

**RELACIÓN DEL CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO CON USOS Y  
COBERTURAS DEL TERRENO EN ALCALÁ, VALLE DEL CAUCA**

**ANDRÉS FELIPE CARVAJAL VANEGAS**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA**

**PEREIRA**

**2008**

**RELACIÓN DEL CARBONO Y NITRÓGENO DEL SUELO CON USOS Y  
COBERTURAS DEL TERRENO EN ALCALÁ, VALLE DEL CAUCA**

**ANDRÉS FELIPE CARVAJAL VANEGAS**

**Tesis de grado presentada como  
requisito parcial para optar al título de  
Magíster Scientiae en Ecotecnología**

**Director**

**Alexander Feijoo Martinez Ph.D.**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES**

**MAESTRÍA EN ECOTECNOLOGÍA**

**PEREIRA**

**2008**

*A mi adorado abuelo*  
**Jesús María Carvajal Grisales**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Alexander Feijoo Martínez, mi director, mi Maestro y Amigo por enseñarme a disfrutar de la construcción del conocimiento y mostrarme la investigación como una forma de crecimiento personal y académico.

A Heimar Quintero, el Maestro de mi Maestro, por su lucidez, por ser un visionario y por tener la capacidad de mostrar siempre el mejor camino para la investigación.

A mi madre Olga Vanegas Ortega y a mi padre Luis Evelio Carvajal por el empeño puesto en mi formación personal y profesional, y por sentirse orgullosos de los logros que hasta ahora he alcanzado.

A mis compañeras y amigas del grupo Gestión en Agroecosistemas Tropicales Andinos (GATA); María Constanza Zúñiga, Narli Johana Aldana, Mónica Díaz y Beatriz Elena Murillo (toda la vieja guardia del GATA) porque siempre estuvieron acompañándome, colaborándome y motivándome en este proceso de formación.

A compañeros más recientes del grupo GATA; Darío Hernán Ruiz y Liliana Vanessa Celis que también me brindaron su amistad y respaldo.

A COLCIENCIAS, a la Universidad Tecnológica de Pereira y al Centro de Investigaciones y Estudios en Biodiversidad y Recursos Genéticos (CIEBREG) por la financiación del trabajo.

A Miguel Eugenio Cadena, Diana Patricia Ortiz y Elena Velásquez por la asesoría en el análisis estadístico.

A Marco Aurelio Rondón y Maria del Pilar Hurtado por la colaboración en el análisis de las muestras de suelo y gases de invernadero a través del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).

A todos y todas las integrantes de las familias Carvajal Cruz y Vanegas Ortega que me han apoyado a través de sus demostraciones de afecto.

A mi hermano Jorge Enrique Trujillo y a mi amigo del alma Juan David Serna por escucharme y brindarme momentos y espacios que permitieran hacer frente a la rutina. Y a mi buen amigo Marito Bermúdez por inspirarme con su ritmo vallenato.

## RESUMEN

En el municipio de Alcalá, Valle del Cauca, se evaluaron los porcentajes y almacenamientos de carbono y nitrógeno en el suelo, relación C:N, densidad aparente y abundancias naturales de  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  para las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm. La evaluación se realizó en tres zonas altitudinales entre 1150 y 1600 m, para lo cual se construyeron grillas con 16 puntos de muestreo ubicados a 200 m de distancia.

Las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) fueron evaluadas durante un periodo de ocho meses en relicto de selva, pastizal, cafetal variedad Colombia y guadual, utilizando el método de cámara cerrada. También se analizó la distribución espacial de los almacenamientos de carbono en la capa de suelo 0-30 cm por medio de la herramienta geoestadística cokriging, utilizando como covariable para la interpolación el almacenamiento de nitrógeno en 0-30 cm.

Las propiedades fisicoquímicas del suelo variaron significativamente ( $p < 0.05$ ) entre profundidades, con los mayores almacenamientos de C y N en la capa superficial (0-10 cm), que disminuyeron con la profundidad; contrario con la relación C:N, densidad aparente,  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  que presentaron los valores más altos en la profundidad 20-30 cm. Entre las tres zonas de muestreo también hubo diferencias altamente significativas ( $p < 0.005$ ), mostrando el efecto de la altura sobre el nivel del mar, destacándose la zona alta por presentar mayores contenidos de C y N, mayor relación C:N, y menor densidad aparente y abundancia natural de  $^{15}\text{N}$ .

En 24 de los 96 sitios muestreados hubo cambios de vegetación de tipo fotosintético C3 (cafetal, relicto de selva) por C4 (pastizal, cultivo de caña panelera) y viceversa. En estos lugares el  $^{13}\text{C}$  varió entre -25.31 y -18.82‰ indicando que el carbono almacenado en el suelo en gran parte fue producto de la fijación de las plantas C3 y se conservó incluso después de 16 años de haberlas sustituido. Contrariamente, los relictos de selva tuvieron una alta capacidad de estabilización del carbono, mostrando que en un periodo de 13 años lograron reemplazar más del 70% del C proveniente de pastizales que estuvieron durante 60 años.

En las emisiones de  $\text{CH}_4$  se observó que pastizal fue el único uso que presentó producción de este gas en el suelo, con acumulados netos positivos durante los ocho meses evaluados ( $444.76 \text{ mg m}^{-2}$ ), mientras que los demás sirvieron como sumideros de este gas de efecto de invernadero, principalmente cafetal variedad Colombia que consumió  $-838.40 \text{ mg m}^{-2}$ . Por otra parte, todos los usos emitieron  $\text{N}_2\text{O}$ , pero el pastizal mostró el mayor flujo neto acumulado con  $1771.01 \text{ mg m}^{-2}$ .

La distribución espacial del carbono mostró que todas las grillas a excepción de la número dos presentaron dependencia espacial entre los sitios de muestreo, destacándose las grillas tres y cinco porque la distancia a la cual se tomaron las muestras no fue suficiente para eliminar la dependencia entre los datos, indicando la existencia de características del suelo que variaron a una escala mayor a la comprendida por las grillas, lo que pudo estar asociado con procesos formadores de suelo más que con el uso y la cobertura vegetal del terreno.

Los pastizales fueron los que más favorecieron la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, porque emitieron grandes cantidades de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O; mientras que cafetal variedad Colombia a pesar de tener los mayores almacenamientos en la totalidad del perfil y los mayores consumos de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, no fue considerado un uso apropiado para la prestación de servicios ambientales relacionados con el ciclaje de nutrientes, porque va en contravía de los principios de la Ecotecnología debido a que la condición de monocultivo lo convierte en un sistema en el que los procesos de autorregulación no son efectivos, requiriendo la intervención constante del ser humano por medio de prácticas de manejo como fertilización, fumigación, zoca y eliminación de arvenses; las cuales representan costos monetarios y energéticos altos.

**Palabras clave:** carbono, nitrógeno, <sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, distribución espacial, cokriging, uso y cobertura vegetal del terreno.

## ABSTRACT

In Alcalá, Valle del Cauca, percentages and stocks of soil organic carbon and nitrogen, C:N ratio, bulk density and natural abundance of  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  at 0-10, 10-20 and 20-30 cm were evaluated. It was carried out in three altitudinal ranges between 1150-1600 m, constructing grids with 16 sampling points located at 200 m from each other.

Methane ( $\text{CH}_4$ ) and nitrous oxide emissions ( $\text{N}_2\text{O}$ ) were evaluated during eight months in forest, Colombian coffee variety and bamboo, using closed chamber method. Also, spatial distribution of carbon stocks at 0-30 cm were analyzed with geostatistical tool cokriging, using like interpolation covariable nitrogen stock in 0-30 cm.

Significant differences ( $p < 0.05$ ) between layers were found in soil physicochemical properties, major C and N stocks were in surface (0-10 cm), decreasing in deepest layers; contrary to C: N, bulk density,  $^{13}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}$  with highest values in 20-30 cm. Also three sampling zones differ significantly ( $p < 0.05$ ), showing altitude effect and differentiating high zone due to major C and N contents, high C:N ratio and low bulk density and  $^{15}\text{N}$  natural abundance.

In 24 of 96 sampling points there was changes from C3 (coffee, forest) to C4 vegetation (pasture, sugarcane) and vice versa. In these sites  $^{13}\text{C}$  ranged -25.31 and -18.82‰ indicating that sequestered carbon was fixed by C3 plants and it was in soil 16 years after substitution. Contrary, forest showed high carbon stabilization capacity because in 13 years replace more than 70% of C from pastures those were over 60 years.

$\text{CH}_4$  emissions were observed only in pasture, with positive net values during eight months (2345.24  $\text{mg m}^{-2}$ ), while other land uses served as sinks of this greenhouse gas, mainly Colombian coffee variety that consumed -838.40  $\text{mg m}^{-2}$ . In other hand,  $\text{N}_2\text{O}$  was emitted in all land uses, but pasture showed major net flux with 820.31  $\text{mg m}^{-2}$ .

Carbon spatial distribution showed spatial dependence between sampling points in all grids except number two, differentiating grids three and five because sampling distance was no sufficient for eliminating data dependence; indicating the existence of soil properties variations to a superior scale that grids, and it could be related with soil formation processes more than land use and vegetal land cover.

Pastures promoted green house effect gases concentration into atmosphere, due to they presented high  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, while Colombian coffee variety showed major carbon stocks in profile and greatest consumption of  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$ , this land use was not considered appropriate for provisioning ecosystem services related with nutrient cycling, because of it is contrary to Ecotechnology principles, being a monoculture with inefficient self-regulation processes, requiring constant human intervention through management practices such as fertilization, pest control, pruning and weeds elimination, those represent high monetary and energetic costs.

**Keywords:** carbon, nitrogen,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , spatial distribution, cokriging, land use and vegetal land cover.

## CONTENIDO

|  | pág. |
|--|------|
| LISTA DE TABLAS  | 10   |
| INTRODUCCIÓN   | 15   |
| INTRODUCCIÓN   | 15   |
| 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE   | 17   |
| 1.1. Interacción entre usos de la tierra y almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo | 17   |
| 1.2. Interacción entre usos de la tierra y emisiones de gases de invernadero en el suelo     | 19   |
| 1.3. Dinámica de la materia orgánica en el suelo   | 21   |
| 2. METODOLOGÍA   | 22   |
| 2.1. Localización del estudio  | 22   |
| 2.2. Almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo                                       | 25   |
| 2.3. Emisiones de gases de invernadero en el suelo   | 26   |
| 2.4. Dinámica de la materia orgánica en el suelo   | 27   |
| 2.5. Análisis de la información  | 28   |
| 3. RESULTADOS  | 32   |
| 3.1. Usos del terreno muestreados en las tres zonas  | 32   |
| 3.2. Carbono y nitrógeno del suelo   | 33   |
| 3.2.1. C y N edáficos en las tres zonas de muestreo  | 33   |
| 3.2.2. Variación del C y N por profundidades del suelo                                       | 35   |
| 3.3. Dinámica del carbono orgánico del suelo (abundancia natural de $^{13}\text{C}$ )        | 45   |
| 3.3.1. Abundancia natural de $^{13}\text{C}$ por usos y coberturas vegetales del terreno     | 45   |
| 3.3.2. Tasas de recambio y procedencia del carbono orgánico del suelo                        | 46   |
| 3.4. Emisiones de $\text{CH}_4$ y $\text{N}_2\text{O}$ en el suelo                           | 52   |
| 3.5. Variabilidad espacial de los almacenamientos de carbono en la capa 0-30 cm              | 56   |
| 4. DISCUSIÓN   | 63   |

|  |    |
|--|----|
| 4.1. El método   | 63 |
| 4.2. Variación del carbono y nitrógeno del suelo                                     | 65 |
| 4.3. Dinámica del carbono orgánico del suelo (abundancia natural de <sup>13</sup> C) | 66 |
| 4.4. Emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O                                 | 68 |
| 4.5. Variabilidad espacial de los almacenamientos de C en la capa 0-30 cm            | 69 |
| 4.6. Discusión general   | 71 |
| 5. CONCLUSIONES  | 75 |
| 6. RECOMENDACIONES   | 76 |
| BIBLIOGRAFÍA   | 77 |

## LISTA DE TABLAS

|   | pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Características de los suelos de la zona de estudio  | 23   |
| Tabla 2. Variación con la profundidad de los parámetros evaluados en las zonas alta, media y baja   | 34   |
| Tabla 3. Contribución de cada variable físico-química del suelo a los componentes uno y dos extraídos en el ACP de la profundidad 0-10 cm de las tres zonas de muestreo                   | 36   |
| Tabla 4. Promedios y desviaciones estándar (valores en paréntesis) por conglomerado de las variables físico-químicas analizadas en la profundidad 0-10 cm de las tres zonas de muestreo.  | 38   |
| Tabla 5. Contribución de cada variable físico-química del suelo a los componentes uno y dos extraídos en el ACP de la profundidad 10-20 cm de las tres zonas de muestreo                  | 39   |
| Tabla 6. Promedios y desviaciones estándar (valores en paréntesis) por conglomerado de las variables físico-químicas analizadas en la profundidad 10-20 cm de las tres zonas de muestreo. | 41   |
| Tabla 7. Contribución de cada variable físico-química del suelo a los componentes uno y dos extraídos en el ACP de la profundidad 20-30 cm de las tres zonas de muestreo                  | 42   |
| Tabla 8. Promedios y desviaciones estándar (valores en paréntesis) por conglomerado de las variables físico-químicas analizadas en la profundidad 20-30 cm de las tres zonas de muestreo. | 44   |
| Tabla 9. Abundancia natural promedio de $^{13}\text{C}$ por uso y cobertura del terreno.  | 46   |
| Tabla 10. Tasas de recambio de la materia orgánica en sitios donde hubo cambios de vegetación de tipo fotosintético C3 a C4 o viceversa.  | 48   |
| Tabla 11. Humedad gravimétrica y emisiones promedio de $\text{CH}_4$ y $\text{N}_2\text{O}$ por mes   | 53   |
| Tabla 12. Almacenamiento promedio de C y N en la capa de suelo 0-30 cm por usos y coberturas vegetales del terreno de cada zona de muestreo.  | 57   |
| Tabla 13. Parámetros de los modelos ajustados para la interpolación   | 59   |
| Tabla 14. Almacenamiento de carbono en diferentes usos y coberturas vegetales del terreno   | 70   |

## LISTA DE FIGURAS

|  | pág. |
|--|------|
| Figura 1. Procesos que afectan el almacenamiento de carbono en el suelo.   | 17   |
| Figura 2. Ciclo del nitrógeno  | 19   |
| Figura 3. Localización de las grillas de muestreo en las zonas altitudinales del municipio de Alcalá.  | 24   |
| Figura 4. Precipitación y temperatura en los meses de muestreo de emisiones de CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O.   | 25   |
| Figura 5. Esquema secuencial del análisis de la información  | 29   |
| Figura 6. Usos y coberturas vegetales del terreno muestreadas por zona   | 32   |
| Figura 7. a) Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm. b) Proyección de los sitios de muestreo en el plano (C1 y C2) agrupados por zonas ( $p < 0.01$ ).   | 35   |
| Figura 8. Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en la profundidad 0-10 cm de las tres zonas. Proyección de los sitios de muestreo en los planos (C1 y C2) agrupados por medio de análisis de conglomerados con cinco niveles de partición ( $p < 0.01$ ). a) zona alta, b) zona media y c) zona baja.   | 37   |
| Figura 9. Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en la profundidad 10-20 cm de las tres zonas. Proyección de los sitios de muestreo en los planos (C1 y C2) agrupados por medio de análisis de conglomerados con cinco niveles de partición ( $p < 0.01$ ). a) zona alta, b) zona media y c) zona baja.  | 40   |
| Figura 10. Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en la profundidad 20-30 cm de las tres zonas. Proyección de los sitios de muestreo en los planos (C1 y C2) agrupados por medio de análisis de conglomerados con cinco niveles de partición ( $p < 0.01$ ). a) zona alta, b) zona media y c) zona baja. | 43   |

|  |    |
|--|----|
| Figura 11. Aporte según el tipo fotosintético de la vegetación al porcentaje total de carbono promedio en sitios de la zona alta en los que se presentaron cambios de vegetación.                                  | 47 |
| Figura 12. Carbono almacenado por tipo de vegetación en 0-30 cm (zona alta)  | 49 |
| Figura 13. Procedencia del carbono en sitios de la zona media en los que se presentaron cambios en la vegetación.  | 50 |
| Figura 14. C almacenado en 0-30 cm por tipo de vegetación (zona media)   | 50 |
| Figura 15. Procedencia del carbono en sitios de la zona baja en los que se presentaron cambios en la vegetación.   | 51 |
| Figura 16. C almacenado en 0-30 cm por tipo de vegetación (zona baja).   | 52 |
| Figura 17. Porcentaje promedio de humedad gravimétrica del suelo por uso del terreno. Letras minúsculas diferentes en la leyenda indican diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno. | 53 |
| Figura 18. Emisiones promedio de CH <sub>4</sub> por uso del terreno. Letras minúsculas diferentes en la leyenda indican diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno.                 | 54 |
| Figura 19. Emisiones promedio de N <sub>2</sub> O por uso del terreno. Letras minúsculas diferentes en la leyenda indican diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno.                | 55 |
| Figura 21. Semivariogramas ajustados a cada grilla de muestreo   | 58 |
| Figura 22. Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 1.   | 59 |
| Figura 23. Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 2.   | 60 |
| Figura 24. Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 3.   | 61 |
| Figura 25. Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 4.   | 61 |
| Figura 26. Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 5.   | 62 |

