sitios y ciclos ( $R^2 > 93,6 \%$ ), de forma tal que en la medida que el rendimiento máximo estable fue mayor, se incrementaron las necesidades de fertilizantes, con relaciones beneficio/costo entre 4 y 7.
- Se encontró una fuerte relación entre las precipitaciones anuales y los rendimientos máximos estables, en ambos sitios y ciclos ( $R^2 > 90 \%$ ).
- El análisis foliar realizado en el mes de junio se comportó como un adecuado estimador del estado nutricional, estableciéndose criterios de interpretación del mismo para el caféto *canephora*.
- Las dosis de fertilizantes propuestas para alcanzar rendimientos máximos estables en cada sitio y ciclo productivo, incrementaron la actividad microbiana del suelo.
- Las dosis propuestas, no afectaron la materia orgánica de los suelos. Se encontró disminución del pH del suelo respecto a su estado inicial aunque los valores de este indicador, encontrados luego de la fertilización nitrogenada con el sistema propuesto, se encontraban dentro del rango establecido para el caféto.
- Se estableció un sistema de fertilización N para la especie *Coffea canephora* cultivada sobre suelos Pardos de premontaña, en función del rendimiento y los criterios de interpretación del análisis foliar.

## RECOMENDACIONES

- Introducir en las unidades y fincas productivas el sistema de fertilización racional nitrogenada propuesto, en función del rendimiento esperado, como vía para contribuir al fomento y elevación de la producción de *Coffea canephora* en los suelos Pardos de premontaña de Cuba.
- Estudiar la fijación biológica del nitrógeno de los árboles de sombra, así como las tasas de absorción por el cafeto de los diferentes residuos del agroecosistema.
- Utilizar los criterios de interpretación del análisis foliar como estimador del estado nutricional del cafeto *canephora* e incluir estos elementos en el sistema de recomendación de fertilización nitrogenada.
- Utilizar los resultados obtenidos con fines docentes por los estudiantes de pre y postgrado de las ciencias agrícolas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Afolami, C.A. 1985. An economic appraisal of N, P and K fertilizer use on mature Robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre ) at Isuada plantation, Nigeria. *Café Cacao Thé*. 29 (91): 31 – 36.
2. AGRIANUAL. F.N.P. 2005. Consultorías y Comercio. Anuario do Agricultura Brasileira. Sao Paulo. 544p.
3. Alef, K. y Nannipieri, P. 1995. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, London. 155p.
4. Alfaro R. y Ramírez J. 1998. Estudio de la respuesta a la fertilización con varias fuentes de nitrógeno. Memoria IV Seminario Resultados y Avances de Investigación. Costa Rica.
5. Alexander, M. 1980. *Introducción a la Microbiología del Suelo*. Editorial México-Calypso. 467 p.
6. Alkorta, I., Aizpurrúa, A., Riga, P., Albizu, I., Amegaza, I. y Garbisu, C. 2003. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. *Rev. Environ. Health*, 18: 65-73.
7. Alva, A.K.; Fares, A. y Dou, H. 2003. Managing citrus trees to optimize dry mass and nutrient partitioning. *Journal Plant Nutrition*. 26 (8):1541-1559.
8. Amaral, J.F.T.do; Prieto, Herminia E.; Laviola, B.G.; Filho, E.I.F.; Cruz, C. D. 2011. Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. *Ciência Rural*, Santa Maria, 41 (4): 621 – 629.
9. Anderson J.M. e Ingram J.S.I. 1996. *Tropical soil fertility: a handbook of methods* Cab International, 2nd edition, UK, 36-40.
10. Anónimo. 2007. Leaf analysis. Disponible en [www.coffeeresearch.org/agricultura/leaf analysis.htm](http://www.coffeeresearch.org/agricultura/leaf%20analysis.htm). <Consultado en julio 2007>.
11. Aranguren, J.; Escalante, G. y Herrera, R. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees: I. Coffee. In: *Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America and the Caribbean*. *Plant and Soil* 67: 247-258.
12. Arizpe, R.N.G. 2005. Impactos de la variabilidad y el cambio climáticos en los agroecosistemas cafetaleros en Huatusco, Veracruz. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. 80 pp.

13. Arcila, J. 1988. Tecnología del cultivo del café. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia 2da edición. 120 pp.
14. Arellano R; J.; Paolini, L. Vásquez y Mora, E. 2004. Producción y descomposición de la hojarasca en tres agroecosistemas de café en el estado Trujillo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*. 48 (1): 7 – 14.
15. Assis, E.P.M.; Cordeiro, M.A.S.; Paulino, H.B. y Carneiro, M.A.C. 2003. Efeito da aplicação de nitrogênio na atividade microbiana e na decomposição da palhada de sorgo em solo de cerrado sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia. 33 (2):107-112.
16. Astier C. M. 2002. El efecto de la leguminosas en el mejoramiento de la calidad del suelo de ando en sistemas agrícolas de ladera en la cuenca del lago de Zirahuén. /Astier C. M Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias, UNAM. 90 p.
17. Azcón-Bieto, J. y Talon, M. 2000. Fundamentos de fisiología vegetal. Ediciones Universidad de Barcelona. McGraw-Hill. Interamericana. España. 515 p.
18. Bautista, C. A.; Etchevers B.; del Castillo R.F. y Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 2004/2 (URL: [www.aeet.org/ecosistemas/042/revision2.htm](http://www.aeet.org/ecosistemas/042/revision2.htm)).<Consultado el 10 septiembre de 2005>.
19. Blanco, A. 2005. Manejo de la sombra en la regeneración de la variedad Robusta (*Coffea canephora* Pierre). Su influencia en el desarrollo vegetativo y la producción de café oro. Tesis de grado (Doctor en Ciencias Agrícolas), UNAH, 100p.
20. Blanco, N. 1992. Deficiencias nutricionales en café. Gremio Nacional de Café. Boletín Técnico No. 4, septiembre-octubre. Managua. Nicaragua. 12p.
21. Bolotina, N. I. y Abramova, E. A. 1968. Método para determinar la capacidad nitrificadora del suelo. *Agrojimia*, 4: 136- 141. [en ruso].
22. Bosveld, C.E. y Bouten, W. 2001. Evaluation of transpiration models with observations over a Douglas fir forest.. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108: 247 – 264.
23. Burbano, O.H. 1994. La materia orgánica del suelo en el contexto de una agricultura sostenible. En: Silva, M.F. Fertilidad de los suelos, diagnóstico y control. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencias del Suelo. 187 – 217.

24. Bustamante C; Rodríguez; Maritza I.; Camejo, R. y Ochoa, M. 1989. Informe de etapa. Efecto de los tratamientos sobre el crecimiento e índices agroquímicos en el período. Informe del resultado 003-046. Cruce de los Baños: ECICC, 1989. 30 p.
25. Bustamante, C.; Ochoa, M. y Rodríguez, Maritza I. 1997. Balance de tres fertilizantes nitrogenados  $^{15}\text{N}$  en un Oxisol Cubano cultivado con *Coffea arabica* L. Tropicultura. 15 (4): 169 – 172.
26. Bustamante, C.; Viñals, R.; Pérez, A. y Araño L. 2002. Sistema de fertilización mineral y biofertilización de *Coffea canephora* Pierre cultivado bajo las condiciones de los macizos Sierra Maestra y Nipe – Sagua – Baracoa. Informe. Agencia de Medio Ambiente. 95 p.
27. Bustamante, C. y Grave de Peralta, G. 2002. Producción de biomasa y retorno de nutrientes al ecosistema por *Coffea canephora* Pierre bajo diferentes sistemas de poda. En: XII Seminario Científico del INCA. Resúmenes.
28. Bustamante, C. y Rodríguez, M.aritza I. 2005. Efecto de la fertilización nitrogenada a base de nitrato chileno sobre algunas propiedades del suelo y el rendimiento del café. En: III Simposio Internacional de Café y Cacao. Santiago de Cuba, Cuba. Programa y Resúmenes.
29. Bustamante, C.; Rodríguez, Maritza I.; Viñals, R. y Pérez, A. 2007. Contribución al ciclo de nutrientes en el agroecosistema cafetalero. Biomasa y aporte de nutrientes al suelo. Café Cacao, 8 (2): 29 – 35.
30. Bustamante, C.; Viñals, R.; Pérez, A.; Rodríguez, M.I. y Araño, L. 2010. Fertilización mineral y uso de abono verde en *Coffea canephora* Pierre ex - Froehner cultivado bajo poda sistemática en los macizos montañosos de la Sierra Maestra y Sagua - Nipe – Baracoa. Informe final Proyecto Nacional 07.03.087. Cruce de los Baños: ECICC. 253 p.
31. Cabezas, W. A. R. 2008. Atividade microbiana do solo e produtividade do Milho em função da aplicação antecipada de nitrogênio e adensamento de palha. Bragantia, Campinas, 67 (4): 899 – 910.

32. Cabrera M.; López, C.; Portilla, M.; Díaz W. y Bustamante, C. 1998. Descripción de clones de *Coffea canephora* en el Tercer Frente. *Café Cacao* 1(1): 23 – 28.
33. Calero, B.J.; Guerrero, A.; Alfonso, C.A.; Somoza, V. y Camacho, E. 1999. Efecto residual de la fertilización mineral sobre el estado microbiológico del suelo. *La Ciencia y el Hombre*. XI: 89 – 94.
34. Caldato Silvana L.; Floss, A. y Serafini Floss, Elzira C. 2010. Litter production and decomposition in a mixed araucaria forest in the south of Brazil. *Bosque*, 31 (1): 3 – 8.
35. Camargo A.P. y Camargo M.B.P. 2001. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. *Bragantia*, 60: 65 – 68.
36. Campbell, C. R. 2011. Reference sufficiency ranges vegetable crops. Tomato, greenhouse (en línea) Disponible: ([http:// www. Ncagr .com /AGRONOMI/saaesd/authors](http://www.Ncagr.com/AGRONOMI/saaesd/authors)). <[Consulta: 15-6-2011]>.
37. Cannell M. G. R. 1970. Production and distribution of dry matter in trees of *Coffea arabica* L. in Kenya as affected by seasonal climate differences and the presence of fruits. *Ann. Appl. Biol. (Wellesbourne)*, 67:99 – 120.
38. Cannell , M.G. R. 1976. Crop physiological aspects of coffee bean yield . *Kenya Coffee*, 41 (464): 245 – 253.
39. Cardona, D.A. 2004. Caracterización de la fertilidad del suelo y ciclo de nutrientes en monocultivo de café (*Coffea arabica* L.) y bajo sombrío de guamo (*Inga* spp.). Bogota, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medioambiente y Recursos Naturales. 178 p.
40. Cardona, D. y Sadeghian, S. 2005. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrío de *Inga* spp. *Cenicafé*, 56 (2):127 – 141.
41. Carvajal, J.F. 1969. La toma de muestras foliares en cafeto para fines de diagnóstico. Universidad de Costa Rica. Facultad de Agronomía. Boletín Informativo, No.2.

42. Carvajal J. F. 1984. Cafeto, cultivo y fertilización. J. F. Carvajal-Berna: Ed. Instituto Internacional de la Potasa. 254 p.
43. Carvalho, A.; Guimarães, A.; Carvalho, G.; Botelho, C. y Gonçalves, Flávia Maria. 2010. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 45 (3):269 – 275.
44. Castillo, G. 1997. Tecnología para la producción de café en México. INIFAP. Folleto Técnico Num. 8. 2ª. reimpresión. Abril, 90 p.
45. CENICAFE. 2005. El desmucilaginado mecánico del café. Disponible en: [http://www.cabcommodities.org/ Coffee/ IPA website /HTML Files / .htm](http://www.cabcommodities.org/Coffee/IPA_website/HTML_Files/.htm). <Consultado el 16 de mayo 2009>.
46. Chaveli, P.; Calero, B.; Font, Lisbet.; Francisco, A.; López, P.; Caballero, R. y Valenciano, M. 2003. Uso de indicadores microbiológicos para la evaluación de la degradación de suelos Oscuros Plásticos arroceros de la provincia de Camagüey. *Centro Agrícola*. Año 30 Julio-Sept. 61 – 66 p.
47. Chávez J.C.D. 2002. Manejo do solo. Adubação e calagem, ante e após a implantação da lavoura cafeeira, Londrina: Instituto Agrônômico do Parana. 36 p. Circular No 120.
48. Chávez, V. y Molina, E. 2005. Extracción anual de nutrientes por los cultivares Costa Rica 95 y Catuai. Disponible en: [www. iica.org.gt /promecafe / resultados\\_simposio.htm](http://www.iica.org.gt/promecafe/resultados_simposio.htm). <Consultado en septiembre de 2005>.
49. Chien, S.H.; Gearhart, M.M. y Collamer, D.J. 2009. Acidez generada por los fertilizantes nitrogenados: Nueva evaluación de los requerimientos de cal. *Informaciones Agronómicas*, 72: 11-12.
50. Chirinos H. 2002. Fertilización del cafeto. [www.ppi-far.org/ppiweb/iamex.nsf](http://www.ppi-far.org/ppiweb/iamex.nsf). <Consultado el 9 julio 2002>.
51. Cietto, S.; Haag, H.P. y Dechen, A.R. 1991. Acumulação de matéria seca, absorção de N, P e K pelo cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí) com dois, tres, quatro e cinco anos de idade, nas fases fenológicas de repouso, granação e maturação vegetando em um latossolo vermelho amarelo, fase cerrado. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*. v. 48 p. 245 – 268.

52. CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2008. 1.º Levantamento de café 2008 – Café, 2008. Disponible en: <http://www.conab.gov.br/conabweb>. <Consultado en enero de 2008>.
53. Córdova, Georgina. 2010. Mineralización de nitrógeno de diferentes abonos orgánicos. Tesis presentada para obtener el grado de Master en Ciencias. H. Cárdena, Tabasco, México. Colegio de Posgraduados. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, Campus Tabasco, 85 p.
54. Cotrufo, M.F.; Briones, M.J. e Ineson, P. 1998. Elevated CO<sub>2</sub> affects field decomposition rate and palatability of tree leaf litter: Importance of changes in substrate quality. *Soil Biol. Biochem.*, 30 (12): 1565 – 1571.
55. Cuba. Academia de Ciencias de Cuba (ACC). 1989. Nuevo Atlas Nacional de Cuba, La Habana.
56. Cuba, ONE. Oficina Nacional de Estadística. 2010. Panorama económico y social de Cuba. Ciudad de la Habana: ONE, 25p.
57. Da Matta, F.M. 2004. Ecophysiological constraints on the production of shoded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research*, vol. 86: 99-114. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr2003.09.001>. <Consultado el 4 de octubre de 2009>.
58. Da Matta, F. y Rodríguez, N. 2007. Producción sustentable de cafetales en sistemas agroforestales del geotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana*, 25 (1): 113 – 128.
59. Da Silva, A.; Arf, O.; Buzetti S.; da Silva, M.. 2008. Fontes e épocas de aplicação de nitrogênio em trigo em sistema plantio direto no Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 2717 – 2722, Número Especial.
60. Dawoe, E.K.; Isaac, M.y Sullivan, J. 2009. Quashie-Sam. Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant and Soil*. DOI 10.1007/s11104-009-0173-0. 2009.
61. De Polli, H.; Guerra, J. G. M. 1997. Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo: método de fumigação-extração. Seropédica: Embrapa-Agrobiología. Documentos (37). 10 p.

62. Díaz W. 1990. Manejo de plantaciones de cafetos *Coffea arábica* L var. Caturra, en especial: la poda y la sombra. Tesis de grado (Doctor en Ciencias Agrícolas), INCA, 101 p.
63. Díaz W.; Bustamante, C.; Caro, P.; Cumbá, B. 2003. Establecimiento y manejo de plantaciones de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner. Informe final Proyecto Nacional 007-03-016. Cruce de los Baños: ECICC. 352 p.
64. Díaz, W. Vázquez E., G. Molina, R. Reyes. 2007. Manejo de la poda quinquenal de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner. *Café y Cacao*, 8 (2): 15 – 23.
65. Dommergues, Y. 1960. La notion de coefficient de mineralization du carbone dans les sols. Un exemple d'utilisation des techniques biologiques. *Agron. Trop.*, 1 (1): 54 – 60.
66. Doran, J.W. y Parkin T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. J.W. Doran y col. (eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment*. SSSA Spec. Publ. 35 SSSA and ASA, Madison, WI.
67. De Armas, R.; E. Ortega y Rodés, Rosa. *Fisiología vegetal*. La Habana: Ed. Pueblo y Educación. 1988. 325 p.
68. Dos Reis, A.R.; Furlani, E.; Buzetti, S. y Andreotti, A. 2006. Diagnóstico da exigência do cafeeiro em nitrogênio pela utilização do medidor portátil de clorofila. *Bragantia*, Campinas, 65 (1):163 – 171.
69. FAO. 2002. Los fertilizantes y su uso. Una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. Cuarta edición. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. Roma. 76 p.
70. Fenilli, T.; Reichardt, K.; Dourado-Neto, D.; Ocheuze Trivelin, P.; Favarin, J.; Pereira da Costa, F. y Santos Bacchi, O. 2007. Growth, development and fertilizer -15 N recovery by the coffee plant. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 64 (5): 541 – 547.
71. Fernández, F. 2003. La simbiosis micorrízica arbuscular. En: Rivera, R. y Fernández, K.(Eds). *Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica, una vía hacia la agricultura sostenible. Estudio de caso: el Caribe*. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana., 166 p.

72. Fixen, P.E. y F.O. García. 2007. Decisiones efectivas en manejo de nutrientes más allá de la próxima cosecha. *Informaciones Agronómicas*, 64: 5 – 11.
73. Font, Lisbet 1999. Uso de indicadores microbiológicos para evaluar el efecto a largo plazo de la fertilización mineral en un agroecosistema cítrico. Tesis en opción al grado de Master en Ciencias. Universidad de Camaguey. Cuba. 68 p.
74. Font, Lisbet; Chaveli, P.; Calero, B. 2001. Estado microbiológico del suelo Ferralítico Rojo como base para la planificación, uso y manejo integral de agroecosistemas cítricos. *Boletín de la Sociedad Cubana de las Ciencias del Suelo*, No.4. p.188.
75. Font, Lisbet; Chaveli, P.; Calero, B.; Francisco, A.; López, P.; Caballero, R.; Valenciano, M. 2003. Impacto de algunos procesos degradantes sobre el estado microbiológico de un suelo Ferrasol cultivado de arroz. *Centro Agrícola*, No. 3, año 30, jul.-sep. 67 – 70.
76. Font, Lisbet; Chaveli, P.; Calero, B.; Guerra, A.; López, P.; Valenciano, M.. 2005. Evaluación del estado microbiológico de un Cambisol Ferrálico cultivado de papa con diferentes manejos de fertilización. *Centro Agrícola No 1* enero-marzo. p: 71 – 79.
77. Font Lisbet 2007. Estimación de la calidad del suelo: criterios físicos, químicos y biológicos. Resumen de Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. Instituto de Suelos. La Habana, 30 p.
78. Forestier, J. 1967. El potasio y el café Robusta. *Fertilité (París)*, 30:3 – 63.
79. Forster, J. C. 1995. Soil physical analysis. Determination of the gravimetric water content and soil dry mass. In: *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Ed. Kassem Alef and Paolo Nannipieri., Chapter 3, 105 - 116.
80. Foth, H.D.; Ellis, B.G. 1997. *Soil fertility*. 2da. edición. Boca Raton, Lewis Publishers. 290 p.
81. Fournier, L. A. 1980. Fundamentos ecomorfofisiológicos de importancia en la nutrición mineral del café. In *PROMECAFE. Curso Regional sobre Nutrición Mineral del Café*. San José, Costa Rica: IICA. 23 p.
82. Fournier L.A. y Di Stéfano J.F. 2004. Variaciones climáticas entre 1988 y 2001, y sus posibles efectos sobre la fenología de varias especies leñosas y el manejo