Figura 27. Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 6. 62

Figura 28. Tendencias encontradas en los almacenamientos de C y N y las emisiones de gases de efecto invernadero en el suelo. 72

## LISTA DE ANEXOS

|   | pág. |
|---|------|
| Anexo 1. Resultados de los análisis estadísticos obtenidos con cada programa utilizado      | 83   |
| Anexo 2. Descripción de cada sitio de muestreo de carbono y nitrógeno del suelo             | 94   |
| Anexo 3. Descripción de productos utilizados en las prácticas de fertilización y fumigación | 103  |

## INTRODUCCIÓN

Las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se están incrementando en tasas de 1.5, 7 y 0.8 ppmv/año respectivamente, debido a actividades antrópicas como la utilización de combustibles fósiles y los cambios en el uso del terreno; lo que ha provocado un aumento en la temperatura promedio global con una tasa de calentamiento de 0.17°C/década, que excede la tasa crítica (0.10°C/década) en la que los ecosistemas son capaces de adaptarse a cambios climáticos (Lal, 2004b). Globalmente los suelos a un metro de profundidad contienen 1500 Gt de carbono orgánico, de las que se estima que el 44% está localizado en los suelos de los trópicos, los cuales a su vez poseen los menores tiempos de residencia de la materia orgánica debido a la mayor temperatura y precipitación, lo que hace que los depósitos de carbono respondan con mayor rapidez a cambios ambientales como la sustitución de usos y coberturas vegetales del terreno (López-Ulloa, 2005).

En el caso del Eje Cafetero colombiano, la modernización de los sistemas de producción, aceleró el proceso de sustitución de selvas andinas por monocultivos y potreros; ocasionando el deterioro de la cobertura vegetal, agotamiento de nutrientes del suelo, problemas de lixiviación y erosión, impacto sobre la biodiversidad, alteración de los ciclos hidrológicos, del nitrógeno y del carbono y disminución de la capacidad productiva de los agroecosistemas (Feijoo *et al.*, 2002). Sin embargo, en algunas zonas como el municipio de Alcalá, Valle del Cauca, algunos agricultores criadores se han resistido a participar de las oleadas que proponían los cambios, conservando las variedades de cafetal con sombrero, manteniéndolos marginalmente y asociados con algunos cultivos de pancoger (yuca, plátano), frutales y cítricos, y en ocasiones aislados árboles maderables (nogal cafetero y laurel). También conservaron y aumentaron los relictos de selva principalmente en las orillas de quebradas, riachuelos y nacimientos (Feijoo *et al.*, 2007).

Estas prácticas han hecho que el paisaje del municipio de Alcalá sea heterogéneo, con historia de usos, coberturas y manejo variables, y según Leifeld *et al.* (2005) además del clima local, el carbono edáfico depende de condiciones específicas de cada sitio, por lo tanto, se requieren métodos de muestreo que permitan representar los cambios a nivel local y del paisaje e identificar patrones de distribución de las características fisicoquímicas del suelo.

Por las consideraciones anteriores, y teniendo en cuenta que la ecotecnología utiliza como herramienta el autodiseño de los ecosistemas de manera que exista mutuo beneficio entre el ser humano y el ambiente natural (Mitsch y Jorgensen, 1989); se puede afirmar que el mejoramiento de los servicios ambientales relacionados con el aumento de la captura de carbono, disminución de las emisiones de gases de invernadero e incremento del aporte de materia orgánica al suelo, es una vía ecotecnológica que requiere en primera instancia el conocimiento de los beneficios del aprovechamiento de los mecanismos de regulación de los sistemas. En este caso, se debe tener en cuenta que los procesos naturales disminuyen las concentraciones atmosféricas de gases de invernadero, los cuales a excepción del dióxido de carbono se eliminan en gran parte a través de reacciones químicas o fotoquímicas dentro de la atmósfera, mientras el CO<sub>2</sub> efectúa ciclos continuos entre varios compartimentos conocidos como sumideros (vegetación, suelo y océano) (IPCC, 1997).

Por viabilidad técnica, económica y metodológica en el mediano plazo, los ecosistemas terrestres se convierten en los depósitos de C que mejor se pueden utilizar para aumentar este servicio ambiental, y teniendo en cuenta que un 75% de este elemento se encuentra en el suelo; surge la prioridad de realizar investigaciones sobre su retención en las partes subterráneas (Callo *et al.*, 2001), así no haya sido considerado como un mecanismo importante de captura por los diseñadores de políticas sobre cambio climático (Acosta *et al.*, 2001), quienes han tenido en cuenta principalmente la fijación de este elemento en la biomasa aérea. Por lo tanto, evaluar el almacenamiento y algunos flujos de carbono y nitrógeno en diferentes usos y coberturas vegetales del terreno, sería el primer paso para llegar al diseño de tecnologías que mejoren la prestación de servicios ecosistémicos a partir del suelo.

Para abordar los problemas expuestos se propuso:

## **OBJETIVOS**

### **General**

Evaluar la relación entre usos y coberturas vegetales del terreno en Alcalá (Valle del Cauca) con el almacenamiento de carbono y nitrógeno y la emisión de metano y óxido nitroso en el suelo.

### **Específicos**

Estimar los contenidos de carbono y nitrógeno y las emisiones de metano y óxido nitroso en el suelo de diferentes usos y coberturas vegetales del terreno,

Determinar la dinámica del carbono en el suelo por medio del isótopo estable  $^{13}\text{C}$  en diferentes usos y coberturas vegetales del terreno,

Analizar la distribución espacial de los almacenamientos de carbono y nitrógeno en el suelo de acuerdo con los usos y coberturas vegetales del terreno.

### **Hipótesis**

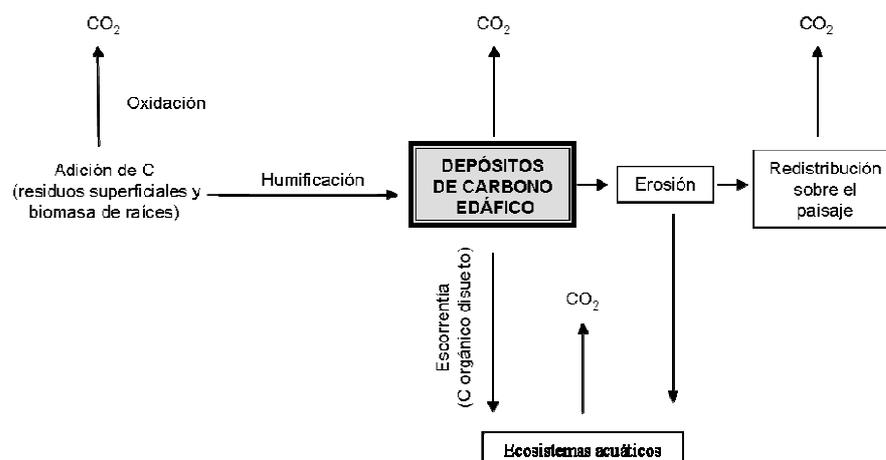
El carbono y el nitrógeno edáficos varían con la altura sobre el nivel del mar y no solo dependen del uso y la cobertura actual del terreno, debido a que están influidos por sistemas anteriores que han contribuido con la fijación de estos dos elementos en el suelo. Además, el uso y la cobertura también afectan las emisiones de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  que son superiores en sistemas con mayor grado de intervención.

## 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 1.1. Interacción entre usos de la tierra y almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo

La mayoría del carbono entra a los ecosistemas vía fotosíntesis, siendo más evidente el almacenamiento cuando se da en la biomasa superficial; sin embargo los suelos son los que poseen la mayor cantidad de este elemento, ya que más de la mitad del que es asimilado finalmente llega a la parte subterránea por medio del crecimiento, el movimiento y los exudados de las raíces de las plantas, además de la descomposición de hojarasca (Montagnini y Fair, 2004). Por otra parte, los depósitos de carbono orgánico en el suelo representan un equilibrio dinámico de pérdidas y ganancias que se afectan por procesos erosivos, oxidación, humificación y escorrentía (Figura 1), razón por la cual, el secuestro de carbono se da principalmente en aquellos sistemas que aportan altas cantidades de biomasa, mejoran la estructura del suelo, aumentan la actividad y la diversidad de fauna edáfica y propician mecanismos de ciclaje (Lal, 2004a)

Globalmente se encuentra entre 1.5 y 3 veces más carbono en los suelos que en la vegetación, por lo que son considerados los mayores depósitos del carbono terrestre, del cual el 13% está contenido en los suelos tropicales (Dixon, 1995 y Young, 1997, citados por Montagnini y Fair, 2004). Sin embargo, el almacenamiento de este elemento en el suelo es sensible a cambios en el uso de la tierra y las prácticas de manejo. Las pérdidas de carbono edáfico se dan por la conversión de ecosistemas naturales a sistemas agrícolas, debido a la reducción en los aportes de materia orgánica y la protección física del suelo, y a la disminución de materiales no solubles en los residuos de cosecha, de manera que estas conversiones pueden reducir el carbono del suelo más del 50% a una profundidad de 20 cm y entre 25-30% a 100 cm durante un periodo de agricultura de 30 a 50 años (Tan y Lal, 2005).



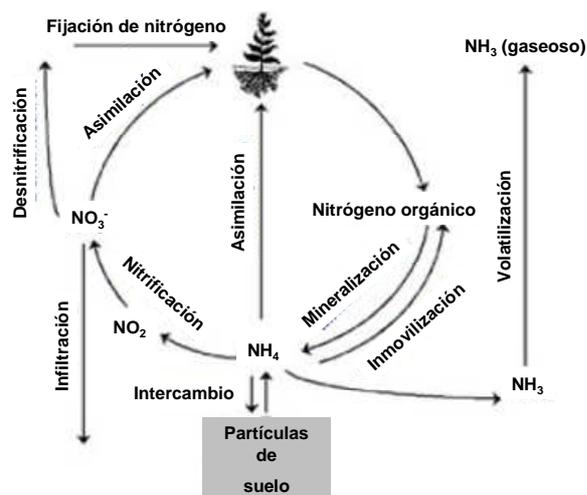
**Figura 1.** Procesos que afectan el almacenamiento de carbono en el suelo.

En cuanto al nitrógeno, el ciclo está conformado por los procesos de i) asimilación por algunas plantas, ii) intercambio o atracción de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) hacia la superficie del suelo, iii) nitrificación o conversión del amonio en nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (en presencia de oxígeno) iv) desnitrificación, paso de nitratos a nitrógeno gaseoso ( $\text{N}_2$ ) (en condiciones anaeróbicas), v) volatilización, que es la pérdida de amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) en forma gaseosa (en condiciones de pH alto), vi) mineralización, donde se libera amonio a partir de la descomposición microbial de la materia orgánica, vii) inmovilización, conversión de nitrógeno inorgánico ( $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$ ) en orgánico, viii) Fijación de nitrógeno gaseoso por algunos organismos y ix) filtración, movimiento del nitrógeno en el suelo por la acción del agua (Figura 2) (Jones y Jacobsen, 2005).

La habilidad de algunos sistemas para retener nitrógeno atmosférico, se asocia con el tipo de vegetación, el estado sucesional, la historia del uso de la tierra, la topografía y las condiciones edáficas (Small y McCarthy, 2005). Sin embargo las actividades antrópicas que han modificado el paisaje a gran escala, entre las cuales se encuentra la agricultura y la ganadería, han aumentado el nitrógeno al interior de los ecosistemas, generando pérdidas de aniones y cationes del suelo, procesos de acidificación e incremento en la salida de nitrógeno a sistemas acuáticos (Baer *et al.*, 2006). Según Enquete (1994, citado por Ahlgrimm, 1996), la fertilización mineral, la aplicación de estiércol, la fijación biológica de nitrógeno y la deposición de N atmosférico, genera excesos de este elemento en el suelo, que se pierden principalmente por infiltración a las aguas subterráneas en forma de nitratos, otra cantidad considerable escapa a la atmósfera en forma de amoniaco y en menor proporción se pierden por procesos de desnitrificación ( $\text{N}_2$  gaseoso).

En el contexto local Hurtado y Navarro (2006) en el municipio de Alcalá Valle del Cauca, en el sistema café variedad Colombia encontraron los valores más altos para los almacenamientos de carbono, sin embargo no lo consideraron un uso de la tierra prestador de servicios ambientales, por su condición de monocultivo que contribuye con la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad. Por otra parte, Arias y Hoyos (2004) en el Eje Cafetero de Colombia, también registraron mayor almacenamiento de carbono edáfico en café variedad Colombia, en comparación con rodales de guadua, cítricos y pastizales, atribuyendo este resultado a que este tipo de café es un cultivo permanente que requiere manejo y por ende fertilización constante.

En la cuenca Dosquebradas, Risaralda., Hoyos y Comerford (2005), obtuvieron valores superiores en el contenido de carbono de pastizales a una profundidad de 10 cm, en comparación con café a libre exposición y con sombrero. En el departamento de Caldas Aristizábal *et al.* (2002) en un sistema agroforestal encontraron diferencias significativas en el contenido de carbono edáfico de acuerdo con las especies vegetales que estuvieran asociadas. Los mismos autores mencionaron estudios relacionados en la costa Atlántica de Costa Rica, encontrando que la tasa de fijación anual de carbono variaba entre bosques (0.4 a 1.4 t C/ha/año), dependiendo de la densidad básica y de la fracción de carbono de las especies vegetales presentes; mientras que en sistemas silvopastoriles el carbono disminuyó en el suelo por la reducción de la densidad de los pastos cercanos a los árboles introducidos en el sistema. Igualmente, los autores hicieron referencia a un trabajo realizado en Venezuela sobre la captura de carbono por matarratón (*Gliricida sepium*) en dos sistemas agroforestales, encontrando que en la asociación yuca-matarratón el almacenamiento de carbono fue dos veces superior al de pastizal-matarratón-leucaena.



**Figura 2.** Ciclo del nitrógeno

En otros trabajos como el de Saynes *et al* (2004), en bosques primarios y secundarios de México, encontraron que el contenido de carbono no se afectó por el estado sucesional de los bosques, y que en relación con el nitrógeno, los más jóvenes presentaron los mayores depósitos y el mayor potencial para el ciclaje.

Zinn *et al* (2005) en Brasil, mostraron que los s de carbono orgánico disminuían en sistemas de uso intensivo, sometidos a labranza en intervalos de tiempo de un año. Albrecht y Kandji (2003) consideraron que la cuantificación de los almacenamientos de carbono no es suficiente para determinar los beneficios netos de los sistemas agroforestales en relación con la atmósfera, razón por la cual recomiendan complementar la investigación con balances de gases como  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ .

## 1.2. Interacción entre usos de la tierra y emisiones de gases de invernadero en el suelo

En el cambio del uso del suelo se generan emisiones cuando la biomasa se extrae de las selvas, se quema o se deja descomponer en el sitio de extracción. Si por el contrario, ocurren sucesiones naturales en terrenos dedicados a cultivos o pastizales, se favorece la captura de  $\text{CO}_2$  (Chaparro *et al.*, 2001). Por lo tanto, la deforestación se ha convertido en uno de los principales promotores de la alteración de los ciclos del carbono y el nitrógeno, y por ende de las altas concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Las concentraciones atmosféricas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  se han incrementado también como consecuencia de las actividades agrícolas y el desarrollo industrial, provocando cambios en el clima a nivel global y efectos en la distribución, la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas (Anderson, 1992). El dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y el metano ( $\text{CH}_4$ ) son gases provenientes de emisiones biogénicas, los cuales se convierten en indicadores de la actividad biológica y el ciclaje de nitrógeno y carbono en el suelo (Gregorich *et al.*, 2006). Al respecto, Inubushi *et al.* (2003) afirman que las emisiones de  $\text{CH}_4$

y N<sub>2</sub>O están estrechamente relacionadas con la humedad del suelo, y varían con las temporadas del año, evidenciando una correlación alta con la precipitación.

En condiciones estrictamente anaerobias, los metanógenos pueden transformar parte de la materia orgánica a metano, utilizando principalmente dos rutas para la producción del gas; i)  $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$  y ii)  $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ . Además, se ha encontrado alta correlación entre las emisiones y la temperatura del suelo, razón por la cual las tasas de producción aumentan a temperaturas entre 15 y 40°C, al igual que cuando aumenta la temperatura del aire, la cual afecta la respiración y transpiración de las plantas (Huang *et al.*, 2005).

Por otro lado, Ahlgrimm (1996) afirma que el N<sub>2</sub>O se puede formar por medio de la nitrificación y la desnitrificación de fertilizantes nitrogenados; razón por la cual, el uso de fertilizantes amoniacales producen más óxido nitroso que aquellos a base de nitratos, porque en estos últimos, únicamente se da la reacción de desnitrificación, provocando que solo 0.4% y 3.2% del nitrógeno que se adiciona al suelo, escape en forma de N<sub>2</sub>O. Sin embargo, las emisiones de N<sub>2</sub>O no siempre son problema, porque es la forma en procesos de nitrificación y desnitrificación, los protones que están asociados con los aportes de nitrógeno inorgánico, y se consideran responsables de acidez en el suelo (Curtis *et al.*, 2006). De esta manera se demuestra que existen ciertos procesos naturales que pueden generar impactos ambientales o prestar servicios ecosistémicos, dependiendo de la intensidad y la frecuencia con que se lleve a cabo el proceso, por lo tanto, para el N<sub>2</sub>O sería necesario determinar las cantidades a partir de las cuales comienza a ser un contribuyente a la problemática de la acumulación de gases de efecto invernadero.

En Colombia, en 1990 el IDEAM realizó un estudio sobre las fuentes de emisiones de efecto invernadero, encontrando que por actividades agrícolas se emitieron 3723 Gg, distribuidas en monóxido de carbono (58.8%), metano (40%) y óxido nitroso (0.03%); mientras por el cambio en el uso del suelo la generación de gases había sido de 4129 Gg, principalmente de CO<sub>2</sub> (98.4%) y en menores proporciones metano (0.2%) y óxidos de nitrógeno (0.04%). Sin embargo, se concluyó que en relación con el cambio del uso del suelo, existía una alta incertidumbre de los resultados que se pudieran obtener para un año en particular, debido a la dificultad de conocer la dinámica de la pérdida de bosques por causas antropogénicas y de recuperación de los mismos por el abandono de tierras (Chaparro *et al.*, 2001).

Al respecto, Weitz *et al.* (2001), en un estudio sobre emisiones de N<sub>2</sub>O en Costa Rica, concluyeron que la fertilización aumentaba la disponibilidad de nitrógeno para los procesos microbiales y por consiguiente las emisiones de óxido nitroso; además observaron que la producción de gas estuvo relacionada con la humedad del suelo, encontrando las mayores emisiones cuando se aplicaba fertilizante y posteriormente se presentaban lluvias. En el mismo país, Veldkamp *et al.* (2001) analizaron flujos de metano en diferentes tipos de pastizales (tradicional, con aplicación de fertilizantes y con leguminosas asociadas), encontrando que éstos no consumieron CH<sub>4</sub> durante el año; y que en la época de lluvias los suelos emitieron el gas probablemente debido a la compactación que favoreció las condiciones anaeróbicas para los metanógenos.

### 1.3. Dinámica de la materia orgánica en el suelo

En zonas donde aún existe vegetación natural que no ha sido alterada, los contenidos de materia orgánica son relativamente constantes y las entradas de carbono en forma de materia en descomposición son similares a las salidas en forma de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, los cambios en el clima, la cobertura vegetal y los aportes de biomasa, alteran los tiempos de residencia de la materia orgánica en el suelo (Anderson, 1992).

Los residuos de las plantas, la biota del suelo y los metabolitos asociados a ellos conforman la fracción activa del carbono orgánico del suelo, la cual posee periodos de residencia en meses; la fracción pasiva, que puede persistir por años o décadas, y la fracción resistente, que persiste durante siglos y milenios. Estas fracciones contienen carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, pero la activa y la pasiva son las que controlan la liberación de nutrientes, cumpliendo de esta manera un papel importante en el funcionamiento de los ecosistemas y la sostenibilidad de la agricultura. La forma de evaluar estas dos fracciones del carbono orgánico del suelo es por medio de la cuantificación de elementos traza como el <sup>14</sup>C, <sup>13</sup>C y <sup>15</sup>N (Paul *et al.*, 2001).

Determinar los contenidos de <sup>13</sup>C en una secuencia cronológica de plantas C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>, es una técnica útil para medir in situ los cambios de la materia orgánica del suelo a través del tiempo. En lugares con plantas C<sub>3</sub>, la introducción de plantas C<sub>4</sub>, va a producir aumento en el <sup>13</sup>C, cuyo valor es utilizado para monitorear la pérdida de carbono derivado de plantas C<sub>3</sub> y realizar los cálculos de las tasas de recambio de la materia orgánica del suelo (Dignac *et al.*, 2005).

De otra parte, la evaluación del <sup>15</sup>N puede proporcionar información sobre los principales procesos de transformación y las pérdidas de nitrógeno en los ecosistemas (Watzka *et al.*, 2005); debido a que en aquellos en los que se presentan mayores pérdidas de nitrógeno, aumentan los contenidos de <sup>15</sup>N, contrario a lo que sucede en los que poseen ciclos de N relativamente cerrados (no sujetos a adiciones significativas de N de la atmósfera o por fertilizantes) (Eshetu, 2004)

En la Amazonía brasileña, Escobar y Toriatti Dematté (1991), evaluaron la distribución de la materia orgánica y de <sup>13</sup>C en suelos de selva húmeda tropical y pastizal de 15 años (*Paspalum notatum*), concluyendo que los pastizales habían ocasionado durante este tiempo una disminución de 57.5 tC/ha, representada en una pérdida del 25% del carbono total en relación con el bosque natural. Además, se encontró que en los suelos de los pastizales entre 14 y 30 cm de profundidad, más del 70% del carbono era proveniente de la selva, indicando la posibilidad de que en estos suelos no se hubiera alcanzado un nuevo equilibrio en la movilización de carbono.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Localización del estudio

El trabajo se realizó en el municipio de Alcalá, Valle del Cauca, en la vertiente occidental de la cordillera Central entre las coordenadas 75° 51' 22.91" W, 4° 43' 18.25" N y 75° 42' 11.94" W, 4° 38' 56.85" N, piso térmico medio (1000-2000 m) con temperatura media de 18-24 °C, precipitación promedio anual de 1350-2400 mm y humedad relativa promedio 65-80%. El clima en la zona es bimodal con dos temporadas secas (diciembre-febrero y junio-agosto) y dos lluviosas (marzo-mayo y septiembre-noviembre) (Zúñiga *et al.*, 2003).

Se consideró como universo poblacional el área del municipio entre 1150 y 1600 m, para la cual se definieron tres estratos, correspondientes a las zonas con altitudes; i) mayores o iguales a 1150 y menores a 1300 m, ii) mayores o iguales a 1300 y menores a 1450 m y iii) mayores o iguales a 1450 y menores o iguales a 1600 m. En cada estrato se construyeron dos grillas conformadas por 16 puntos de muestreo proyectados cada 200 m. La grilla uno y dos se localizaron en la zona alta en las veredas La Cuchilla, El Congal y Maravélez; la tres y cuatro en la zona media en La Polonia y Bélgica; y la cinco y seis en la zona baja correspondiente a El Higuérón (Figura 3).

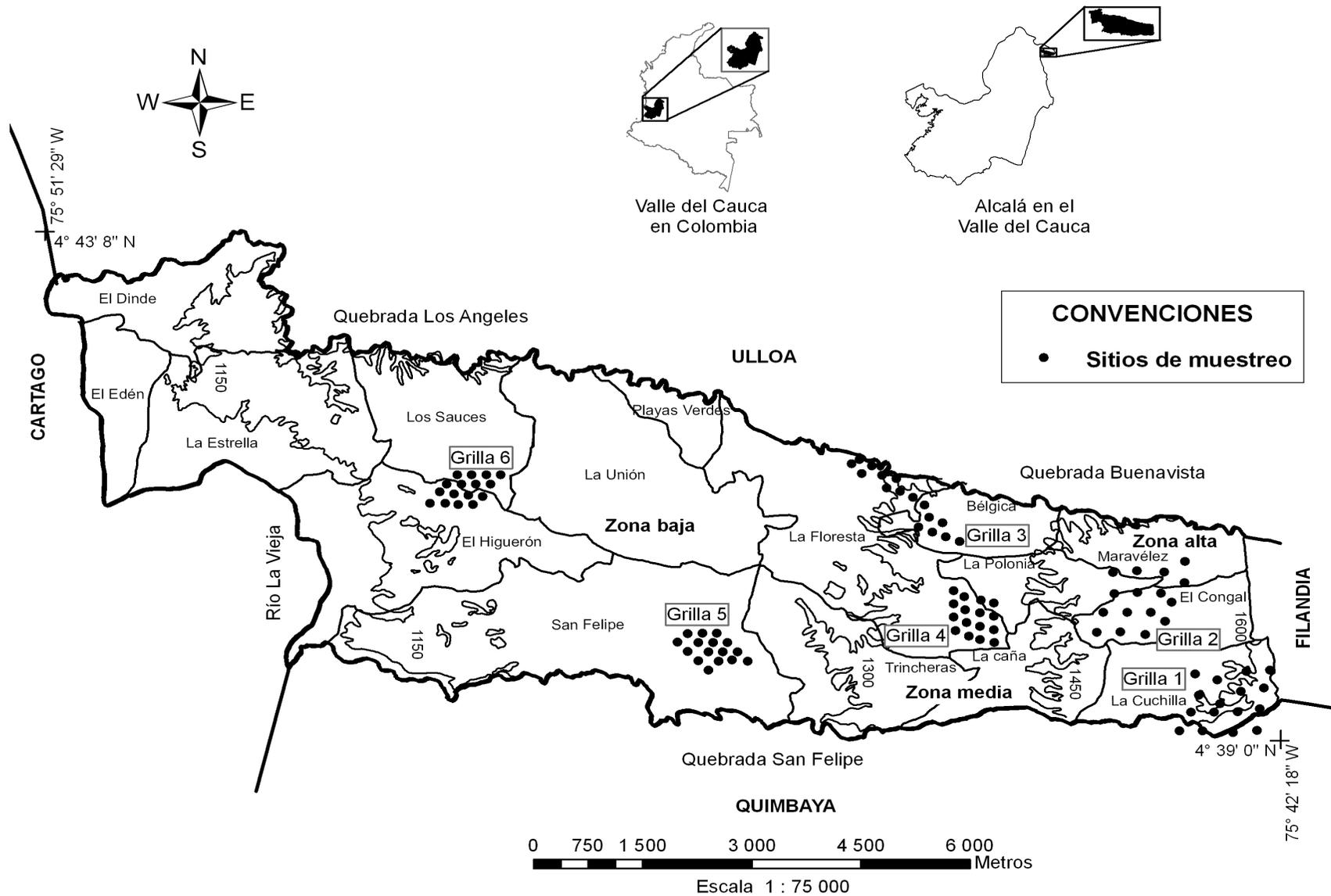
Los suelos entre 900 y 1250 m pertenecen a la unidad Malabar y entre 1250 y 1600 m a la unidad Chinchiná, ambas provienen de cenizas volcánicas pero presentan diferencias principalmente en la textura, saturación de bases, fertilidad, estructura y drenaje (Tabla 1) (Alcaldía municipal de Alcalá, 2003; Cenicafé, 2007).

Según la CVC (1997) los suelos en el municipio de Alcalá corresponden a una asociación del 50% de Typic Argiudolls que presenta epipedón mólico, horizonte argílico, régimen de humedad údico, saturación de bases mayor del 50% en todos los horizontes y decrecimiento regular del carbono orgánico; mientras el 50% restante pertenece a Typic Dystrandeps con epipedón úmbrico, baja saturación de bases, decrecimiento regular de carbono orgánico y régimen de humedad údico.

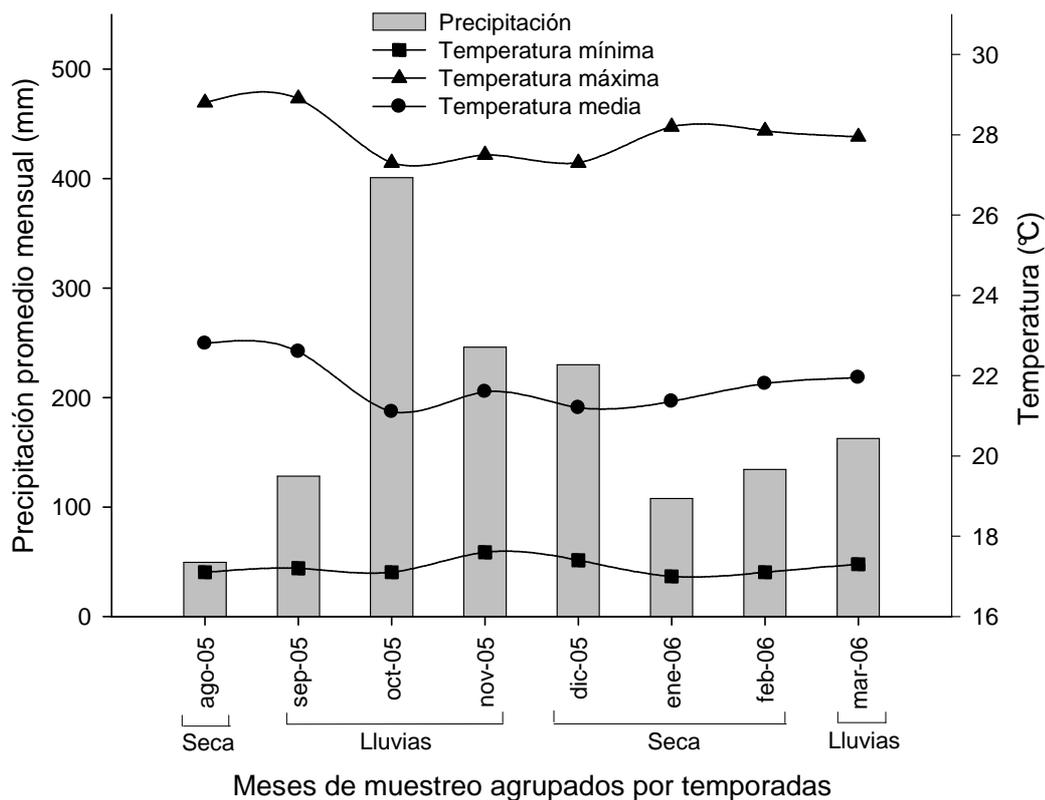
En la zona de estudio, durante el periodo en el que se realizaron los muestreos de emisiones de metano y óxido nitroso, se encontró que los meses de agosto-05 y enero-06 fueron los de menor precipitación con valores de 49.5 y 107.65 mm respectivamente, mientras octubre-05 (400.8 mm), noviembre-05 (246.1 mm) y diciembre-05 (230 mm) fueron los de mayor pluviosidad. En relación con la temperatura media, agosto-05 (22.8°C) y septiembre-05 (22.6°C) fueron los meses más calurosos contrario a octubre-05 (21.1°C) y diciembre-05 (21.2°C) (Figura 4). Los registros de precipitación para los ocho meses en que se realizaron las mediciones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en el suelo, se tomaron en la Estación Arturo Gómez localizada en el municipio de Alcalá (4° 40' N – 75° 47' W) a 1259 m.