- de un cafetal con sombra en Ciudad Colón de Mora, Costa Rica. *Agron. Costa Rica*, 28:101 – 120.
83. Gallo, P.B.; Van Raij; Quaggio, J.A.; Esteves, L.C. 1999. Resposta de cafezais adensados a adubação NPK. *Bragantia*, Campinas, 58 (2): 341 – 351.
84. Garbisu, C.; Becerril, J.M.; Epelde, L. Alkorta, I. 2007. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistema*, 16 (002) :1697 – 2473.
85. García, C.; Hernández, T., Pascual, J.; Moreno, J L.; Ros, M. 2000. Actividad microbiana en suelos del sureste español sometidos a procesos de degradación y desertificación. Estrategias para su rehabilitación. En García, C., M. T. Hernández (Eds), *Investigación y perspectivas de la enzimología de suelos en España*. 147 – 273.
86. García, M. 1997. Contribución al estudio y utilización de los abonos verdes en cultivos económicos desarrollados sobre un suelo Ferralítico Rojo de La Habana. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. La Habana. 98 p.
87. Gonçalves M.; Fazuoli, L. C.; Baião de Oliveira, A. C.; Gallo, P. B.; Mistro, J. C.; Bernadete, M.; Toma-Braghini, M.. 2008. Melhoramento genético vegetal. divergência genética entre progênies de café Robusta. *Bragantia*, Campinas,67 (4): 823 – 831.
88. Gorsline, D.L. 2000. Coffee talk: A Glossary for Birders, American Birding Association Inc.p. 5 – 8.
89. Gourete, Duarte E. 2007. Ciclagem de nutrientes por árvores em sistemas agroflorestais na Mata Atlântica. Tesis presentada en la Universidad Federal de Viçosa para la obtención del título de Magister Scientiae. Viçosa, Minas Gerais, 132 p.
90. Grava De Godoy, L.J; Thiago da Silva, S.; Lyra Villa, R.; Batista Leite, J. 2008. Relative chlorophyll index and nitrogen status of fertizated coffee plants during the crop season. *Rev. Brasileira Ciencia do Solo*, 32 (1):1 – 10.

91. Guerrero, R.R. 1994. Propiedades generales de los fertilizantes químicos. In: Silva, M.F. (eds). Fertilidad de suelo, diagnóstico y control. Bogota, Sociedad Colombiana de las Ciencias del Suelo. p. 221 – 245.
92. Gunadi, B.; Verhoef, H.A. ; Bedaux, J. J. M. 1998. Seasonal dynamics of decomposition of coniferous leaf litter in a forest plantation (*Pinus markusii*) in Central Java, Indonesia. *Soil Biol. Biochem.* 30 (7): 845 – 852.
93. Harding P. E. 1993. Seasonal fluctuations in leaf nutrient contents of fertilised and unfertilised *arabica Coffee* in Papua New Guinea. In. Proceeding 15 Conferencia Científica Internacional. Montpellier.
94. Harmand, J.M; Ávila, H; Dambrine, E; Skiba, U; de Miguel, S; Renderos, Reina V.; Oliver, R; Jiménez, F.y Beer, J. 2007. Nitrogen dynamics and soil nitrate retention in a *Coffea arabica* — *Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica. *Biogeochemistry.* 85 (2): 125 – 139.
95. Hartemink, A.E. y O'Sullivan, J. N. 2001. Leaf litter decomposition of *Piper aduncum*, *Gliricidia sepium* and *Imperata cylindrical* in the humic lowlands of Papua New Guinea. *Plant and Soil* 230:115 – 124.
96. Havlin, J.L., Beaton, J. D., Tisdale, S.L., Nelson, W. L. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6 Ed. Upper Saddle River, Prentice Hall. 499 p.
97. Heinze, Stefanie; Raupp, J. y Joergensen, R. G. 2010. Effects of fertilizer and spatial heterogeneity in soil pH on microbial biomass indices in a long-term field trial of organic agriculture. *Plant Soil*, 328: 203 – 215.
98. Hernández, A., Ascanio, M.O., Cabrera, A., Morales, M., Medina N. 2003. Nuevos aportes a la clasificación de suelos en el ámbito nacional e internacional. En: Problemas actuales de la clasificación de suelos: Énfasis en Cuba. Veracruz: Universidad Veracruzana. México. 130 p.
99. Hernández, A.; Vantour, A.; Morales, M.; Fuentes, E. 2006. Suelos dedicados al café en Cuba. / En: R. Rivera, F. Soto (eds). El cultivo del café en Cuba. Investigaciones y Resultados, 2006. p.500. ISBN 959-7023-37-7.
100. Hernández, M.R. y Rayo, B.A. 2007. Tasa de mineralización del nitrógeno en el suelo bajo diferentes manejos agroforestales con *C. arabica*

- realizado en 2002 y 2006 en el pacífico sur de Nicaragua. Trabajo de Diploma. Univ. Nacional Agraria. Facultad de Agronomía. Managua. Nicaragua. 40 p.
101. Hernández, María I.; Arozarena, N. J. y Chailloux, Marisa. 2009. Rango crítico de nitrógeno y potasio en hojas indicadoras para dos épocas de plantación en el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Híbrido HA-3019. *Cultivos Tropicales*, 30 (4):79 – 86.
  102. Iniciativas de Economía Alternativa y Solidaria. IDEAS. 2006. El mercado internacional del café. Actualización. Boletín, 14. Córdoba. España. 47p.
  103. Instituto de Investigaciones de Fruticultura Tropical (IIFT). 2011. Metodología y modelos para la elaboración de las tecnologías. Campaña 2011. Ciudad de la Habana. 30 p.
  104. INSMET. 2011. Hojas de asentamiento de las variables meteorológicas diarias. Estaciones meteorológicas de Sagua de Tánamo, Holguín y Tercer Frente, Santiago de Cuba. Instituto de Meteorología. CITMA. Cuba.
  105. Irigoin, J. 2004. Elaboración de un índice de Calidad de Suelo utilizando Indicadores Edáficos. Estudio de caso a escala de campo. Trabajo Final de aplicación para el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Nacional de Luján.- 60 p.
  106. Isemeyer, H. 1952. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden In: *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Kassem Alef and Paolo Nannipieri (eds.) Acad. Press., Chapter 5, p. 215 – 217.
  107. Jayarama, R.P.; Ananda A. y Naidu, R. 1994. Latest concept of fertiliser usage in coffee plantations with respect to Nitrogen, Phosphorus and Potassium. *Indian Coffee* LVIII (9): 9 – 12.
  108. Jenkinson, D.S. 1992. La materia orgánica del suelo: evolución. En: *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. P.U. Terrón, C. Rojo. (Eds). Mundi Prensa. 500 p.

109. Jiménez, A. y Martínez, V. 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero: II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biotica* 4 (3): 109 –126.
110. Jimenez, A.; Farfán F.; Morales, C. 2005. Descomposición y transferencia de nutrientes de *Cajanus cajan*, *Crotalaria juncea* y *Tephrosia candida* como abonos verdes en cafetales. *Cenicafé*, 56 (3): 216 – 236.
111. Kibirige - Ssebunya I.; Nabasirye, M.; Matovu, J.; Musoli, P. 1993. A comparison among various Robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre) clonal materials and their seedling progenies at different levels of nitrogen. *Uganda Journal of Agricultural Science*. 1(1): 5 – 12.
112. Kumar, O. 1979. Some Aspect of the Physiology of *Coffea arabica*; a Review. *Kenya Coffee*. 44 (519) : 9 – 47
113. Krishnamurthy, R.W.1992. Rationalisation of application of fertiliser inputs in coffee *Indian Coffee*, 56 ( 6 ): 9 – 12.
114. Krishnamurthy R. W. 1994. Fertiliser managment in coffee. *Indian Coffee*. LVIII (9): 5 – 7.
115. Kuprevich, V.F. 1974. Estudio de la actividad enzimática en suelos diferentes (En ruso). *Nauch. Trud. Izd. Moskva*, 4: 145 – 190.
116. Labouisse, J.P.y Charmetant, P. 2001. Response of *Coffea canephora* Pierre clones to soil mineral deficiency. In. *Colloque Scientifique International Sur le Café*. 19. Trieste (Italia). Paris: ASIC.
117. Leal L.; Salamanca, A y Sadeghian, S. 2009. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Inform. Agronómicas*. 74:1 – 4.
118. Li, Y. y Lindstrom, M. J. 2001. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and sep hillslope. *Soil Sci. Am. J.* 65:1500 – 1508
119. López, A.M. 1965. Cambios químicos provocados en el suelo franco-arenoso de Chinchina con la aplicación de distintas fuentes y dosis de fertilizantes. *Cenicafé*. 16 (1-4): 55 – 76.
120. López, Catalina, Cabrera, Mireya, Martínez, F.; Pérez, P.; González, C. y Ramos, R. A. 2001. Indicadores productivos en clones de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner. *Café Cacao*, 2 (1). 16 – 20.

121. Lupwayi, N. Z.; Clayton, G.W.; Donovan, J.T.; Harker, K.N.; Turkington, T.K.; Rice, W.A. 2004. Decomposition of crop residues under conventional and zero tillage. *Can. Journal of Soil Science*, 84: 403 - 410.
122. Maestri, M. y Barros, R. S. 1981. Café. En: *Ecofisiología de cultivos tropicales*. Costa Rica. IICA.- 50 p.
123. Marques de Calvalho, Luciana; Monteiro da Silva, E.; Azevedo, A.; Mosquin, P y Cecon, P.R. 2001. Aspectos morfofisiológicos dos cultivares de cafeeiro Catuai – Vermelho e conilon. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 36 (3), marzo.
124. Manu, L. 2005. Diseño y manejo tradicional alternativo de los cultivos de la región. Disponible <http://www.crefal.edu.mx/>. <Consultado: el 25 de marzo del 2009>.
125. Martín, Gloria. 2002. Mineralización del nitrógeno de los abonos verdes y su participación en la nutrición del maíz (*Zea mays* L.) cultivado sobre un suelo Ferralítico Rojo de la Habana. Tesis presentada en opción al Título Académico de Master en Ciencias en Nutrición de las Plantas. La Habana: INCA,- 79 p.
126. Martín, Gloria y Rivera, R. 2004. Mineralización del nitrógeno incorporado con los abonos verdes y su participación en la nutrición de cultivos de importancia económica. *Revisión Bibliográfica. Cultivos Tropicales*. 25 (3): 89 – 96.
127. Martín, Gloria. 2009. Manejo de la inoculación micorrízica arbuscular, la *Canavalia ensiformis* y la fertilización nitrogenada en plantas de maíz (*Zea mays*) cultivadas sobre suelos Ferralíticos Rojos de La Habana.- Tesis de grado (Doctor en Ciencias Agrícolas), Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, La Habana. -100 p.
128. Martín, J. R. 1988. La fertilización NPK del *Coffea arabica* L. cultivado sobre suelo Ferralítico Rojo compactado./ J. R. Martín. – Tesis de grado (Doctor en Ciencias Agrícolas), INCA, La Habana.

129. Martín, N. 2006. El suelo y su fertilidad. Facultad de Agronomía, Departamento de riego Drenaje y Ciencias del Suelo. Universidad Agraria de La Habana. 455 p.
130. Martínez, Angélica. 1985. Dinámica de la actividad biológica de algunos de los principales suelos de Cuba./ Angélica Martínez- Tesis en opción al título de Dr. C. Agrícolas. Instituto de Suelos, La Habana,- 172 p.
131. Martínez, D. 2005. Estudio integral sobre la calidad del café en México. III Simposio Internacional de Café y Cacao (Conferencia Magistral). Programa, Conferencias y Resúmenes. Santiago de Cuba. p. 41- 47.
132. Matiello, J.B.; Santinato, R.; de Camargo, A.P.; Almeida, S.R.; Fernandes, D.R. y col. 1987. A moderna cafeicultura nos cerrados. Instrucoes técnicas sobre a cultura de café no Brasil. Novembro. Instituto Brasileiro do Café.148p.
133. Matiello, J.B. 2006. Manejo de fertilizantes nitrogenados e sulfatados na cultura do café. Informações agronômicas. Encarte Técnico, 114:6-7.
134. Mattiello, J.B.; Gervasio, E.M; M.; Zonta, E.; Mauri, J.; Matiello, J. B. 2008. Producao de material seca, crecimiento radicular en absorcao de calico, fósforo e aluminio por *C. canephora* e *C. arabica* sob influenciada da atividade do aluminio.Rev. Bras. Ci. Solo, 32: 425 – 434.
135. Matta, F.M. Da; Loos, R. A.; Silva, E. A.y Loureiro, M. E. 2002. Limitations to photosynthesis in *Coffea canephora* as a result of Nitrogen and water availability. Journal of Plant Physiology, 159:975-981.
136. Mayea, S.; R. Novo y Valiño, A. 1998. Microbiología Agropecuaria. Tomo II Edit. Felix Varela. La Habana. p.231-247.
137. Medina, A. 2000. Caída de hojarasca y macroelementos potenciales aportados por cafetos en dos agroecosistemas. Investigación Agrícola vol 20 (2000) 2 p. ISSN 0304-5617.
138. Mendonca, E. y Stott, S. 2003. Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil Agroforestry Systems Vol 57, Iss 2: 117-125.

139. Menéndez, Leda y col. 1988. Estructura y productividad del bosque siempre verde de la sierra del Rosario, Cuba. Proyecto MAB, No.1. 1974-1987. La Habana: Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para America Latina y el Caribe. 212p.
140. MINAG. 1987. Instrucciones técnicas para el cultivo del café y el cacao. Ciudad de La Habana: CIDA. 208p.
141. MINAG. 1993. Tecnología para altas densidades en el cultivo del café. Ministerio de la Agricultura. La Habana. 42 p.
142. MINAG. 1999. Nueva versión de clasificación genética de los suelos de Cuba. Instituto de Suelos. La Habana. Agrinfor. 64 p.
143. MINAG. 2003. Situación y perspectiva de la producción del café en el país. La Habana: Ministerio de la Agricultura, 7 p.
144. MINAG. 2009. Carta Tecnológica del cultivo del cafeto. Ministerio de la Agricultura. Grupo Empresarial de Agricultura de Montaña (GEAM) y Estación Central de Investigaciones de Café y Cacao (ECICC). La Habana. 45 p.
145. Ministerio de Finanzas y Precios Resolución 14/2010. Lista Oficial de Precios. Precios de acopio en pesos cubanos. Café cereza. 2010.
146. Mora N. 2008. Agrocadena de Café. Ministerio de Agricultura y Ganadería Dirección Regional Huetar Norte. Costa Rica Enero, 49 p.
147. Morales, D. 1986. Influencia de la humedad del suelo y diferentes condiciones de aviveramiento de *Coffea arabica* L. / D. Morales- Tesis de Grado (C.Dr. en Ciencias Agrícolas). San José de las Lajas. INCA. 152 p.
148. Moreira, F.M.S. y Sigueira, J.O. 2002. Microbiología e bioquímica do solo. Lavras: UFLA, 626 p.
149. Moreno Victoria Eugenia. 2004. Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café. Tesis de Maestría para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 71 p.

150. Moscatelli, M.C.; Ditzio, A.; Marinari, S.; Grego, S. 2007. Microbial indicators related to soil carbon mediterranean land use systems. *Soil and Tillage Research*, 97: 51 – 59.
151. Muhr, J.; Goldeberg, S.D.; Borken, W. Y.; Gebauer, G. 2008. Repeated drying rewetting cycles and their effects on the emission of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> in a forest soil. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 171: 719 – 728.
152. Muller, L.E. 1966. *Coffee Nutrición / L.E. Muller.- en temperatura to tropical fruti nutrition.- Sommerst Press. p.685 – 776.*
153. Munguia, R. 2003. Tasas de descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca de *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica* y de hojas verdes de *Erythrina poeppigiana* solas y en mezclas. Tesis en opción al título de Magister Scientiae. Turrialba: CIAT. 97 p.
154. Navarro, G.G. y Navarro, S. 2003. *Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal.* Editorial Mundi-Prensa. Madrid. 200 p.
155. Noble, A. D., G. P. Gillman, and Ruaysoongnern. 2000. A cation exchange index for assessing degradation of acid soil by further acidification under permanent agriculture in the tropics. *European Journal of Soil Science* 51:233-243.
156. Nuñez, E.R. 2007. El suelo como medio natural en la nutrición de los cultivos. Alcantar, G.G.; L.I. Trejo-Téllez. (Eds). *Nutrición de cultivos.* Editorial Mundi-Prensa. 250 p.
157. Njoroge Mburu J; Mwakha, E. y Kimemia, J. K. 1989. Initial assessment of nitrogen rates and yields potential of robusta coffee in Kenya coffee 54 (635): 677 – 683.
158. NRAG. 837-87. 1987. *Suelos. Análisis químico. Reglas generales.* Ciudad de la Habana: MINAGRI, Cuba.
159. NRAG. 892-88. 1988. *Suelos. Análisis químico. Reglas generales.* Ciudad de la Habana: MINAGRI, Cuba.
160. Ochoa M.; Bustamante, C.; Rodríguez, Maritza I. 1993. Sistema de fertilización NPK y poda para plantaciones de café en Pinares de Mayarí.

- (5000 plantas.ha<sup>-1</sup>)/M. Ochoa, Maritza I. Rodríguez y C. Bustamante. Informe Final de Investigación. Estación Central de Investigaciones de Café y Cacao – Tercer Frente - Santiago de Cuba, 35p.
161. Ochoa, M. 2000. Nutrición y fertilización fosfórica del cafeto (*Coffea arabica* L) cultivado sobre suelo Ferrítico Rojo oscuro. Tesis de Maestro en Nutrición de las Plantas. INCA, La Habana. 80 p.
  162. O.I.C. 2011. Informe mensual sobre el mercado del café. Septiembre. Organización Internacional de Café. Reino Unido de la Gran Bretaña. 9 p.
  163. Oliveira J.A.; Matiello, J. B; Pinheiro, M. R. y Santinato, R. 1980. Primeiras observações sobre adubação NPK em cafetos Conilon en el Estado Rio de Janeiro. En: 8vo Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. Resumos. - - Campos do Jordão: IBC. p. 395 – 398.
  164. Oliveira, M. 2004. Diagnose do estado nutricional do melao amarelo nos pólos de fruticultura de icapuí, mossoró e baraúna utilizando o método DRIS. CAATINGA, Mossoró- RN,17 (2): 70 – 81.
  165. Ortiz, E.1993. Crecimiento y desarrollo del *Coffea canephora* con diferentes marcos de plantación. Cultivos Tropicales, 14 (1): 48 – 51.
  166. Osorio, V. 2004. Descomposición y liberación de nitrógeno de material foliar y radicular de siete especies de sombra en un sistema agroforestal con café. Tesis presentada en opción al grado de Magister Scientiae. Turrialba. 89 p.
  167. Pablos, P.D. 2010. Actualización de criterios diagnósticos para la fertilización nitrogenada de la caña de azúcar en Cuba. Resumen de Tesis presentado en opción al título de Doctor en Ciencias Agrícolas. INICA-UNAH, 30 p.
  168. Palacios, J.R.; Guevara, A.V; Campos, A. 2008. Evaluación de la variabilidad climática interanual en el oriente cubano con el uso de la clasificación climática de Köppen. En. Resúmenes Convención Trópico. II Congreso de Meteorología Tropical, p. 337.
  169. Pandey, R.R.; Sharma, G.; Singh, T.B. y Tripathi, S.K. 2010. Factors influencing soil CO<sub>2</sub> efflux in a northeastern Indian oak forest and plantation. African Journal of Plant Science, 4 (8): 280 – 289.