**Tabla 1.** Características de los suelos de la zona de estudio

| Parámetro                       | Unidad Malabar                                | Unidad Chinchiná                     |
|---------------------------------|---|--------------------------------------|
| Orden del suelo                 | Alfisol                                       | Andisol                              |
| Clasificación taxonómica        | Argiudolls<br>Endoaqualfs                     | Melanudands Fulvudands<br>Hapludands |
| Rango altitudinal (m)           | 900-1250                                      | 1250-1600                            |
| Origen                          | Cenizas volcánicas                            | Cenizas volcánicas                   |
| Textura                         | Franco arcilloso-<br>Arcilloso                | Franco                               |
| Presencia de turrículos         | Horizonte B                                   | Horizonte B                          |
| Permeabilidad                   | Lenta   | -                                    |
| Fertilidad                      | Media-Alta                                    | Baja                                 |
| Saturación de bases             | 40-50%  | 20-35%                               |
| Capacidad intercambio catiónico | 18 – 20 meq/100 g de<br>suelo                 | 11 – 30 meq/100 g de suelo           |
| Materia orgánica                | 1-10%   | 1-15%                                |
| Color                           | Pardo oscuro a<br>pardo amarillento<br>oscuro | Negro a pardo amarillento            |
| Tipo estructura                 | Blocosa subangular<br>y migajosa              | Blocosa angular y<br>subangular      |
| Clase estructura                | Mediana a fina                                | Fina                                 |
| Grado estructura                | Moderada a fuerte                             | Moderada a fuerte                    |
| Drenaje interno                 | Lento   | Rápido                               |
| Drenaje externo                 | Rápido  | Rápido                               |
| Drenaje natural                 | Imperfectamente<br>drenado                    | Moderadamente bien<br>drenado        |
| Presencia de poros              | Abundantes y finos                            | Abundantes y finos                   |
| pH                              | 5.0 - 6.2                                     | 4.2-6.0                              |



**Figura 3.** Localización de las grillas de muestreo en las zonas altitudinales del municipio de Alcalá.



**Figura 4.** Precipitación y temperatura en los meses de muestreo de emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O.

## 2.2. Almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo

Para la estimación del contenido de carbono y nitrógeno en el suelo se realizó un muestreo sistemático estratificado en dos dimensiones (modelo de la red cuadrada), donde la muestra estuvo determinada por la selección de un par de puntos al azar para fijar las coordenadas de la unidad superior izquierda y se construyó en forma alineada y desalineada (Cochran, 1974). Por lo anterior, se propuso la utilización de seis grillas al interior de las cuales se proyectaron sistemáticamente 16 puntos de muestreo distanciados 200 m entre ellos.

Se realizaron 96 monolitos de 0.25 x 0.25 x 0.3 m de profundidad en los que se tomaron muestras de hojarasca superficial (mantillo) y suelo en las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm, las cuales se analizaron por medio del método de Walkley – Black para determinar el porcentaje de materia orgánica (% M.O.) y calcular los porcentajes de carbono y nitrógeno multiplicando por el factor 1.724. Las muestras se enviaron a la Universidad de Davis, California, Estados Unidos, para la determinación de los análisis de suelos.

En cada profundidad del monolito se tomaron muestras con un cilindro de volumen conocido para densidad aparente. Inicialmente se registró el peso húmedo (P1), se secaron las muestras de suelo (105° C por 72 horas) hasta retirar completamente la humedad, y finalmente se utilizó el peso seco (P2) en la determinación la densidad aparente (DA) con la fórmula;

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = (P1-P2) / \text{Volumen interno del cilindro}$$

El porcentaje de carbono en el mantillo se determinó por medio de la prueba de cenizas, con combustión de la muestra a 550°C durante dos horas y 30 minutos, y posteriormente se calculó así;

$$\% \text{Ceniza} = (\text{Peso ceniza} / \text{Peso inicial muestra}) * 100$$

$$\% \text{Materia Orgánica} = 100 - \% \text{Ceniza}$$

$$\% \text{Carbono} = (\% \text{Materia orgánica} * \text{Peso inicial muestra}) * 0.46 / 100$$

Los contenidos de carbono y nitrógeno en el suelo en toneladas de carbono por hectárea (tC/ha) se calcularon a partir de los valores de %C y %N, densidad aparente y profundidad del muestreo de la siguiente manera;

$$\text{Carbono en suelo (tC/ha)} = \% \text{C} * \text{DA} * \text{P}$$

$$\text{Nitrógeno en suelo (tN/ha)} = \% \text{N} * \text{DA} * \text{P}$$

Donde:

**%C** = Porcentaje de carbono

**%N** = Porcentaje de nitrógeno

**DA** = Densidad Aparente (g/cm<sup>3</sup>)

**P** = Profundidad de muestreo (cm)

### **2.3. Emisiones de gases de invernadero en el suelo**

Se evaluaron cuatro de los usos y coberturas del terreno más frecuentes en los muestreos (relicto de selva, cafetal variedad Colombia, guadual y pastizal), con dos repeticiones cada uno. Se realizaron muestreos mensualmente durante un periodo de ocho meses para estimar emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en el suelo, utilizando el método de cámara cerrada, que consistió en la instalación de forma permanente de ocho anillos de PVC, los cuales en el momento del muestreo fueron cubiertos con cámaras que contaban con orificios para equilibrar presión y medir temperatura en el interior.

Se tomaron muestras a 0, 10, 20 y 30 minutos con jeringas de 20 ml y se introdujeron las muestras de aire en frascos con vacío que fueron analizados por cromatografía de gases.

En la estimación de emisiones de gases de invernadero, se utilizó como covariable la humedad del suelo, razón por la cual se colectaron dos muestras de suelo en 0-10 cm en la zona aledaña a la cámara (15-20 cm de distancia al aro de PVC) las cuales se mezclaron para determinar humedad gravimétrica. Se registró el peso húmedo, se secó el suelo a 105°C durante 24 horas y al obtener el peso seco se utilizó la fórmula;

$$\% \text{HG} = ((\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}) / \text{Peso húmedo}) * 100$$

## 2.4. Dinámica de la materia orgánica en el suelo

En los 96 monolitos se tomaron muestras de suelo para el análisis de isótopos estables de carbono y nitrógeno ( $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$ ). Del análisis de laboratorio se obtuvieron los resultados de la abundancia de  $^{13}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) que es una relación de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  basada en el estándar internacional V-PDB (Viena-Pee Dee Belemnite) y la abundancia de  $^{15}\text{N}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ) que es una relación de  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  con respecto al valor estándar del nitrógeno del aire. Para lo anterior se utilizaron las siguientes fórmulas;

$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{\left( \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\text{muestra}} \right)}{\left( \frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\text{VPDB}} \right)} - 1 \right) \times 1000$$

$$\delta^{15}\text{N} = \left( \frac{\left( \frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}}{\text{muestra}} \right)}{\left( \frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}}{\text{Aire}} \right)} - 1 \right) \times 1000$$

Se recolectó información en cada uno de los predios sobre la historia de los usos del terreno y las coberturas vegetales evaluadas; para conocer los cambios presentados a través del tiempo, y posteriormente calcular las tasas de recambio de la materia orgánica (% año<sup>-1</sup>), haciendo una relación entre  $\delta^{13}\text{C}$  y el tiempo de establecimiento de cada sistema.

En los sitios en los que se presentaron cambios de vegetación de tipo fotosintético C3 (cafetales y relictos de selva) a C4 (pastizales y cultivos de caña panelera) o viceversa, se calculó el aporte de cada tipo de vegetación al porcentaje de carbono total, utilizando la fórmula

$$C_{C3} = \left( \frac{\left( \delta^{13}\text{C}_{SC3} - \delta^{13}\text{C}_{SC4} \right)}{\left( \delta^{13}\text{C}_{VC3} - \delta^{13}\text{C}_{SC4} \right)} \times \%C \right)$$

$$C_{C4} = \left( \frac{\left( \delta^{13}\text{C}_{SC4} - \delta^{13}\text{C}_{SC3} \right)}{\left( \delta^{13}\text{C}_{VC4} - \delta^{13}\text{C}_{SC3} \right)} \times \%C \right)$$

en la cual

$C_{C3}$  = carbono derivado de vegetación C3

$C_{C4}$  = carbono derivado de vegetación C4

$\delta^{13}\text{C}_{SC3}$  = abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  medida en el suelo con vegetación C3

$\delta^{13}\text{C}_{SC4}$  = abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  medida en el suelo con vegetación C4

$\delta^{13}\text{C}_{VC3}$  = abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  en vegetación C3 (-26‰)

$\delta^{13}\text{C}_{VC4}$  = abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  en vegetación C4 (-12‰)

## 2.5. Análisis de la información

Para las variables físico-químicas del suelo (densidad aparente, %C, %N, almacenamientos de C y N, relación C:N,  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$ ) se realizaron análisis de varianza no paramétricos (pruebas de Kruskal Wallis para muestras independientes) con el programa SPSS versión 10.0 (SPSS Inc, 1999), para buscar diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre estratos o zonas de muestreo, entre profundidades y entre usos y coberturas vegetales del terreno.

Se realizaron Análisis de Componentes Principales (ACP) para reducir la dimensión de los datos, agrupando las variables en componentes no correlacionados entre sí y facilitando la explicación de la variabilidad total. El primer ACP se llevó a cabo con 26 variables que correspondieron a las físico-químicas para las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm; encontrando que los datos tendieron a agruparse por zonas de muestreo, mostrando el efecto de la altura sobre el nivel del mar. Por esta razón se realizaron tres ACP por estrato, uno para cada profundidad y simultáneamente se corrieron análisis de conglomerados con cinco niveles de partición, para agrupar en los planos factoriales de cada ACP sitios con características similares, y posteriormente validar las agrupaciones con análisis discriminante (prueba de permutación) (Anexo 1). En el análisis estadístico se utilizó el programa ADE4 (Thioulouse *et al.*, 1997).

Para el análisis de la distribución espacial de los almacenamientos carbono se elaboraron mapas por medio de la técnica de interpolación cokriging, utilizando el programa GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences versión 5.1 (Gamma Design Software, 2001). El cokriging permitió realizar interpolaciones utilizando una variable primaria (Almacenamiento de carbono en 0-30 cm) correlacionada con una secundaria (Almacenamiento de nitrógeno en 0-30 cm) (Figura 5).

Para cada variable se realizó análisis de semivarianza, obteniendo semivariogramas individuales, los cuales se unieron para lograr finalmente el semisemivariograma cruzado. La semivarianza es un estadístico de autocorrelación definido por la fórmula;

$$g(h) = [1/2N(h)] \sum [z_i - z_{i+h}]^2$$

en la cual,

$g(h)$  = semivarianza para el intervalo de distancia  $h$ ;

$z_i$  = valor medido en la muestra tomada en el punto  $i$ ;

$z_{i+h}$  = valor medido en la muestra tomada en el punto  $i+h$ ; y

$N(h)$  = número total de muestras agrupadas en el intervalo de distancia  $h$

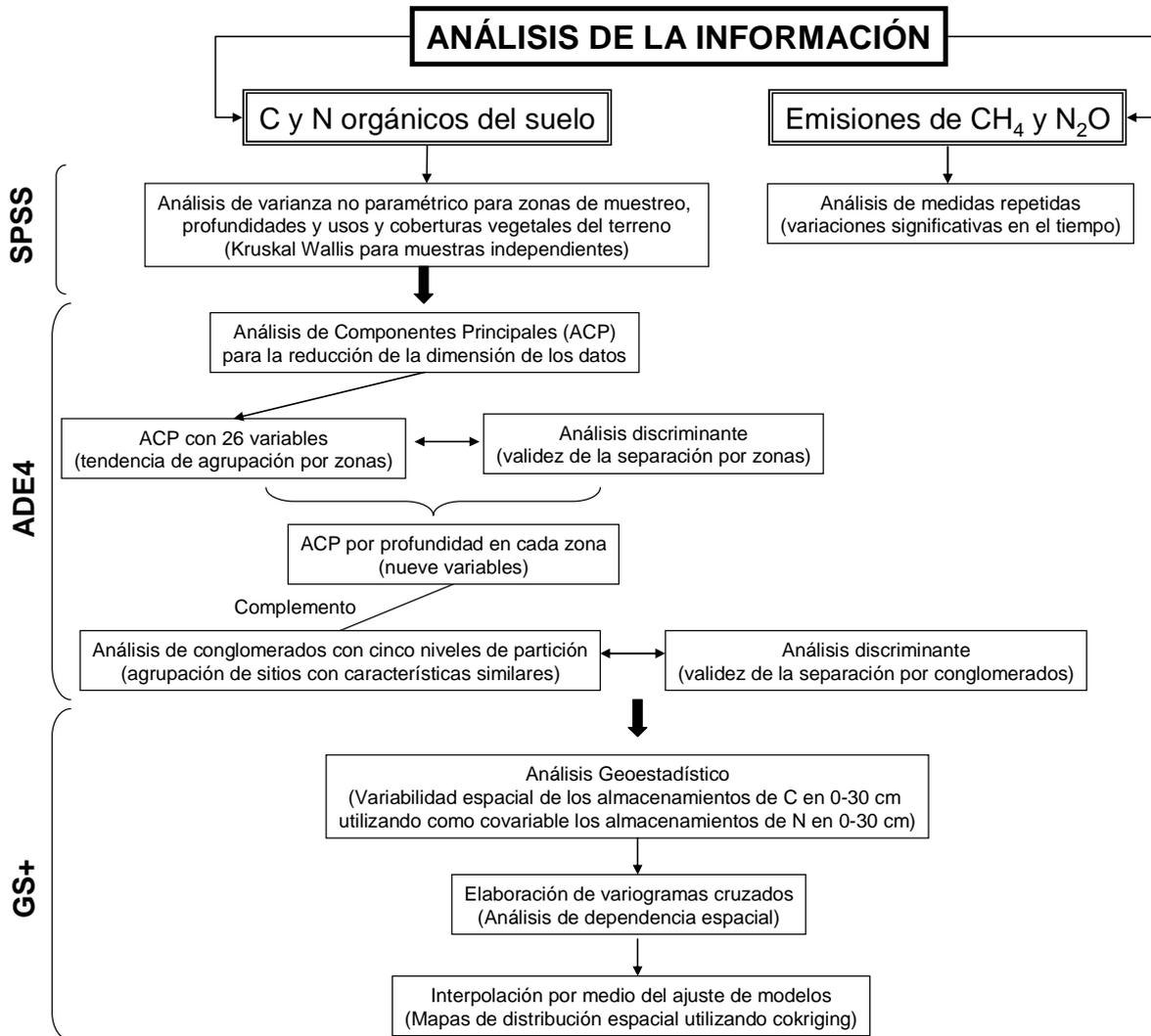
La semivarianza fue evaluada calculando  $g(h)$  para todos los pares de puntos posibles en el conjunto de datos, asignando cada uno a un intervalo de distancia  $h$ . Para obtener intervalos homogéneos se utilizó la fórmula;

$$\text{clase} = \text{INT}(D/DI)+1$$

en la cual,

$D$  = distancia que separa el par de puntos

DI = intervalo de distancia  
 INT = función integral



**Figura 5.** Esquema secuencial del análisis de la información

Posteriormente se construyeron los semivariogramas graficando los valores de h con las semivarianzas de cada intervalo de distancia. En algunos de los casos se asumió anisotropía, correspondiente a una tendencia direccional en los datos. Este análisis permitió definir un eje principal o ángulo de azimut en el que la semivarianza fue menor, lo que indicó la existencia de mayor continuidad espacial en una dirección que fue la que se utilizó para la generación de los modelos.