170. Paneque, V.M.; Calaña, J.M.; Calderón, Maida; Borges, Yenía; Hernández, T.C. y Caruncho, M. 2010. Manual de técnicas analíticas para análisis de suelo, foliar, abonos orgánicos y fertilizantes químicos. Ediciones INCA. 160 p.
171. Partielli, F. L. ; Altoé, J. A.; Teixeira do Amaral, J. A.; Teixeira, J. F. do Amaral; Schmidt, E. R.; Lopes, J. C. y Caten, A. 2002. Normas de referencia do DRIS para o cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner). 28 Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. Trabalhos apresentados. Caxambu-MG.:SARC/PROCAFE, p .326 – 327.
172. Partielli, F.L., Duarte, H.; Monnerat, P.H. y Pio, A. 2006. Comparação de dois métodos DRIS para o diagnóstico de deficiência nutricionais do cafeeiro. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 41 (2). Fevereiro.
173. Partielli, L.; Duarte, H. y Ribeiro, F. 2009. Cultivo com plantas de cobertura: alternativa viável. A lavoura, año, 112 (671): 42 – 47.
174. Pallardy, S.G. 2008. Physiology of woody plants. 3<sup>rd</sup> ed. New York, USA. Elsevier. 454 p.
175. Pavan, M.A.; Dias, J.C.; Siquiera, R.; Androcioli, A.; Colozzi, A.; Librio, E. 1999. High coffee population density to improve fertility o fan Oxisol. Pesquisa Agropecuaria Brasileira 34 (3): 459 – 465.
176. Paz, I.E.; Sánchez Marina de P.; Sadeghian, S. 2006. Relación entre dos sistemas de sombrero de café y algunas propiedades del suelo en la meseta de Popayán, Colombia .Acta Agronómica, 55 (4): 410 – 423.
177. Pérez, D. y Souza, O. 2006. Producción, descomposición y liberación de nutrientes de la hojarasca bajo café a pleno sol y con sombra de *Gliricidia sepium* (Jacq) en Carazo, Nicaragua. Trabajo de diploma. Universidad Nacional Agraria. Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente. Managua. Nicaragua. 65 p.
178. Pezzopone, J.R.; Marsetti, M.M.; de Souza, J.M. y Pezzopone, J.E. 2010. Condições microclimáticas em cultivo de café conilon a pleno sol e arborizado com noqueira macadamia. Ciencia Rural, Santa María. 40 (6): 1257 – 1263.

179. Philpott, S. M.; Perfecto, I. y Vandermeer, J. 2006. Effects of management system and season on arboreal ant diversity and abundance in coffee agroecosystems. *Biodiversity and Conservation*, 15: 139 – 155.
180. Pinochet, D.; Mendoza, J. y Galvis, A. 2004. Potencial de mineralización de N de un Hapludand con distintos manejos agrícolas. *Ciencia Invet. Agr.*, 27 (2): 97 – 106.
181. Poggiani, F. y Schumacher, M.V. 2004. Nutrient cycling in native forests. En Gonçalves J.L.M.; Benedetti, V. (Eds). *Forest nutrition and fertilization*. Piracicaba, Brasil. IPEF. p. 287 – 305.
182. Prause, J.; Arce de Coram, G. y Angeloni, P.N. 2003. Variación mensual en el aporte de hojas de cuatro especies forestales nativas del parque de Chaquiño húmedo en Argentina. *Quebracho. Revista de Ciencias Forestales*, diciembre No 010. Universidad de Nacional de Santiago de Estiro, Argentina. p.39 – 45.
183. Primavesi, A 1990. *Manejo Ecológico do Solo. A agricultura em regioes tropicais*. 9na ed. Nobel, Brasil, 549 p.
184. PROMECAFE. Producción mundial de café .2004-05. Boletín No. 103. febrero-mayo, 2005. IICA. Guatemala p. 4 – 6.
185. 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. *Rev. Fac. Agron.*, 15: 501 – 514.
186. Quiroga, A.; Ormeño, O. y Peinemann, N. 2000. *Materia orgánica. Un indicador de calidad de suelos relacionado con la productividad de los cultivos*. Ediciones INTA.
187. Ramírez, G. 1980. Análisis químico del suelo como guía para la fertilización del cafeto. *Noticiero del Café Costa Rica*. 6 (187): 1 – 4.
188. Reynolds B.C. y Hunter, M.D. 2001. Responses of soil respiration, soil nutrients, and litter decomposition to inputs from canopy herbivores. *Soil Biol. Biochem.*, 33: 1641 – 1652.

189. Riaño, N.; Arcila, J.; Jaramillo, A. y Chavez, B. 2004. Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera Central. *Cenicafé*. 55(4): 265 – 276.
190. Rivera R. y Martín, J. R. 1980. Efecto de niveles de N, P y K en *Coffea arabica* L var. "Mundo Novo" cultivado al rol, sobre fondo fijo de arrope y compost en la fase de fomento. Parte II. Parámetros de crecimiento y rendimiento. *Ciencia y Técnica en la Agricultura. Serie Café y Cacao*. 2 (1): 51 – 64.
191. Rivera R. y Sam, Ofelia. 1983. Estudio preliminar de la interacción crecimiento vegetativo, crecimiento del fruto y el estado nutricional en *Coffea arabica* L (var. Caturra) a plena exposición solar. *Cultivos Tropicales*, 5 (3): 389 – 406.
192. Rivera R. 1988. Nutrición, fertilización y balance del fertilizante nitrogenado ( $^{15}\text{N}$ ) para el cafeto en un suelo Ferralítico Rojo compactado./ R. Rivera - Tesis de grado (Doctor en Ciencias Agrícolas), INCA, 1988-110 p.
193. Rivera R. 1993a. Crecimiento, nutrición y fertilización (NPK) del cafeto a plena exposición solar en suelos Ferralíticos Rojos. *Cultivos Tropicales*, 14 (2-3): 5 – 36.
194. Rivera, R. 1993b. Metodología para calcular los requerimientos nutricionales del cafeto. *Cultivos Tropicales*. 14 (1): 28 – 34.
195. Rivera R. y Mederos, J. D. 1993. Requerimientos de N, P y K de una plantación de cafeto var. Caturra a plena exposición solar, sobre suelo Ferralítico Rojo compactado. *Cultivos Tropicales* 14(1): 5 – 12.
196. Rivera R.; Bustamante, C. y Ochoa, M. 1994. La fertilización nitrogenada del cafeto en diferentes condiciones edafoclimáticas de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 15 (1):5 – 11.
197. Rivera, R.; Martín G.M.; Pérez, D. 1999. Efecto de la temperatura sobre la mineralización del nitrógeno de dos especies de abonos verdes en suelo Ferralítico Rojo. *Cultivos Tropicales*. 20 (2): 15 – 19.

198. Rivera, R. 2006. Nutrición y fertilización de *Coffea arabica* en Cuba. 2006/ En: R. Rivera, F. Soto editores. El Cultivo del cafeto en Cuba. Investigaciones y Resultados, 2006. p.500. ISBN 959-7023-37-7.
199. Roberts, S. y Dow, I. 1982. Critical nutrient ranges for petiole phosphorous levels of sprinkler-irrigated Russet Burbank potatoes. *Agronomy Journal*, 74 (3): 583 – 585.
200. Rodríguez, C. y Prieto, D. 2001. Descomposición inicial de la paja de la caña de azúcar. Cambios químicos y efecto de la biota del suelo. Comisión III. Biología y Bioquímica del Suelo. XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Programa y Resúmenes. Boletín de la Sociedad Cubana de la Ciencia del Suelo (4). 230 p.
201. Rodríguez, Maritza I.; Bustamante, C. y Grave de Peralta, G. 1998a. Crecimiento y requerimientos nutrimentales del cafeto (*Coffea arabica*) hasta el tercer año de plantación en suelo Pardo sin carbonatos. *Café Cacao*. 1 (1):10 – 15.
202. Rodríguez, Maritza I.; Bustamante, C.; Rivera, R. y Camejo, R. 1998b. Fertilización nitrogenada de cafetos durante su primer ciclo de poda. *Café y Cacao*. 1 (2):16 – 20.
203. Rodríguez, P. 2010. Compendio sobre microbiología agrícola. Universidad de Oriente. Dpto Agropecuario. Septiembre, 276 p.
204. Rojas, B. M. y Pérez, Z. 2001. Consideraciones sobre el uso del nitrógeno. Boletín técnico, Instituto del café. Costa Rica. Oficina regional Pérez Zeledón, Icafé. Año 1 (4): 2 – 3.
205. Rojas, F.; Canessa, R. y Ramirez, J. 2005. Cafetales arbolados. Soluciones tecnológicas. *Revista Forestal (Costa Rica)*. 2(4): 1 – 6.
206. Roskoski, J. 1980. Importancia de la fijación de nitrógeno en la economía del cafetal. En: Jiménez-Ávila, E. y A. Gómez-Pompa, (Eds.). *Estudios Ecológicos en el Ecosistema Cafetalero*, Xalapa, México, 143 pp.
207. Ross, D.J. y col. 1995. Microbial biomass C and N and mineralizable – N, in litter and mineral soil under *Pinus radiata* on a *Coastal sand*: Influence of stand age and harvest management. *Plant and Soil*. 175: 167 – 177.

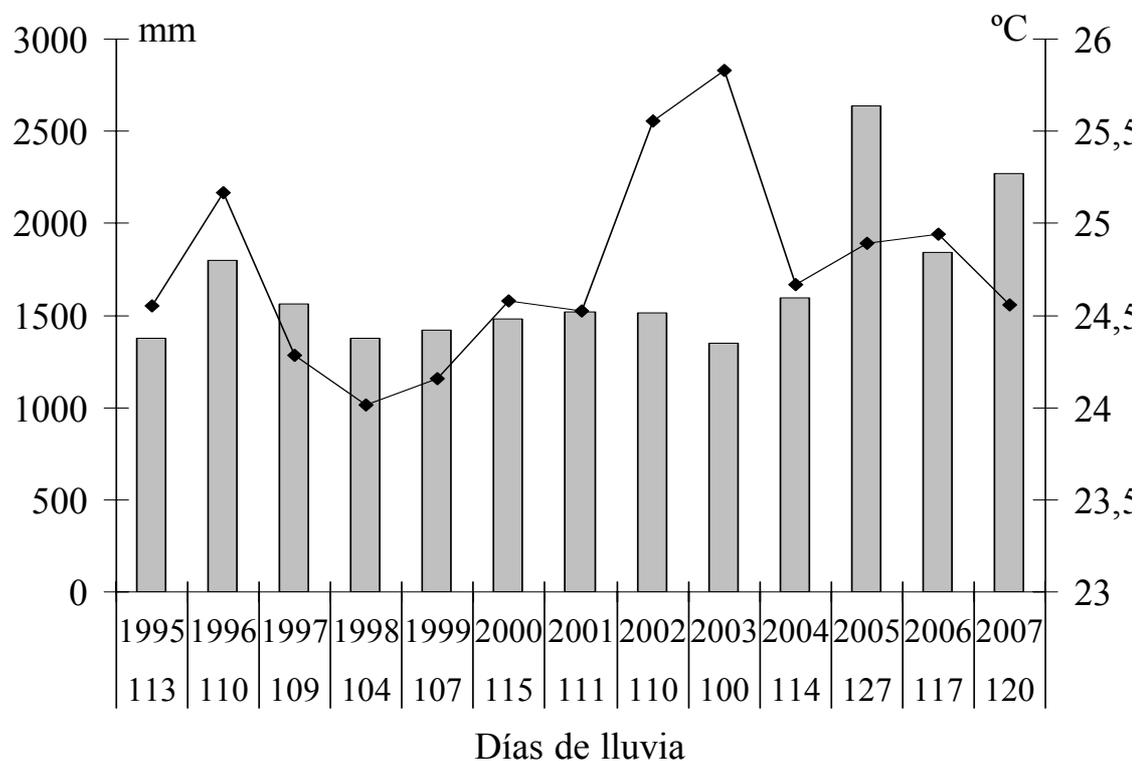
208. Sadeghian, S.; Murgueitio, E.; Mejías, C. y Rivera, J. 2001. Ordenamiento ambiental y reglamentación del uso de suelo en la zona cafetalera. In: Suelos del eje cafetalero. Pereira, Proyecto U.T.P.-GTZ. p 96-108.
209. Sadeghian, S. 2003. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio sobre las propiedades químicas de suelos cultivados con café. *Cenicafé*. 54 (3): 242 – 257.
210. Sadeghian K.S.; García, L.; Montoya J.C. 2006 a. Respuesta del cafeto a la fertilización con N, P, K y Mg en dos fincas del departamento del Quindío. *Cenicafé*. 57(1): 58 – 69.
211. Sadeghian S.; Mejía, Beatriz y Arcila, J. 2006 b. Composición elemental de frutos de café y extracción de nutrientes por la cosecha en la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé*. 57 (4) 251 – 261.
212. Sadeghian, K.S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía Práctica. *Boletín Técnico Cenicafé*, 32: 1 – 43.
213. Sadeghian, K.S. 2009. Calibración de análisis de suelo para N,P,K y Mg en cafetales al sol y bajo semi sombra. *Cenicafé*, 60 (1): 7 – 24.
214. Salgado, S.; Palma, D.; Lagunes, Luz de C. y Castelan, M. 2006. Manual para muestreos de suelos, plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Psotgraduados, Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Campus Tabasco. Villahermosa, Tabasco. México. 84 p.
215. Santana, M. 2007. Fijación biológica de nitrógeno por leguminosas arbóreas para sombra de café en Puerto Rico. / M. Santana.- Tesis en opción al grado de Maestría en Ciencias en Agronomía. Universidad de Puerto Rico. Recinto Universitario de Mayagüez, 70 p.
216. Sampaio, M.; De-Polli, H.; De Aquino, Adriana María; Fernandes, María E. y Costa, Janaina. 2011. Bioindicators of soil quality in coffee organic cultivation systems. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 46 (5), Brasilia, mayo.
217. SEAGRI. Cultura – Café Conillon. [www.seagri.ba.gov.br.htm](http://www.seagri.ba.gov.br.htm) <Consultado el 12 diciembre 2001>.
218. Silva, Vania A.; Antunes, W.C.; Guimaraes, B.L.S.; Paiva, Rita M.C. 2010. Resposta fisiológica de clones de café conilon sensível a deficiência

- hídrica enxertado em porta-enxerto tolerante. Pesquisa Agropec. Bras. Brasília, 45 (5): 457 – 464.
219. Siqueira J.O. y Franco A.A. 1988. Biotecnología do solo: Fundamentos e perspectivas. Brasília. Lavras: MEC, ABEAS, 236 p.
220. Snoeck J. 1980. Evolution du chimisme du sol dans des essais d engrais minéraux sur *Coffea canephora* en Cote d Ivoire. Café Cacao The 24(3) : 177 – 188.
221. Snoeck, J. y Lotote, R. 1985. Metodologie des recherches sur la fertilization minrale du cafeier Robusta en Cote d’Ivoire. Schemas experimentaux. Onceno Coloquio Científico Internacional del Caf. ASIC-Lome (Togo): 563 – 573.
222. Snoeck, D. y Snoeck, J. 1992. Programme informatisé pour la determination des besoins en engrais minéraux pour les cafeiers arabica et robusta a partir des analyses du sol. Café Cacao Thé 32 (3): 201 – 213.
223. Snoeck, D.; Zapata, F. y Domenach, Anne Marie. 2000. Isotopic evidence of the transfer of nitrogen fixed by legumes to coffee trees. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 4 (2): 95 – 100.
224. Solórzano, N.; Arens, E. y Escalante, E. 1998. Efecto de Saman (*Samanea saman*, Jacq) sobre la fertilidad del suelo en un pastizal de estrella (*Cynodon nlemfuensis*) en Portuguesa. Revista Forestal Venezuela. 42 (2): 149 – 155.
225. Soto, F.; Hernández, A.; Pérez, J.M.; Vantour, A.; Morales, Marisol; Planes, A. 2002. Zonificación agroecológica del cafeto en los macizos montañosos Sagua Nipe Baracoa, Sierra Maestra y Guamuhaya. Informe Final de Proyecto. 007-01-002. Agencia de Medio Ambiente, 76 p.
226. Soto, F. 2006. Crecimiento y requerimientos ecológicos del cafeto. 2006/ En: R. Rivera, F. Soto (editores). El Cultivo del cafeto en Cuba. Investigaciones y Resultados, 2006. p.500. ISBN 959-7023-37-7.
227. Soto, F. y Caro, P. 2006. Breve reseña de la introducción y producción del cafeto en Cuba / En: R. Rivera, F. Soto editores. El Cultivo del cafeto en Cuba. Investigaciones y Resultados, 2006. p.500. ISBN 959-7023-37-7.

228. SQI-Soil Quality Institute. 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. Prepared by the National Soil Survey Center in cooperation with The Soil Quality Institute, NRCS, USDA, and the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA.
229. Stephens, D. 1968. Fertiliser, trials on small coffee farms in Uganda. *Journal Horticultura Sciences*. 43 (1): 75 – 90.
230. Stevens, R.J.; Laughlin, R.J. y Malone, J.P. 1998. Soil pH affects the processes reducing nitrate to nitrous oxide and di-nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*. 30 (8 - 9): 1149 – 1126.
231. Stewart, W.; Dibb, D.; Johnston, A. y Smyth, T. 2005. The contribution of comercial fertilizer to food production. *Agron. Journ.*, 97: 1-6.
232. Stewart, W.M. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. *Informaciones Agronómicas*, 67: 1 – 6.
233. Schwartz, M.D. 2003. Basic concepts and backgroud. En Schwartz MD (Ed.) *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer. Dordrecht, Holanda. p. 4 - 25.
234. Teklay, T. 2007. Decomposition and nutrient release from pruning residues of two indigenous agroforestry species during the wet and dry seasons. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 77: 115 –126.
235. Torres, W. 1985. Metodología del análisis del crecimiento en plantas, aplicado al estudio del desarrollo de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en diferentes fechas de plantación. Tesis de Grado (C.Dr. en Ciencias Agrícolas).- San José de las Lajas: INCA,- 94 p.
236. Trujillo, C.; Cuesta, E.; Díaz, I.; Pérez, R. 2007. Economía Agrícola para las carreras de Agronomía e Ingeniería Agropecuaria. Universidad Agraria de la Habana, 334 p.
237. Valdez, J. 2007. Café de Colombia. Disponible: <http://www.juanvaldez.com/>. <Consultado: 4 de junio del 2009>.
238. Valencia, A.G. y Arcila, J. 1977. Efecto de la fertilización con NPK a tres niveles en la composición mineral de las hojas del cafeto. *Cenicafe*, 28 (4): 119-138.