Los modelos utilizados fueron Exponencial (isotrópico), Gaussiano (isotópico y anisotrópico) y Lineal (isotrópico), y presentaron los siguientes parámetros;

- Efecto pepita ( $C_0$ ): representó el intercepto con el eje  $y$  del modelo utilizado en el semivariograma, indicando la variación que no fue espacialmente dependiente dentro del rango evaluado,
- Punto de silla ( $C_0+C$ ): representó la varianza que fue espacialmente independiente. En los modelos se visualizó como el punto en que la línea tomó una forma asintótica.
- Varianza estructural ( $C$ ): permitió identificar que los datos estuvieran espacialmente estructurados, y se calculó por la diferencia entre el punto de silla y el efecto pepita,
- Proporción ( $C/C_0+C$ ): indicó la proporción de la varianza de la muestra ( $C_0+C$ ) que fue explicada por la varianza espacialmente estructurada ( $C$ ). Los valores cercanos a uno indicaron alta dependencia espacial entre los datos.
- Rango ( $A_0$ ): fue la distancia de separación (en metros) sobre la cual los puntos de muestreo estuvieron autocorrelacionados.

El exponencial isotrópico es un modelo que alcanza el punto de silla gradualmente y utiliza la fórmula;

$$g(h) = C_0 + C[1-\exp(-h/A_0)]$$

El modelo lineal isotrópico describe un semivariograma en línea recta, de manera que no presenta punto de silla. La fórmula utilizada es;

$$g(h) = C_0 + [h(C/ A_0)]$$

El modelo Gaussiano o hiperbólico isotrópico es similar al exponencial pero asume un aumento gradual para el intercepto  $y$ . La fórmula es

$$g(h) = C_0 + C[1-\exp(-h^2/ A_0^2)]$$

en los anteriores modelos isotrópicos,

$h$  = intervalo de distancia,

$C_0$  = efecto pepita  $\geq 0$ ,

$C$  = varianza estructural  $\geq C_0$

$A$ = rango

El modelo Gaussiano anisotrópico utiliza la fórmula;

$$g(h) = C_0 + C[1-\exp(-h^2/A^2)]$$

en la cual,

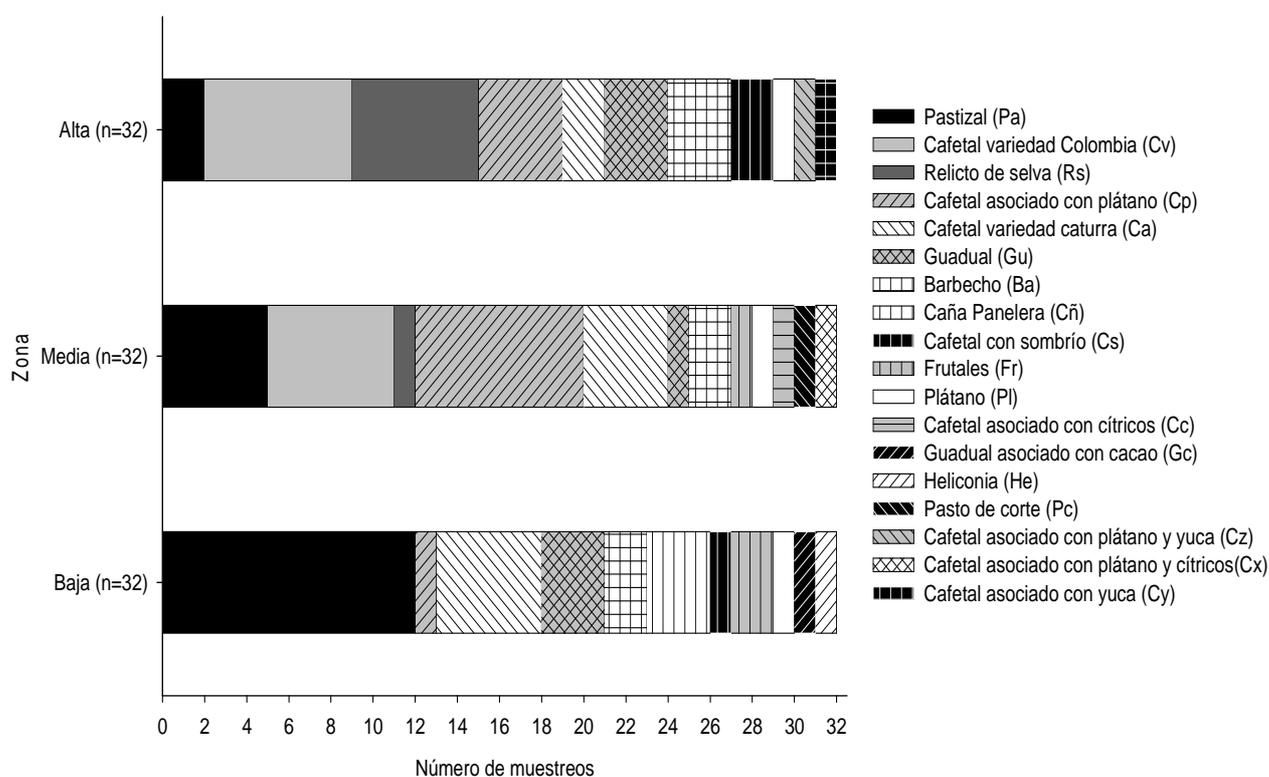
xh = intervalo de distancia,  
C<sub>o</sub> = efecto pepita  $\geq 0$ ,  
C = varianza estructural  $\geq C_0$   
A =  $A_1^2[\cos^2(q - f)] + A_2^2[\sin^2(q - f)]$ ,  
A<sub>1</sub> = rango para el eje mayor (f),  
A<sub>2</sub> = rango para el eje menor (f + p/2),  
f = ángulo de máxima variación,  
q = ángulo entre pares de puntos.

En los análisis las abreviaciones de los usos y coberturas utilizadas fueron; Ba: barbecho, Cc: café-cítricos, Ca: café variedad caturra, Cñ: caña panelera, Cx: café-plátano-cítricos, Cp: café-plátano, Cz: café-plátano-yuca, Cs: café con sombrío, Cv: café variedad Colombia, Cy: café-yuca, Fr: frutales, Gc: guadua-cacao, Gu: guadua, He: heliconia, Pa: pastizal, Pc: pasto de corte, Pl: plátano, Rs: relicto de selva.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Usos del terreno muestreados en las tres zonas

En las seis grillas de muestreo se encontraron 18 usos y coberturas vegetales del terreno, siendo cafetal variedad Colombia el más representativo en el área de estudio. Este uso en la zona alta predominó junto con el relicto de selva, en la media con cafetal-plátano y en la baja con pastizal (Figura 6).



**Figura 6.** Usos y coberturas vegetales del terreno muestreadas por zona

Los monocultivos de café y la mayoría de cafetales asociados con otras especies vegetales recibieron adiciones de fertilizantes de síntesis química, úrea, DAP, 15-15-15 y 25-4-24, en cantidades que variaron entre 20 y 300 g/planta; además se zoquearon cada cuatro o cinco años y la frecuencia de eliminación de arvenses estuvo entre una y tres veces por año. En los pastizales, relictos de selva y barbechos no se realizaron aplicaciones de insumos, mientras en algunos guaduales se realizó extracción de material de forma esporádica. En los sistemas con

plátano en monocultivo o asociado, adicional a la fertilización se realizaron actividades como el deshoje y destronque de cada una de las plantas (Anexos 2, 3).

## **3.2. Carbono y nitrógeno del suelo**

### **3.2.1. C y N edáficos en las tres zonas de muestreo**

Los porcentajes y almacenamientos de C y N fueron mayores en la capa superficial y tendieron a disminuir con la profundidad, presentando diferencias altamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre las capas de suelo 0-10, 10-20 y 20-30 cm; mientras que la relación C:N, densidad aparente,  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  presentaron los valores más altos en 20-30 cm. Entre los estratos de muestreo también se presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), siendo la zona alta diferente a las demás en todas las variables fisicoquímicas con excepción del  $^{13}\text{C}$ , caracterizándose por presentar los valores más altos para relación C:N, porcentajes y almacenamientos de C y N; y por contar con la menor densidad aparente y abundancia natural de  $^{15}\text{N}$ . En cuanto a las profundidades evaluadas, la zona alta no presentó diferencias entre capas para las variables  $^{13}\text{C}$ ; la media para relación C:N y densidad aparente; y la baja para densidad aparente y  $^{13}\text{C}$  (Tabla 2).

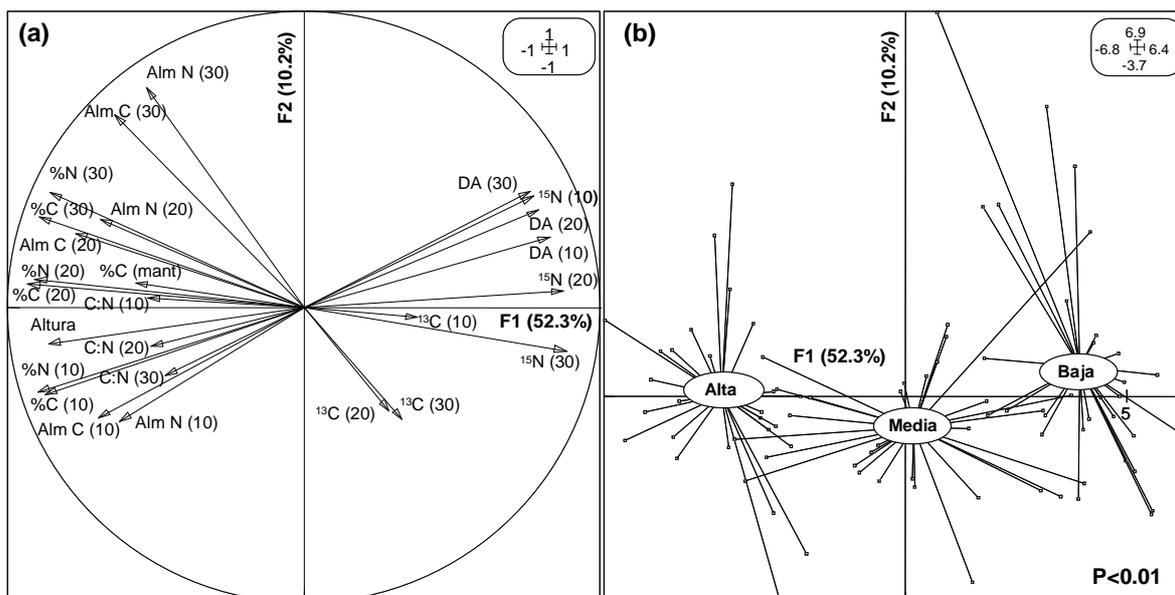
El porcentaje de carbono en el mantillo, en las zonas media y baja no presentó correlación significativa con la altura sobre el nivel del mar, con valores cercanos y relativamente bajos (3.9 y 4.2% respectivamente) en comparación con la zona alta que obtuvo un promedio de 9.2%.

El ACP general explicó el 62.5% de la variabilidad total. El componente uno (52.3%) agrupó la altura sobre el nivel del mar y los porcentajes y almacenamientos de C y N en las profundidades 0-10 y 10-20 cm, mientras que en el componente dos (10.2%) las variables de mayor peso fueron los almacenamientos de C y N en 20-30 cm (Figura 3a). Los registros se agruparon por zonas, mostrando el efecto de la altura sobre el nivel del mar principalmente en los contenidos de C y N de las profundidades 0-10 y 10-20 cm, lo que ocasionó que en función del eje horizontal se separara la zona alta por presentar los mayores valores en estas dos variables, seguida por la zona media y la zona baja. Esta última se caracterizó por presentar suelos más densos y mayor abundancia natural de  $^{15}\text{N}$  (Figura 3b). En el componente dos, la separación no fue significativa entre zonas, indicando que los almacenamientos de C y N en la capa más profunda (20-30 cm) no estuvieron altamente correlacionados con la altura sobre el nivel del mar.

**Tabla 2.** Variación con la profundidad de los parámetros evaluados en las zonas alta, media y baja

| Prof (cm) | %C                           | %N                           | C:N                            | Alm C (t C ha <sup>-1</sup> )  | Alm N (t N ha <sup>-1</sup> ) | DA (g cm <sup>-3</sup> )     | δ <sup>13</sup> C (‰)          | δ <sup>15</sup> N (‰)         |
|-----------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Alta      |                              |                              |                                |                                |                               |                              |                                |                               |
| 0-10      | 7.72 <sup>Aa</sup><br>(1.83) | 0.69 <sup>Aa</sup><br>(0.17) | 11.17 <sup>Aa</sup><br>(0.79)  | 42.88 <sup>Aa</sup><br>(11.60) | 3.86 <sup>Aa</sup><br>(1.07)  | 0.56 <sup>Aa</sup><br>(0.10) | -24.49 <sup>Aa</sup><br>(1.30) | 4.59 <sup>Aa</sup><br>(0.83)  |
| 10-20     | 6.48 <sup>Ab</sup><br>(1.43) | 0.56 <sup>Ab</sup><br>(0.13) | 11.57 <sup>Aab</sup><br>(0.97) | 39.51 <sup>Aab</sup><br>(9.09) | 3.43 <sup>Aab</sup><br>(0.82) | 0.61 <sup>Ab</sup><br>(0.08) | -24.14 <sup>Aa</sup><br>(0.98) | 4.92 <sup>Aab</sup><br>(0.66) |
| 20-30     | 5.75 <sup>Ac</sup><br>(1.25) | 0.48 <sup>Ac</sup><br>(0.12) | 11.97 <sup>Ab</sup><br>(1.13)  | 37.06 <sup>Ab</sup><br>(8.50)  | 3.12 <sup>Ab</sup><br>(0.78)  | 0.65 <sup>Ab</sup><br>(0.08) | -23.94 <sup>Aa</sup><br>(0.83) | 5.15 <sup>Ab</sup><br>(0.66)  |
| Media     |                              |                              |                                |                                |                               |                              |                                |                               |
| 0-10      | 5.01 <sup>Ba</sup><br>(1.83) | 0.47 <sup>Ba</sup><br>(0.17) | 10.49 <sup>Ba</sup><br>(0.71)  | 35.31 <sup>Ba</sup><br>(10.97) | 3.36 <sup>Aa</sup><br>(1.01)  | 0.74 <sup>Ba</sup><br>(0.15) | -24.26 <sup>Aa</sup><br>(1.66) | 5.63 <sup>Ba</sup><br>(1.41)  |
| 10-20     | 3.92 <sup>Bb</sup><br>(1.37) | 0.36 <sup>Bb</sup><br>(0.12) | 10.79 <sup>Ba</sup><br>(0.98)  | 28.37 <sup>Bb</sup><br>(8.69)  | 2.64 <sup>Bb</sup><br>(0.80)  | 0.74 <sup>Ba</sup><br>(0.15) | -23.86 <sup>Ab</sup><br>(0.99) | 6.47 <sup>Bb</sup><br>(1.25)  |
| 20-30     | 3.41 <sup>Bb</sup><br>(1.14) | 0.30 <sup>Bb</sup><br>(0.09) | 11.15 <sup>Ba</sup><br>(1.16)  | 24.91 <sup>Bb</sup><br>(7.23)  | 2.25 <sup>Bb</sup><br>(0.66)  | 0.76 <sup>Ba</sup><br>(0.18) | -23.59 <sup>Ab</sup><br>(0.84) | 6.99 <sup>Bc</sup><br>(0.94)  |
| Baja      |                              |                              |                                |                                |                               |                              |                                |                               |
| 0-10      | 2.54 <sup>Ca</sup><br>(0.57) | 0.25 <sup>Ca</sup><br>(0.06) | 10.32 <sup>Bab</sup><br>(0.83) | 24.99 <sup>Ca</sup><br>(5.80)  | 2.43 <sup>Ba</sup><br>(0.56)  | 0.99 <sup>Ca</sup><br>(0.13) | -23.61 <sup>Aa</sup><br>(1.74) | 7.68 <sup>Ca</sup><br>(1.15)  |
| 10-20     | 2.08 <sup>Cb</sup><br>(0.90) | 0.21 <sup>Cb</sup><br>(0.09) | 10.17 <sup>Ca</sup><br>(1.16)  | 21.52 <sup>Cb</sup><br>(10.50) | 2.14 <sup>Cb</sup><br>(0.98)  | 1.03 <sup>Ca</sup><br>(0.13) | -23.84 <sup>Aa</sup><br>(1.22) | 8.17 <sup>Cab</sup><br>(1.15) |
| 20-30     | 2.13 <sup>Cb</sup><br>(1.15) | 0.20 <sup>Cb</sup><br>(0.11) | 10.67 <sup>Bb</sup><br>(1.05)  | 21.99 <sup>Bb</sup><br>(13.60) | 2.08 <sup>Bb</sup><br>(1.30)  | 1.03 <sup>Ca</sup><br>(0.14) | -23.37 <sup>Aa</sup><br>(1.38) | 8.29 <sup>Cb</sup><br>(1.25)  |

Prof: profundidad, C:N: relación carbono nitrógeno, Alm C: almacenamiento de carbono, Alm N: almacenamiento de nitrógeno, DA: densidad aparente, δ<sup>13</sup>C: abundancia natural de <sup>13</sup>C, δ<sup>15</sup>N: abundancia natural de <sup>15</sup>N. Letras mayúsculas diferentes entre filas de la misma profundidad indican diferencias significativas (p<0.05) entre zonas. Letras minúsculas diferentes dentro de la misma zona indican diferencias significativas (p<0.05) entre profundidades.



**Figura 7.** a) Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm. b) Proyección de los sitios de muestreo en el plano (C1 y C2) agrupados por zonas ( $p < 0.01$ ).

### 3.2.2. Variación del C y N por profundidades del suelo

En la profundidad 0-10 cm de la zona alta el ACP explicó el 63.1% de la variabilidad total; las variables de mayor aporte al componente uno fueron %N (0.94) y almacenamiento de N (0.93), y al componente dos densidad aparente (0.91) y %C en el mantillo (-0.53) (Tabla 3). El componente uno (44.2%) separó los sitios con mayor C y N en los que la descomposición fue más rápida y la abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  fue menor (Figura 8a), correspondientes a los conglomerados cinco y tres que almacenaron en promedio 53.75 y 50.82 t C ha<sup>-1</sup>, y 4.92 y 4.70 t N ha<sup>-1</sup> respectivamente. El conglomerado tres se destacó principalmente por el predominio de sitios con menor grado de intervención como coberturas de guaduales (Gu-5, 26, 30), barbechos (Ba-9, 18) y relicto de selva (R17), además de un cafetal con sombrío de 60 años de edad (Cs10) en el que el manejo fue mínimo, por llevar a cabo una eliminación anual de arvenses y no realizar zoca ni aplicar fertilizantes. Por el contrario, el conglomerado cuatro con el cafetal variedad Colombia (Cv7) se separó por contar con los menores almacenamientos de C y N (11.27 t C ha<sup>-1</sup> y 0.97 t N ha<sup>-1</sup>) y mayor abundancia de  $^{13}\text{C}$  (-22.59) (Tabla 4), caracterizándose por ser un sitio en el que las aplicaciones de fertilizantes no se hicieron en cantidades constantes sino que dependieron de las deficiencias encontradas en análisis periódicos de fertilidad del suelo (Anexo 2).

El componente dos (18.9%) separó los sitios con mayor compactación del suelo y menor aporte de carbono por la hojarasca superficial, diferenciándose el conglomerado cinco (Cv23, Cp27 y Pa20) por presentar densidad aparente promedio de 0.75 g cm<sup>-3</sup> y 3.4% de carbono en el mantillo, mostrando que en algunos cafetales el aporte de la hojarasca puede llegar a ser tan bajo como el de los pastizales.

**Tabla 3.** Contribución de cada variable físico-química del suelo a los componentes uno y dos extraídos en el ACP de la profundidad 0-10 cm de las tres zonas de muestreo

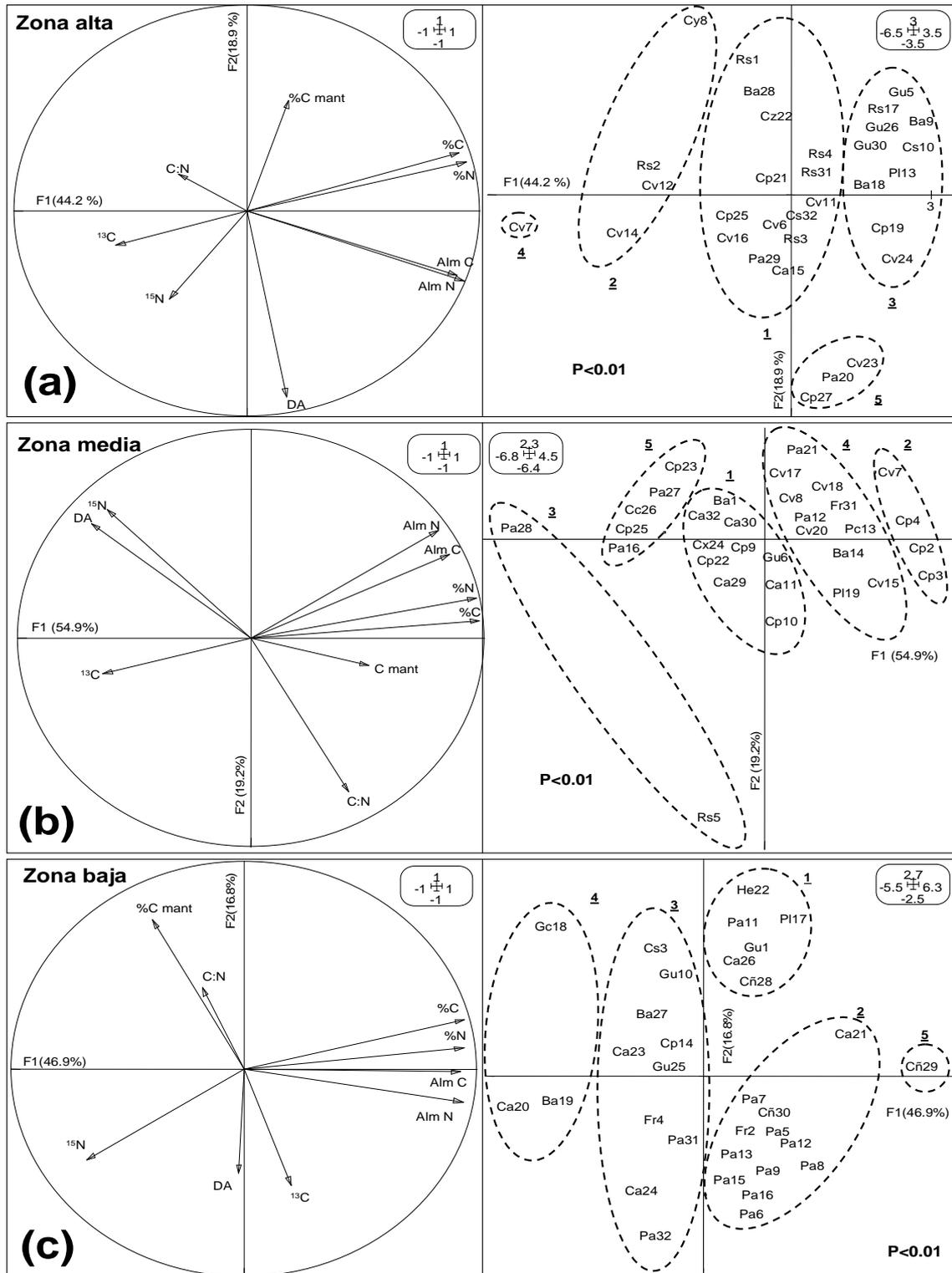
| Variable          | Alta  |       | Media |       | Baja  |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | C1    | C2    | C1    | C2    | C1    | C2    |
| Densidad aparente | 0.17  | 0.91  | -0.68 | 0.55  | -0.02 | 0.50  |
| Almacenamiento C  | 0.90  | 0.32  | 0.85  | 0.40  | 0.93  | 0.02  |
| Almacenamiento N  | 0.93  | 0.34  | 0.80  | 0.51  | 0.94  | 0.16  |
| Relación C:N      | -0.29 | -0.18 | 0.42  | -0.74 | -0.18 | -0.39 |
| %C mantillo       | 0.18  | -0.53 | 0.51  | -0.13 | -0.39 | -0.71 |
| %C                | 0.91  | -0.28 | 0.98  | 0.08  | 0.95  | -0.24 |
| %N                | 0.94  | -0.23 | 0.97  | 0.19  | 0.95  | -0.10 |
| <sup>13</sup> C   | -0.56 | 0.17  | -0.63 | -0.17 | 0.20  | 0.56  |
| <sup>15</sup> N   | -0.33 | 0.43  | -0.61 | 0.61  | -0.67 | 0.44  |

El 74.1% de la variabilidad de los datos fue explicado en la zona media para la profundidad 0-10 cm. En el componente uno (54.9%) las variables más importantes fueron %C (0.98) y %N (0.97), y en el componente dos (19.2%) relación C:N (-0.74) y <sup>15</sup>N (0.61) (Tabla 3). Los sitios con mayor densidad aparente en el suelo coincidieron con los de mayores abundancias de <sup>15</sup>N, y se diferenciaron de aquellos con altos contenidos de C y N que se agruparon en los conglomerados dos y cuatro en los que predominaron los cafetales en monocultivo y asociados (Figura 8b). El conglomerado tres se separó por los menores porcentajes y almacenamientos de C (1.91% y 11.37 t C ha<sup>-1</sup>) y N (0.16% y 0.97 t N ha<sup>-1</sup>); encontrándose al interior de este grupo dos sitios (Pa28 y Rs5) con características físico-químicas diferentes, que se separaron en función del componente dos, ubicando el relicto de selva en la parte inferior del plano factorial por poseer la mayor relación C:N (12.99), la menor abundancia natural de <sup>15</sup>N (1.34‰) y una de las densidades aparentes más bajas (0.51 g cm<sup>-3</sup>) (Tabla 4). La ubicación del sitio Pa28 hacia la parte izquierda del plano, muestra que este pastizal (anteriormente cafetal variedad Colombia) después de 10 años de establecimiento ha favorecido la estabilización de la materia orgánica, aumentando la abundancia de <sup>13</sup>C para alcanzar valores cercanos a los de la vegetación C4.

El ACP para la profundidad 0-10 cm en la zona baja explicó el 63.7% de la variabilidad total, siendo %C (0.98) y %N (0.95) las variables de mayor peso en el componente uno (46.9%), y %C en el mantillo (-0.71) y <sup>13</sup>C (0.56) en el componente dos (16.8%) (Tabla 3). El opuso sitios con altas abundancias de <sup>15</sup>N a aquellos de mayores almacenamientos de C y N, ubicándose estos últimos en los conglomerados uno, dos y cinco que estuvieron conformados principalmente por gramíneas como pastizales y caña panelera (Figura 8c), presentando valores que oscilaron entre 27.91-40.43 t C ha<sup>-1</sup> y 2.61-3.72 t N ha<sup>-1</sup> (Tabla 4)

Al interior de los conglomerados tres y cuatro se encontraron sitios que se separaron en función del componente dos, el cual mostró que los lugares con %C en el mantillo y relación C:N mayores, correspondieron a los suelos menos compactados y con abundancias bajas de <sup>13</sup>C.

De esta manera, el conglomerado uno se diferenció del resto por ser uno de los de mayor aporte de carbono por la hojarasca superficial (6.91%), menor densidad aparente (0.97 g cm<sup>-3</sup>) y <sup>13</sup>C más bajo (-25.21‰).



**Figura 8.** Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en la profundidad 0-10 cm de las tres zonas. Proyección de los sitios de muestreo en los planos factoriales (C1 y C2) agrupados por medio de análisis de conglomerados con cinco niveles de partición ( $p < 0.01$ ). a) zona alta, b) zona media y c) zona baja.

**Tabla 4.** Promedios y desviaciones estándar (valores en paréntesis) por conglomerado de las variables físico-químicas analizadas en la profundidad 0-10 cm de las tres zonas de muestreo.

| Cong  | n  | DA<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | Alm C<br>(t C ha <sup>-1</sup> ) | Alm N<br>(t N ha <sup>-1</sup> ) | C:N             | %C<br>mant      | %C             | %N             | <sup>13</sup> C<br>(‰) | <sup>15</sup> N<br>(‰) |
|-------|----|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| Alta  |    |                             |                                  |                                  |                 |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 14 | 0.55<br>(0.08)              | 41.92<br>(6.86)                  | 3.69<br>(0.63)                   | 11.37<br>(0.45) | 8.83<br>(3.37)  | 7.67<br>(0.88) | 0.67<br>(0.07) | -23.97<br>(1.29)       | 4.59<br>(0.76)         |
| 2     | 4  | 0.48<br>(0.08)              | 26.16<br>(4.52)                  | 2.26<br>(0.23)                   | 11.55<br>(1.56) | 9.81<br>(8.55)  | 5.58<br>(1.21) | 0.49<br>(0.09) | -23.86<br>(0.53)       | 5.21<br>(0.54)         |
| 3     | 10 | 0.54<br>(0.06)              | 50.82<br>(5.40)                  | 4.70<br>(0.26)                   | 10.79<br>(0.67) | 11.08<br>(2.53) | 9.41<br>(0.75) | 0.87<br>(0.06) | -25.70<br>(0.57)       | 4.22<br>(1.01)         |
| 4     | 1  | 0.60                        | 11.27                            | 0.97                             | 11.64           | 7.09            | 1.89           | 0.16           | -22.59                 | 4.43                   |
| 5     | 3  | 0.75<br>(0.02)              | 53.75<br>(7.69)                  | 4.92<br>(0.24)                   | 10.89<br>(1.05) | 3.45<br>(2.29)  | 7.16<br>(1.20) | 0.66<br>(0.05) | -24.41<br>(1.35)       | 5.01<br>(0.54)         |
| Media |    |                             |                                  |                                  |                 |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 10 | 0.74<br>(0.10)              | 30.05<br>(3.72)                  | 2.90<br>(0.38)                   | 10.38<br>(0.35) | 4.08<br>(1.71)  | 4.15<br>(0.57) | 0.40<br>(0.05) | -24.64<br>(0.69)       | 5.93<br>(1.09)         |
| 2     | 4  | 0.63<br>(0.04)              | 50.11<br>(4.36)                  | 4.58<br>(0.36)                   | 10.96<br>(0.79) | 7.41<br>(4.39)  | 7.90<br>(0.51) | 0.72<br>(0.01) | -25.30<br>(0.67)       | 4.64<br>(0.73)         |
| 3     | 2  | 0.81<br>(0.42)              | 11.37<br>(7.79)                  | 0.97<br>(0.47)                   | 11.06<br>(2.72) | 1.90<br>(1.42)  | 1.91<br>(1.96) | 0.16<br>(0.14) | -20.91<br>(0.32)       | 4.39<br>(4.32)         |
| 4     | 11 | 0.69<br>(0.11)              | 41.95<br>(5.47)                  | 4.01<br>(0.52)                   | 10.47<br>(0.51) | 3.67<br>(2.99)  | 6.15<br>(0.65) | 0.59<br>(0.05) | -24.95<br>(0.50)       | 5.18<br>(0.67)         |
| 5     | 5  | 0.91<br>(0.15)              | 29.00<br>(7.20)                  | 2.85<br>(0.65)                   | 10.15<br>(0.28) | 2.10<br>(0.86)  | 3.18<br>(0.39) | 0.31<br>(0.04) | -22.49<br>(2.64)       | 7.27<br>(0.73)         |
| Baja  |    |                             |                                  |                                  |                 |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 6  | 0.97<br>(0.08)              | 28.30<br>(3.06)                  | 2.61<br>(0.26)                   | 10.86<br>(0.85) | 6.91<br>(2.49)  | 2.92<br>(0.21) | 0.27<br>(0.03) | -25.21<br>(0.86)       | 6.69<br>(1.15)         |
| 2     | 12 | 1.01<br>(0.10)              | 27.91<br>(2.17)                  | 2.78<br>(0.24)                   | 10.04<br>(0.38) | 2.04<br>(0.99)  | 2.78<br>(0.33) | 0.28<br>(0.03) | -22.58<br>(1.57)       | 7.67<br>(0.73)         |
| 3     | 10 | 0.97<br>(0.16)              | 20.93<br>(3.00)                  | 2.10<br>(0.33)                   | 10.02<br>(0.79) | 4.61<br>(2.23)  | 2.19<br>(0.28) | 0.22<br>(0.03) | -24.30<br>(1.41)       | 8.23<br>(0.57)         |
| 4     | 3  | 1.00<br>(0.21)              | 15.12<br>(0.74)                  | 1.36<br>(0.12)                   | 11.19<br>(1.47) | 7.02<br>(1.12)  | 1.55<br>(0.26) | 0.14<br>(0.04) | -23.21<br>(1.24)       | 8.84<br>(1.49)         |
| 5     | 1  | 1.01                        | 40.43                            | 3.72                             | 10.87           | 1.41            | 4.00           | 0.36           | -20.76                 | 4.86                   |

Para la profundidad 10-20 cm de la zona alta se explicó el 66.1% de la variabilidad total. Al igual que en 0-10 cm las variables más importantes en el componente uno fueron %N (0.95) y almacenamiento de N (0.95), mientras en el componente dos fueron densidad aparente (0.53) y abundancia de <sup>15</sup>N (0.53) (Tabla 5). El C1 (47.7%) separó los grupos con valores altos de <sup>13</sup>C de los que presentaron mayor C y N, encontrándose entre estos últimos los conglomerados cuatro y uno, con alta presencia de guaduales y relictos de selva (Figura 9a).