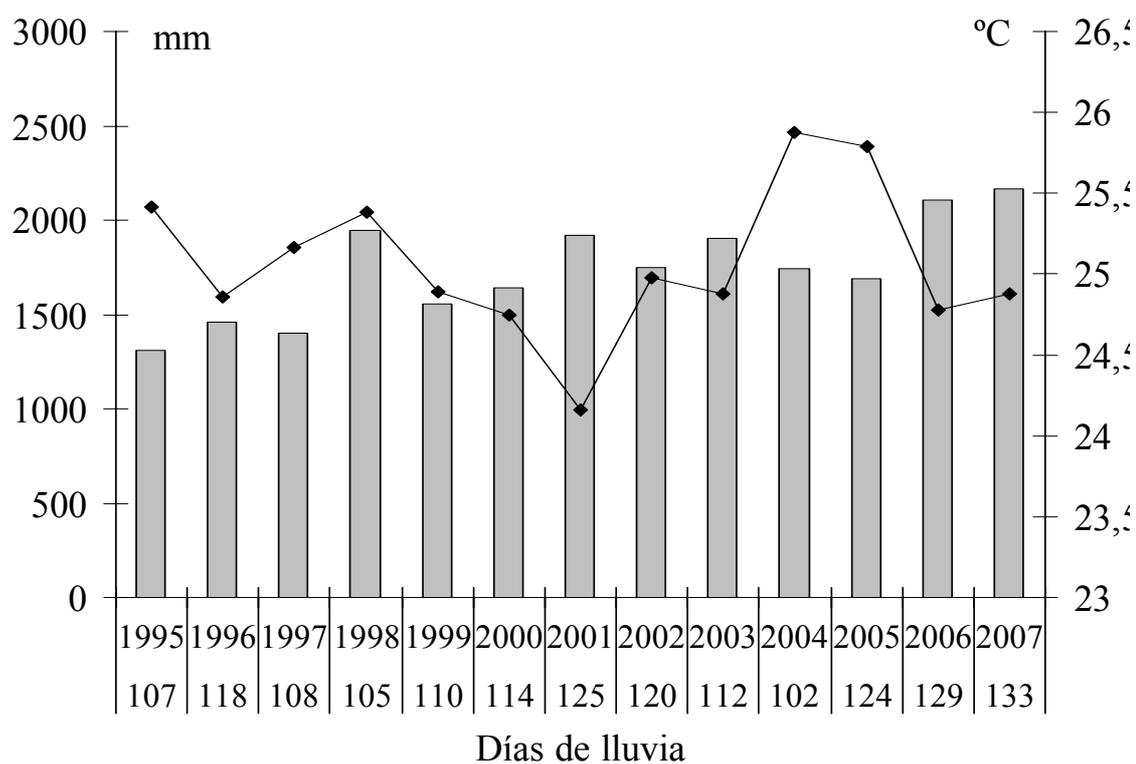
239. Valencia, A.G.; Gómez, A.A. y Bravo, G.E. 1975. Efecto de diferentes portadores de nitrógeno en el desarrollo del cafeto y en la fertilidad de los suelos. *Cenicafe* 26 (3): 130 – 141.
240. Valencia G. 1998. Manual de Nutrición y Fertilización del Café. Instituto de la Potasa y el Fósforo (INPOFOS), Quito, Ecuador, 60 p.
241. Valencia, G. 1999. Fisiología de la producción de café, nutrición y fertilización del café. Tecnología para producir altos rendimientos y buena calidad. Ciudad de Guatemala. 11-14 de abril. 18 pp.
242. Veloso C:A.C.; de Souza, F.R; Correa, J.R.V.; Ribeiro, S. I.; De Oliveira Junior, M.C.M. y Carva, E.J.M. 2003. Avaliacao do estado nutricional do cafeeiro (*Coffea canephora* ) na regio da Transamazonica. Anais do III Simposio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. Brasilia: Embrapa Café. p. 397 – 398.
243. Vigil, M.F. 2001. Factors affecting the rate of crop residue decomposition under field conditions. Conservation Tillage Fact Sheet #3 – 95.
244. Villa-Boas, R.; Boaretto, A. E.; Grava de Godoy, L. J.; Fernández, D.M. 2005. Recuperação do nitrogênio da mistura de uréia e sulfato de amônio por plantas do milho. *Bragantia*, Campinas. 64(2): 263 – 272.
245. Villers, Lourdes; Arizpe, Nancy; Orellana, R.; Conde, Cecilia y Hernández, Josefina. 2009. Impacto de cambio climático en la floración y el desarrollo del fruto del café en Veracruz, México. *Interciencia*, 34 (5): 322-327.
246. Viñals, R.; Bustamante, C. y Ramos, R. 2001. Requerimientos nutricionales de *Coffea arabica*. Crecimiento y extracción de nutrientes en condiciones de Sagua de Tánamo. *Café Cacao* 2 (1): 38 – 42.
247. Waugh, D.L.; Cate, Jr R.B. y Nelson L. 1972. A. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelo y la respuesta a la fertilización. Boletín Técnico (7). Proyecto Internacional de Evaluación y Mejoramiento de la Fertilidad del Suelo. North Carolina State University, 106 p.
248. WRB. 2006. World Reference Base for Soil Resources. Classification Key. FAO AGL (2006). <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/newkey.stm>. <17 - 1 - 2007>.

**Anexo 1. Comportamiento anual de las variables meteorológicas precipitaciones, días de lluvia y temperatura media, ocurridas en el sitio Tercer Frente durante la ejecución de los experimentos.**



Datos de la estación meteorológica de Cruce de los Baños, municipio Tercer Frente (INSMET, 2011).

**Anexo 2. Comportamiento anual de las variables meteorológicas precipitaciones, días de lluvia y temperatura media, ocurridas en el sitio La Alcarraza durante la ejecución de los experimentos.**



Datos de la estación meteorológica de Sagua de Tánamo, municipio Sagua de Tánamo (INSMET, 2011).

### ANEXO 3

#### Perfil: TF 1 1996

**Clasificación:** Pardo ócrico sin carbonatos (MINAG, 1999), que se corresponde con un Cambisol háplico (éutrico) (arcílico) (WRB, 2006).

**Proceso de formación:** Sialitización

**Horizonte diagnóstico:** Siálico

**Horizonte normal de diagnóstico:** ócrico

**Características del diagnóstico:** sin carbonatos

Localización

**Ubicación:** Finca La Mandarina

**Municipio:** Tercer Frente

**Provincia:** Santiago de Cuba

**Macizo:** Sierra Maestra

**País:** Cuba

Factores de formación

**Forma del relieve:** premontaña

**Topografía del terreno circundante:** premontaña

**Vegetación o uso de la Tierra:** cafeto bajo sombra de algarrobo

Descripción del Perfil

Hor.	Prof ( cm )	Descripción
A <sub>1</sub>	<u>0 - 10</u> 10	Seco, pardo, moderadamente pedregoso; loam; estructura no bien definida, clara, gruesa; sistema radical abundante, raíces finas, medianas y gruesas, galerías de lombrices; poroso; ligeramente duro; transición paulatina al siguiente horizonte
A <sub>2</sub>	<u>10 -40</u> 30	Ligeramente húmedo; pardo amarillento; concreciones blandas, irregulares, pequeñas; loam arcilloso; estructura granular, masiva, clara, generalizada, mediana; algunas raíces finas y horizontales; lombrices; porosidad débil, fina; ligeramente duro; no cementado; notable el paso al siguiente horizonte.
AC	<u>40- 80</u> 40	Amarillo; ligeramente húmedo; manchas frecuentes y grandes; pocas concreciones, blandas, esféricas y pequeñas; piedras y pedregones grandes, duros, redondos; arenoso; estructura terrosa y fina; no raíces y animales; no poroso; duro; cementado, no plástico; no adhesivo; transición paulatina hacia cascajo.

Es un suelo poco profundo con textura que oscila entre loam a loam arcilloso, de ligera a baja plasticidad, con elevada capacidad de intercambio catiónico y alto porcentaje de

saturación por bases. El complejo de absorción se caracteriza por buena relación Ca / Mg, el calcio es el catión predominante, contenidos relativamente adecuados de magnesio y medios de potasio, pH ligeramente ácido, dentro de los rangos adecuados para el cultivo del café, valores medios de materia orgánica ( < 3 % ) y de fósforo.

Análisis mecánico del suelo Pardo ócrico sin carbonatos. Tercer Frente.

Prof	% de las fracciones (mm)			
	arena gruesa	arena fina	limo	arcilla
	2-0.2	0.2-0.02	0.02 - 0.002	<0.002
0-10	5.03	36.78	34.85	23.34
10-40	11.19	37.17	30.04	21.60
40-80	29.34	47.46	13.72	9.48

Propiedades físicas del suelo Pardo ócrico sin carbonatos. Tercer Frente.

Prof. Cm	L.S.P., mm H <sub>2</sub> O / 100 g	%L.S.P	% L.I.P.	Hy (%)	P.E., g / cm <sup>3</sup>
0-10	69.2	78.9	36.9	6.4	2.44
10 – 40	66.0	75.3	34.9	6.4	2.42
40 – 80	44.8	50.5	Arena	5.6	2.53

#### ANEXO 4.

##### Perfil: LA 1 1996

**Clasificación:** Pardo gleyzoso sin carbonatos (MINAG, 1999), que se corresponde con un Cambisol estagnico (éutrico) (arcílico) (WRB, 2006).