En relación con el C2 (18.4%), los lugares con suelos más densos y con altas abundancias de <sup>15</sup>N, la relación C:N fue baja y por consiguiente la descomposición más rápida, destacándose el conglomerado cinco, en su mayoría conformado por cafetales con densidad aparente promedio de 0.67 g cm<sup>-3</sup> y <sup>15</sup>N de 5.31‰ (Tabla 6). Además, dentro de los conglomerados uno, dos y cuatro los sitios estuvieron dispersos en función del eje vertical, mostrando que

lugares con características fisicoquímicas diferentes en el suelo pueden llegar a almacenar cantidades similares de C y N.

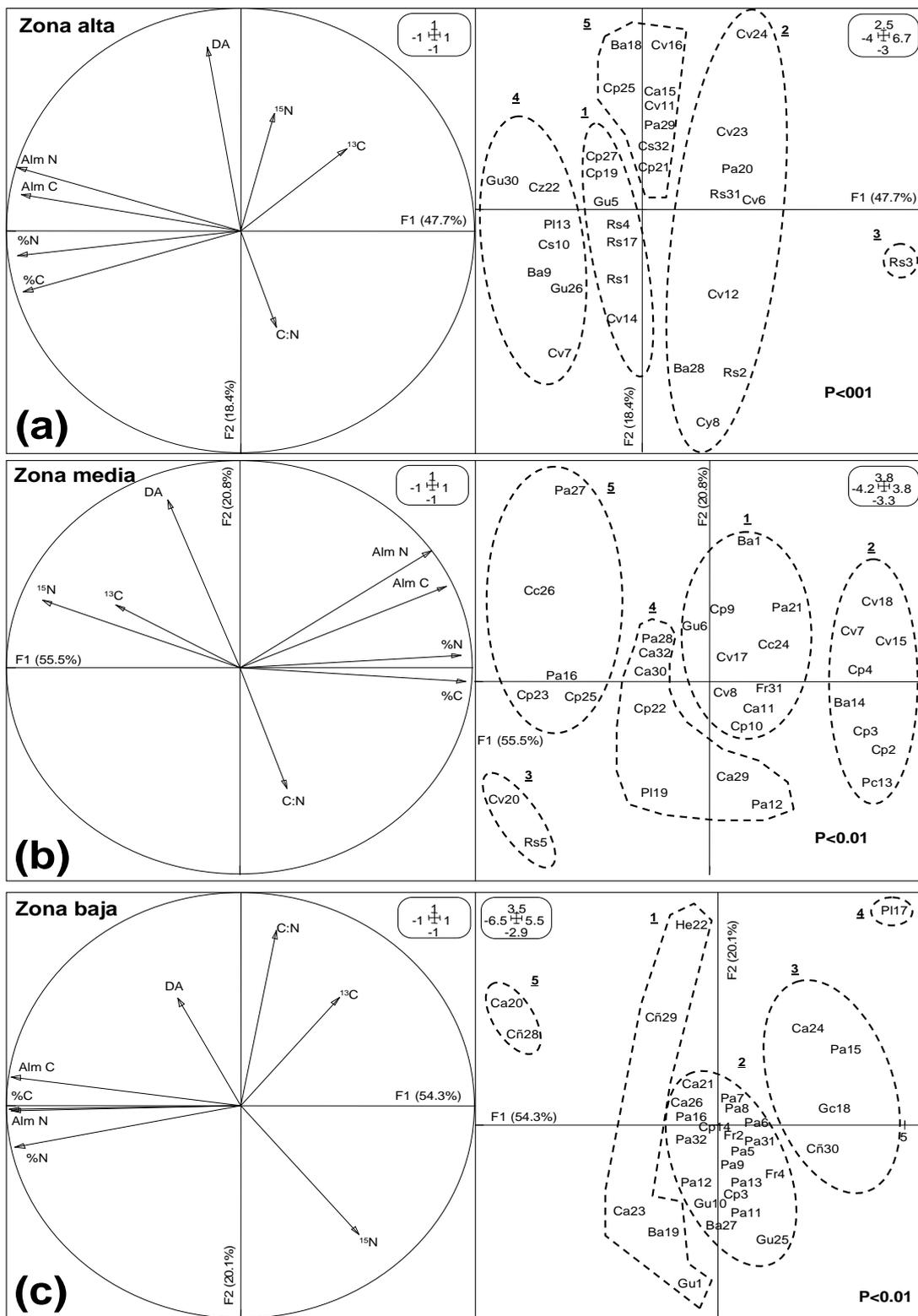
**Tabla 5.** Contribución de cada variable físico-química del suelo a los componentes uno y dos extraídos en el ACP de la profundidad 10-20 cm de las tres zonas de muestreo

| Variable          | Alta  |       | Media |       | Baja  |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | C1    | C2    | C1    | C2    | C1    | C2    |
| Densidad aparente | 0.14  | 0.82  | -0.31 | 0.81  | 0.27  | 0.50  |
| Almacenamiento C  | 0.94  | 0.16  | 0.89  | 0.39  | 0.98  | 0.13  |
| Almacenamiento N  | 0.95  | 0.29  | 0.82  | 0.56  | 0.99  | -0.02 |
| Relación C:N      | -0.15 | -0.43 | 0.20  | -0.59 | -0.15 | 0.82  |
| %C                | 0.93  | -0.28 | 0.97  | -0.07 | 0.98  | -0.03 |
| %N                | 0.95  | -0.11 | 0.95  | 0.06  | 0.96  | -0.20 |
| <sup>13</sup> C   | -0.45 | 0.37  | -0.53 | 0.30  | -0.42 | 0.51  |
| <sup>15</sup> N   | -0.15 | 0.53  | -0.84 | 0.32  | -0.51 | -0.61 |

En la zona media en 10-20 cm el componente uno (55.5%) presentó como variables de mayor peso %C (0.97) y %N (0.95), mientras que en el componente dos se fueron densidad aparente (0.81) y relación C:N (-0.59) (Tabla 5). En esta zona las abundancias de <sup>13</sup>C y <sup>15</sup>N estuvieron altamente correlacionadas y se opusieron a los sitios con almacenamientos altos de C y N (Figura 9b). El 75% del conglomerado dos estuvo conformado por cafetales en monocultivo (Cv-7, 15, 18) y asociados con plátano (Cp-2, 3, 4), y presentó los mayores almacenamientos de C y N con valores de 37.82 t C ha<sup>-1</sup> y 3.43 t N ha<sup>-1</sup>. El 25% restante correspondió a un pastizal de corte de un año (Pc13) y un barbecho de cuatro años (Ba14) que anteriormente fueron cafetales variedad Colombia, lo que mostró la influencia de usos anteriores sobre el almacenamiento de estos dos elementos en el suelo.

El C2 (20.8%) diferenció grupos con menor densidad aparente y mayor relación C:N, que en el caso del conglomerado tres presentó valores de 0.60 g cm<sup>-3</sup> y 11.59 respectivamente (Tabla ); y estuvo conformado por sitios con niveles de intervención diferentes, correspondientes a un relicto de selva de más de 35 años (Rs5) y un cafetal variedad Colombia (Cv20) con aplicaciones tres veces por año de fertilizante de síntesis química (15-15-15) en dosis de 100 g por planta (Anexo 2).

En la zona baja se explicó el 74.4% de la variabilidad total. En el componente uno (54.3%) los almacenamientos de C (0.99) y N (0.98) fueron los que más aportaron, mientras en 0-10 cm habían sido sus porcentajes; y en cuanto al componente dos (20.1%) %C en el mantillo y <sup>13</sup>C habían sido las variables de mayor peso, pero en 10-20 cm fueron más importantes relación C:N (0.82) y <sup>15</sup>N (-0.61) (Tabla 5). El C1 separó el conglomerado cinco por tener los mayores almacenamientos de C y N (50.51 t C ha<sup>-1</sup> y 4.67 t N ha<sup>-1</sup>), y estuvo conformado por sitios en los que se realizaron aplicaciones de fertilizante con N, P y K (15-15-15) (Anexos 2, 3), correspondientes a un cafetal variedad caturra (Ca20) y una caña panelera de dos años de edad (Cñ28) cuyo uso anterior fue cafetal variedad Colombia. En esta zona los datos no estuvieron tan dispersos como en las demás (Figura 9c), debido a que en el conglomerado dos se agrupó el 62.5% de los sitios muestreados presentando un almacenamiento promedio de 20.62 t C ha<sup>-1</sup> y 2.08 t N ha<sup>-1</sup>.



**Figura 9.** Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en la profundidad 10-20 cm de las tres zonas. Proyección de los sitios de muestreo en los planos factoriales (C1 y C2) agrupados por medio de análisis de conglomerados con cinco niveles de partición ( $p < 0.01$ ). a) zona alta, b) zona media y c) zona baja.

El C2 diferenció lugares con valores altos de  $^{13}\text{C}$ , alta relación C:N, baja abundancia de  $^{15}\text{N}$  y menor densidad aparente, como el conglomerado cuatro que presentó valores de -24.68‰, 14.18, 5.20‰ y  $0.99 \text{ g cm}^{-3}$  respectivamente, y estuvo conformado únicamente por el sitio P117 correspondiente a un cultivo de plátano con un mes de establecido en un terreno que anteriormente era cafetal variedad caturra, abonado con lombricompost una vez al año en dosis de 5 kg por planta (Anexo 2). Este sitio también mostró los valores más bajos de C (0.0086%) y N (0.006%) con almacenamientos de 0.85 y  $0.06 \text{ t ha}^{-1}$  respectivamente (Tabla 6).

**Tabla 6.** Promedios y desviaciones estándar (valores en paréntesis) por conglomerado de las variables físico-químicas analizadas en la profundidad 10-20 cm de las tres zonas de muestreo.

| Cong  | n  | DA<br>( $\text{g cm}^{-3}$ ) | Alm C<br>( $\text{t C ha}^{-1}$ ) | Alm N<br>( $\text{t N ha}^{-1}$ ) | C:N             | %C             | %N             | $^{13}\text{C}$<br>(‰) | $^{15}\text{N}$<br>(‰) |
|-------|----|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| Alta  |    |                              |                                   |                                   |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 7  | 0.59<br>(0.06)               | 41.13<br>(3.12)                   | 3.75<br>(0.21)                    | 10.98<br>(0.62) | 6.97<br>(0.45) | 0.64<br>(0.05) | -25.00<br>(0.33)       | 4.96<br>(0.91)         |
| 2     | 9  | 0.59<br>(0.11)               | 31.97<br>(3.48)                   | 2.63<br>(0.29)                    | 12.20<br>(1.19) | 5.59<br>(0.94) | 0.46<br>(0.07) | -23.78<br>(0.94)       | 5.01<br>(0.60)         |
| 3     | 1  | 0.53                         | 11.02                             | 0.99                              | 11.15           | 2.07           | 0.19           | -22.65                 | 4.43                   |
| 4     | 7  | 0.61<br>(0.05)               | 50.17<br>(4.97)                   | 4.29<br>(0.44)                    | 11.72<br>(0.97) | 8.23<br>(0.59) | 0.70<br>(0.06) | -24.58<br>(0.74)       | 4.41<br>(0.27)         |
| 5     | 8  | 0.67<br>(0.03)               | 40.82<br>(3.94)                   | 3.62<br>(0.33)                    | 11.28<br>(0.66) | 6.07<br>(0.51) | 0.54<br>(0.05) | -23.61<br>(0.99)       | 5.31<br>(0.50)         |
| Media |    |                              |                                   |                                   |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 10 | 0.80<br>(0.09)               | 31.60<br>(2.99)                   | 2.98<br>(0.38)                    | 10.67<br>(0.87) | 4.00<br>(0.41) | 0.38<br>(0.05) | -24.00<br>(0.65)       | 6.33<br>(0.80)         |
| 2     | 8  | 0.66<br>(0.10)               | 37.82<br>(4.52)                   | 3.43<br>(0.44)                    | 11.08<br>(0.94) | 5.76<br>(0.38) | 0.52<br>(0.03) | -24.51<br>(0.45)       | 5.22<br>(0.67)         |
| 3     | 2  | 0.60<br>(0.01)               | 10.35<br>(2.89)                   | 0.89<br>(0.07)                    | 11.59<br>(2.37) | 1.72<br>(0.52) | 0.15<br>(0.01) | -23.14<br>(2.54)       | 7.14<br>(1.96)         |
| 4     | 7  | 0.72<br>(0.20)               | 24.20<br>(3.67)                   | 2.20<br>(0.28)                    | 10.99<br>(0.72) | 3.53<br>(0.80) | 0.32<br>(0.08) | -23.90<br>(0.26)       | 6.49<br>(0.51)         |
| 5     | 5  | 0.88<br>(0.14)               | 19.85<br>(4.41)                   | 2.02<br>(0.57)                    | 9.96<br>(0.75)  | 2.26<br>(0.19) | 0.23<br>(0.03) | -22.77<br>(1.37)       | 8.44<br>(0.51)         |
| Baja  |    |                              |                                   |                                   |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 5  | 1.03<br>(0.08)               | 28.00<br>(5.28)                   | 2.79<br>(0.49)                    | 10.14<br>(2.06) | 2.70<br>(0.41) | 0.27<br>(0.05) | -24.46<br>(1.79)       | 7.82<br>(1.45)         |
| 2     | 20 | 1.01<br>(0.12)               | 20.62<br>(2.84)                   | 2.08<br>(0.28)                    | 9.90<br>(0.49)  | 2.05<br>(0.29) | 0.21<br>(0.03) | -23.88<br>(1.05)       | 8.62<br>(0.59)         |
| 3     | 4  | 1.01<br>(0.22)               | 8.61<br>(5.33)                    | 0.83<br>(0.51)                    | 10.29<br>(0.66) | 0.87<br>(0.49) | 0.08<br>(0.05) | -22.88<br>(0.90)       | 8.01<br>(0.81)         |
| 4     | 1  | 0.99                         | 0.85                              | 0.06                              | 14.18           | 0.086          | 0.006          | -22.13                 | 7.52                   |
| 5     | 2  | 1.16<br>(0.20)               | 50.51<br>(8.13)                   | 4.67<br>(0.62)                    | 10.80<br>(0.32) | 4.36<br>(0.06) | 0.40<br>(0.02) | -24.68<br>(0.06)       | 5.20<br>(1.05)         |

El ACP en la profundidad 20-30 cm de la zona alta explicó el 67.3% de la variabilidad total, almacenamiento de N (0.97) y %N (0.93) fueron las variables de mayor aporte al componente uno (47.5%); y  $^{15}\text{N}$  (0.70) y densidad aparente (-0.65) al componente dos (19.8%) (Tabla 7). El C1 separó el conglomerado cuatro como el de mayor almacenamiento (60.43 t C ha<sup>-1</sup> y 5.55 t N ha<sup>-1</sup>) y porcentajes de C (7.94%) y N (0.73%), del cual hizo parte solo el cafetal variedad Colombia Cv7 con aplicaciones de fertilizante de alta producción (25-4-24) en dosis de 80 g/planta y con una frecuencia de dos veces/año (Anexo 2). En el eje horizontal se encontró también la separación de un relicto de selva de más de 50 años (Rs31) (Figura 10a) por ser el de menor almacenamiento de C y N (16.37 t C ha<sup>-1</sup> y 1.40 t N ha<sup>-1</sup>), dejando ver el contraste entre un sitio con vegetación natural y otro con un monocultivo en el que el grado de intervención es alto.