**Proceso de formación:** Sialitización

**Horizonte diagnóstico:** Siálico

**Horizonte normal de diagnóstico:**

**Características del diagnóstico:** propiedades de gleyzación suave, sin carbonatos

Localización

**Ubicación:** La Alcarraza

**Municipio:** Sagua de Tánamo

**Provincia:** Holguín

**Macizo:** Nipe-Sagua-Baracoa

**País:** Cuba

Factores de formación

**Forma del relieve:** premontaña

**Topografía del terreno circundante:** premontaña

**Vegetación o uso de la Tierra:** cafeto bajo sombra de piñón

Hor.	Prof (cm )	Descripción
A <sub>1</sub>	<u>0- 7</u> 7	Seco, pardo, gravas irregulares fuertes; estructura nuciforme generalizada, mediana a gruesa; raíces abundantes, medianas, finas y gruesas, porosidad débil, muy finos; duro, no plástico; no adhesivo; transición brusca
A <sub>2</sub>	<u>7- 18</u> 11	Ligeramente húmedo; pardo amarillento; pocas concreciones, se rompen con la uña, esféricas, amarillentas, pequeñas, arcilla; masiva en forma de bloques, poco clara, generalizada mediana a gruesa; débil porosidad; duro, plástico; ligeramente adhesivo; reducida actividad biológica, transición brusca por dureza.
B <sub>1</sub>	<u>18 – 33</u> 15	Húmedo, amarillo, muchas manchas grandes, no concreciones; arcilloso; manchas amarillentas, rojizas,; estructura masiva, poco clara, generalizada, en forma de bloques, pocas raíces, medianas, pocos poros y muy finos, plástico y muy adhesivo, brusca por el color y la dureza.
B <sub>2</sub>	<u>33 – 69</u> 36	Húmedo, amarillento, manchas grandes amarillentas y rojizas, pocas concreciones, blandas, esféricas y pequeñas, arcillo arenoso; estructura entre granular y nuciforme, masiva, poco clara, generalizada, fina; raíces medianas y gruesas, horizontales, pocos poros, muy finos, horizontales, propiedades mecánicas duras, plástico, adhesivo, transición brusca.

C      > 69 cm      Ligeramente húmedo, amarillo, casajo, manchas frecuentes, grandes, pedregones (12 - 50 %), alargados, areno -arcilloso, amorfo, friable, no cementado, no plástico y no adhesivo.

El pH es ligeramente ácido; contenidos medios de materia orgánica, fósforo y potasio asimilable en el horizonte superficial con disminuciones bruscas y paulatinas en la profundidad; predominio del calcio en el complejo de absorción, con contenidos altos de magnesio. La relación Ca / Mg es baja e indicativa de altos contenidos de magnesio.

**Anexo 5. Identificación de la mezcla de arvenses presentes en los agroecosistemas cafetaleros estudiados. Frecuencia de aparición en las limpias.**

<b>Nombre vulgar</b>	<b>Nombre científico</b>	<b>% aparición en las limpias</b>
Ají Culebra	<i>Rivina humilis</i> Lin.	92,9
Amor Seco	<i>Priva lappulácea</i> , Lin.	50
Anamú	<i>Petiveria alliacea</i> , Lin.	78,6
Canutillo	<i>Commelina elegans</i> , H.B. K.	64,3
Cañamazo	<i>Stenotaphrum secundatum</i> , Walt.	85,7
Caramana	<i>Cyperus rotundus</i> , Lin.	78,6
Dormidera	<i>Mimosa pudica</i> , Lin.	57,1
Empanadilla	<i>Desmodium adscendens</i> , P.D.C.	71,4
Garro Blanco	<i>Spermacoce tenuior</i> , Lam.	78,6
Lespedeza	<i>Lespedeza polytachya</i> , Michx	85,7
Leucaena	<i>Leucaena glauca</i> , Lin.	71,4
Malva	<i>Bastardia viscosa</i> , Lin	92,9
Pata De Gallina	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> , Lin.	50
Sanguinaria	<i>Achyranthes polygonoides</i> , Lin.	100
Súrbana	<i>Panicum fasciculatum</i> , SW.	100
Zorra	<i>Tricholaena rosea</i> , Nees.	71,4

## **Anexo 6. Descripción del procedimiento para la interpretación de la respuesta al fertilizante por el modelo discontinuo rectilíneo descrito por Waugh, Cate y Nelson (1972).**

El propósito de la evaluación de los rendimientos en función de la fertilidad del suelo y la aplicada por diferentes fuentes de nutrientes es el de predecir la respuesta a los nutrientes del cultivo evaluado, en este caso el café.

Se desarrolló un programa de evaluación que incluyó el muestreo y evaluación de la fertilidad del suelo, montaje del experimento de respuesta a los nutrientes y se procedió a la evaluación e interpretación de la respuesta y aplicación de modelos estadísticos – matemáticos que predigan la respuesta del cultivo en evaluación frente a las condiciones de crecimiento y desarrollo presentes.

Los modelos discontinuos tienen un punto inicial de respuesta al nutriente con este al mínimo (factor limitante) y un punto final, que es el rendimiento máximo estable. Una vez obtenidos los datos experimentales, se ordenaron en función de las dosis crecientes de nutrientes, se estableció la significación estadística del rendimiento entre los niveles de los tratamientos, se determinó el rendimiento máximo estable, la pendiente de la respuesta y el punto de inflexión del rendimiento. Al final se realizó la interpretación matemática de respuesta al nutriente empleando el modelo discontinuo rectilíneo.

La interpretación mediante el modelo discontinuo da estimaciones lógicas de los requerimientos de los nutrientes. La interpretación curvilínea de esos mismos datos da predicciones del rendimiento máximo estable muy por encima que cualquier observación realizada en los experimentos y como resultado se obtienen predicciones irrazonables del requerimiento de nutrientes.

En este trabajo se empleó el software desarrollado por el INCA, que realiza el ajuste de datos según el modelo discontinuo rectilíneo propuesto por Waugh, Cate y Nelson. El modelo que se ajustó fue el siguiente:

$$y = \begin{cases} a x + b, & 0 \leq x \leq \text{rec } x \\ y_{\text{max}}, & x \geq \text{rec } x \end{cases}$$

## Anexo 7

### **Procedimiento para la aplicación y corrección de las dosis de fertilizante N en base a los resultados del análisis foliar realizado a inicios de junio.**

1. Primera aplicación de N en abril (50 % de la dosis), a inicios de la época lluviosa. Esta aplicación se basa en la proyección del rendimiento preestimado de las empresas cafetaleras, en función del historial de campo de las plantaciones.
2. Realizar análisis foliar en junio, al cuarto par de hojas de las ramas fructíferas.
3. Aplicación del sistema de corrección de las dosis.

3.1 Si los porcentajes de N foliar están en el rango de adecuado a óptimo (2,8 % - 3,09 %), se mantiene la dosis de N propuesta.

3.2 Si el porcentaje de N foliar es bajo (< 2,79 %):

- En la ecuación obtenida de la relación entre % N foliar (x) y % RME (y); se calcula a que porcentaje de RME corresponde el resultado de N foliar obtenido.

$$y = -474,674 + 364,393*x - 57,3699*x^2$$

- El rendimiento preestimado se divide por el % RME calculado que previamente se dividió por cien.
- Este rendimiento se lleva a la ecuación de la relación entre rendimientos máximos estables (y) y dosis óptima de N (x); se despeja x, (¿para que valor de x se obtendrá ese rendimiento máximo estable?).

$$x = (y - 0.378295) / 0.008752$$

- Se resta a esta nueva dosis, la aplicada en el mes de abril.
  - La diferencia es la nueva dosis a corregir.
4. Corrección de la dosis finales de julio (50 % de la nueva dosis a corregir).
  5. Última aplicación inicios de octubre (50 % restante de la nueva dosis a corregir).

**Ejemplo de corrección de la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar al obtener valores bajos de N foliar, determinados en el mes de junio.**

<b>Rendimientos estimados (t.ha<sup>-1</sup> café oro)</b>	1,25	1,7	2,1	
<b>Dosis N a aplicar en abril (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>	50	75	100	
<b>Reajuste del rendimiento en base al contenido de N foliar</b>				
<b>% N Foliar</b>	<b>RME (%)</b>	<b>Rendimiento reajustado (t.ha<sup>-1</sup> café oro)</b>		
2,7	90,96	1,37	1,87	2,31
2,6	84,93	1,47	2	2,47
2,5	77,75	1,61	2,19	2,7
2,4	69,42	1,8	2,45	3,03
<b>Cálculo de la dosis de N para el rendimiento reajustado</b>				
<b>% N Foliar</b>	<b>RME (%)</b>	<b>Dosis total de N calculada (kg.ha<sup>-1</sup>)</b>		
2,7	90,96	113,79	170,32	220,57
2,6	84,93	124,95	185,49	239,31
2,5	77,75	140,48	206,62	265,4
2,4	69,42	162,52	236,59	302,43
<b>Cálculo del fraccionamiento de N a aplicar en junio y octubre</b>				
<b>% N Foliar</b>	<b>RME (%)</b>	<b>Fraccionamiento a aplicar (kg.ha<sup>-1</sup>)*</b>		
2,7	90,96	31,9	47,66	60,28
2,6	84,93	37,47	55,25	69,65
2,5	77,75	45,24	65,81	82,7
2,4	69,42	56,26	80,79	101,21

\*Dosis a aplicar a finales de junio o inicios de julio y a inicios de octubre.