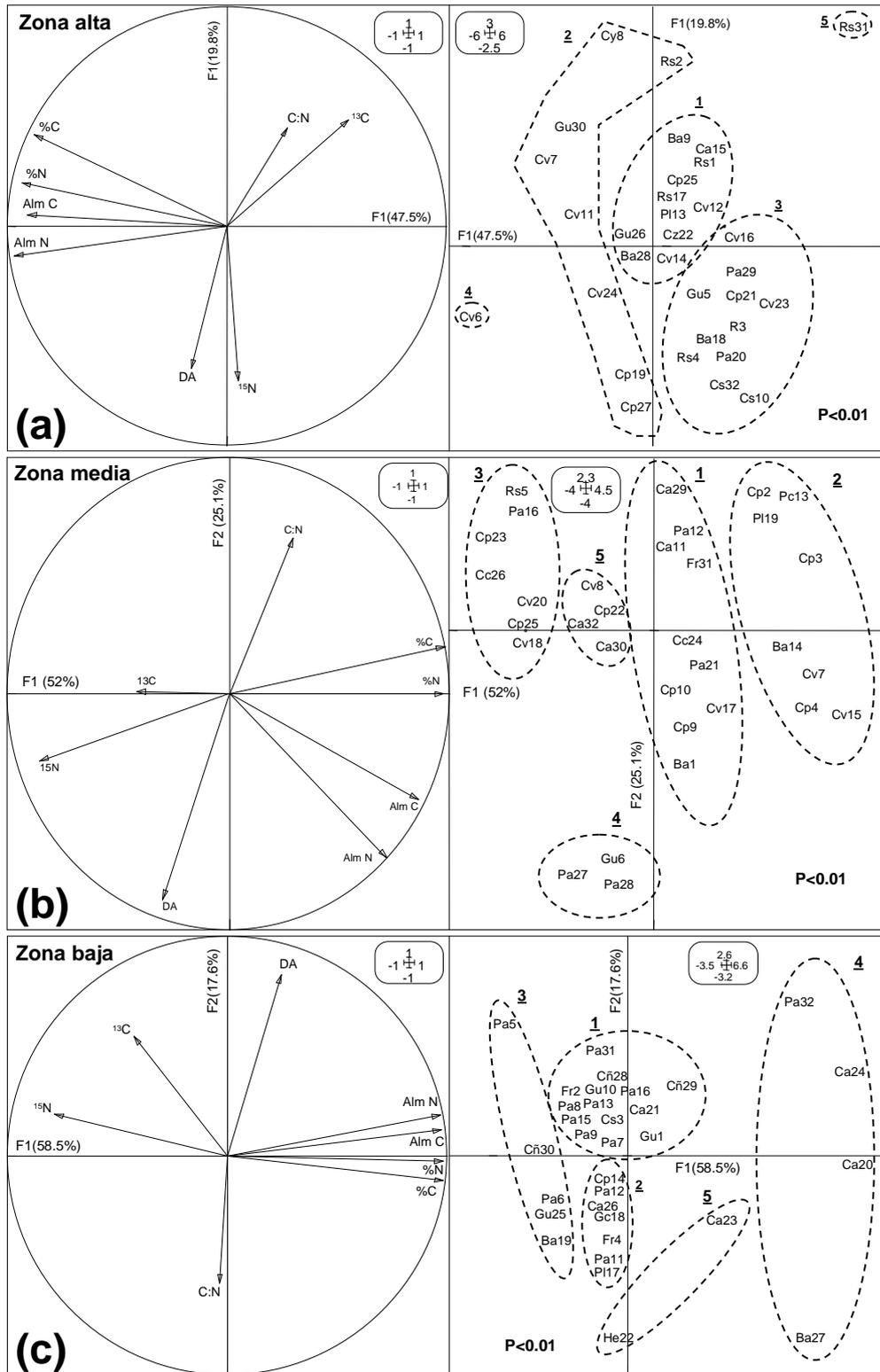
El C2 también diferenció el relicto de selva Rs31 por tener menor densidad aparente y abundancia de  $^{15}\text{N}$ , y mayor relación C:N y abundancia de  $^{13}\text{C}$  con valores de 0.49 g cm<sup>-3</sup>, 3.42‰, 11.73 y -21.49‰ respectivamente (Tabla 8). Además se observó en el conglomerado dos la agrupación de sitios que en función del eje vertical difirieron bastante, pero que almacenaron C y N en cantidades similares.

**Tabla 7.** Contribución de cada variable físico-química del suelo a los componentes uno y dos extraídos en el ACP de la profundidad 20-30 cm de las tres zonas de muestreo

| Variable          | Alta  |       | Media |       | Baja  |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | C1    | C2    | C1    | C2    | C1    | C2    |
| Densidad aparente | 0.16  | -0.65 | -0.30 | 0.87  | 0.25  | 0.82  |
| Almacenamiento C  | 0.91  | 0.05  | 0.85  | 0.45  | 0.98  | 0.12  |
| Almacenamiento N  | 0.97  | -0.14 | 0.71  | 0.70  | 0.97  | 0.18  |
| Relación C:N      | -0.28 | 0.44  | 0.29  | -0.66 | -0.04 | -0.58 |
| %C                | 0.88  | 0.42  | 0.97  | -0.20 | 0.98  | -0.11 |
| %N                | 0.93  | 0.19  | 0.96  | 0.00  | 0.98  | -0.03 |
| $^{13}\text{C}$   | -0.56 | 0.48  | -0.42 | -0.01 | -0.42 | 0.54  |
| $^{15}\text{N}$   | -0.05 | -0.70 | -0.85 | 0.29  | -0.78 | 0.19  |

En la zona media se explicó el 77.1% de la variabilidad de los datos, las variables más representativas en el componente uno (52%) fueron %C (0.97) y %N (0.96); y en el componente dos (25.1%) densidad aparente (0.87) y almacenamiento de C (0.70) (Tabla 7). El C1 separó el conglomerado dos por ser el de mayores porcentajes y almacenamientos de C y N, el cual agrupó en su mayoría cafetales con aplicaciones permanentes de fertilizantes de síntesis química (Cv-7, 15; Cp-2, 3, 4), y también un pasto de corte de un año (Pc13), un plátano de dos años y un barbecho de cuatro años (Figura 10b), los cuales anteriormente también fueron cafetales variedad Colombia; mostrando similitud en el almacenamiento de C y N entre sitios que en la actualidad y en un pasado cercano han sido cultivos de café.

El C2 separó los grupos con mayor densidad aparente y menor relación C:N, que en el conglomerado cuatro presentaron valores de 1.20 g cm<sup>-3</sup> y 9.72 (Tabla 8). Además agrupó dos pastizales de 10 años de edad (Pa-27, 28) y un guadual de más de 10 años (Gu6), mostrando que en el mediano plazo estas gramíneas ejercen un efecto considerable sobre la densidad y las tasas de descomposición en el suelo.



**Figura 10.** Círculos de correlaciones con los componentes 1 y 2 extraídos en el ACP de las variables físico-químicas del suelo en la profundidad 20-30 cm de las tres zonas. Proyección de los sitios de muestreo en los planos factoriales (C1 y C2) agrupados por medio de análisis de conglomerados con cinco niveles de partición ( $p < 0.01$ ). a) zona alta, b) zona media y c) zona baja.

El ACP en la zona baja explicó el 76.1% de la variabilidad total, y las variables %C (0.98) y %N (0.98) fueron las de mayor peso en el componente uno (58.5%), mientras que en el componente dos (17.6%) fueron relación C:N (-0.58) y densidad aparente (0.82) (Tabla 7). El C1 mostró que en esta zona los mayores almacenamientos estuvieron en los conglomerados cuatro y cinco, que en su mayoría agruparon sitios con usos diferentes a pastizales y caña panelera, mientras estos últimos hicieron parte de los conglomerados uno, dos y tres, correspondientes a almacenamientos medios y bajos (Figura 10c). De esta manera se observó que las gramíneas anteriormente mencionadas tienen una baja capacidad para almacenar C y N en las partes más profundas del suelo, debido a que en la capa superficial (0-10 cm) se mostraron como las de mayores contenidos de estos dos elementos.

**Tabla 8.** Promedios y desviaciones estándar (valores en paréntesis) por conglomerado de las variables físico-químicas analizadas en la profundidad 20-30 cm de las tres zonas de muestreo.

| Cong  | n  | DA<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | Alm C<br>(t C ha <sup>-1</sup> ) | Alm N<br>(t N ha <sup>-1</sup> ) | C:N             | %C             | %N             | <sup>13</sup> C<br>(‰) | <sup>15</sup> N<br>(‰) |
|-------|----|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------|----------------|------------------------|------------------------|
| Alta  |    |                             |                                  |                                  |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 11 | 0.62<br>(0.07)              | 36.06<br>(4.99)                  | 2.99<br>(0.37)                   | 12.06<br>(1.07) | 5.85<br>(0.32) | 0.49<br>(0.04) | -23.92<br>(0.65)       | 4.99<br>(0.34)         |
| 2     | 8  | 0.64<br>(0.09)              | 44.48<br>(5.81)                  | 3.80<br>(0.53)                   | 11.82<br>(1.58) | 7.03<br>(1.21) | 0.60<br>(0.10) | -23.99<br>(0.58)       | 5.12<br>(0.65)         |
| 3     | 11 | 0.69<br>(0.05)              | 32.42<br>(3.05)                  | 2.69<br>(0.27)                   | 12.10<br>(0.95) | 4.73<br>(0.47) | 0.39<br>(0.05) | -23.97<br>(0.72)       | 5.54<br>(0.64)         |
| 4     | 1  | 0.76                        | 60.43                            | 5.55                             | 10.89           | 7.94           | 0.73           | -25.79                 | 4.65                   |
| 5     | 1  | 0.49                        | 16.37                            | 1.40                             | 11.73           | 3.37           | 0.29           | -21.49                 | 3.42                   |
| Media |    |                             |                                  |                                  |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 10 | 0.72<br>(0.13)              | 25.96<br>(3.56)                  | 2.39<br>(0.44)                   | 10.97<br>(0.70) | 3.65<br>(0.35) | 0.33<br>(0.03) | -23.61<br>(0.65)       | 6.69<br>(0.58)         |
| 2     | 8  | 0.66<br>(0.10)              | 32.40<br>(4.70)                  | 2.72<br>(0.49)                   | 12.05<br>(1.21) | 4.96<br>(0.40) | 0.41<br>(0.05) | -24.01<br>(0.35)       | 5.98<br>(0.40)         |
| 3     | 7  | 0.74<br>(0.12)              | 14.61<br>(1.29)                  | 1.35<br>(0.21)                   | 10.97<br>(1.35) | 2.00<br>(0.18) | 0.19<br>(0.03) | -23.18<br>(1.35)       | 7.95<br>(0.77)         |
| 4     | 3  | 1.20<br>(0.05)              | 29.66<br>(3.71)                  | 3.04<br>(0.23)                   | 9.72<br>(0.49)  | 2.47<br>(0.22) | 0.25<br>(0.01) | -23.37<br>(1.22)       | 7.79<br>(0.66)         |
| 5     | 4  | 0.78<br>(0.03)              | 21.75<br>(1.39)                  | 1.96<br>(0.14)                   | 11.18<br>(0.91) | 2.85<br>(0.12) | 0.26<br>(0.02) | -23.56<br>(0.39)       | 7.50<br>(0.34)         |
| Baja  |    |                             |                                  |                                  |                 |                |                |                        |                        |
| 1     | 14 | 1.09<br>(0.09)              | 18.77<br>(4.12)                  | 1.86<br>(0.44)                   | 10.17<br>(0.74) | 1.74<br>(0.45) | 0.17<br>(0.05) | -23.11<br>(1.16)       | 8.72<br>(0.65)         |
| 2     | 7  | 0.92<br>(0.13)              | 17.83<br>(1.81)                  | 1.62<br>(0.13)                   | 11.00<br>(0.72) | 1.95<br>(0.17) | 0.18<br>(0.02) | -23.96<br>(0.63)       | 8.38<br>(0.47)         |
| 3     | 5  | 0.94<br>(0.11)              | 9.65<br>(4.79)                   | 0.86<br>(0.39)                   | 10.91<br>(1.17) | 1.07<br>(0.57) | 0.09<br>(0.05) | -22.10<br>(1.33)       | 9.24<br>(0.97)         |
| 4     | 4  | 1.13<br>(0.20)              | 52.54<br>(11.51)                 | 4.99<br>(1.13)                   | 10.56<br>(0.17) | 4.65<br>(0.39) | 0.44<br>(0.04) | -24.42<br>(2.23)       | 5.87<br>(1.41)         |
| 5     | 2  | 0.93<br>(0.06)              | 28.81<br>(12.18)                 | 2.41<br>(1.42)                   | 12.65<br>(2.42) | 3.07<br>(1.10) | 0.26<br>(0.14) | -24.18<br>(0.33)       | 7.43<br>(0.09)         |

El C2 separó los sitios en función de la densidad aparente y la relación C:N, destacándose los conglomerados tres y cuatro por agrupar lugares con diferente usos y características físicoquímicas en el suelo, que lograron acumular cantidades de C y N similares.

### **3.3. Dinámica del carbono orgánico del suelo (abundancia natural de $^{13}\text{C}$ )**

#### **3.3.1. Abundancia natural de $^{13}\text{C}$ por usos y coberturas vegetales del terreno**

La abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  a diferencia de los porcentajes y almacenamientos de C y N, no dependió de las variaciones en la altura sobre el nivel del mar, por lo que no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las zonas de muestreo. Además los coeficientes de correlación entre  $\delta^{13}\text{C}$  y altura fueron bajos; -0.207, -0.103 y -0.178 para las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm respectivamente.

Los promedios de  $\delta^{13}\text{C}$  en las tres profundidades del suelo evaluadas variaron entre -25.79 y -20.72, mostrando que en todos los usos y coberturas el carbono orgánico del suelo estuvo asociado a vegetación de tipo fotosintético C3 (-26‰ en promedio); sin embargo, se encontraron diferencias ( $p < 0.05$ ) entre usos del terreno en el  $\delta^{13}\text{C}$  de la profundidad 0-10 cm. Cafetal asociado con cítricos y caña panelera presentaron los promedios más altos (-20.72 y -21.77‰ respectivamente), mientras cafetal con sombrío y gradual obtuvieron los más bajos (-25.79 y -25.59‰ respectivamente). También se observaron usos del terreno que presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en el  $\delta^{13}\text{C}$  a medida que aumentó la profundidad, estos fueron cafetal asociado con plátano con promedios en 0-10, 10-20 y 20-30 cm de -25.14, -24.34, -24.03‰; cafetal con sombrío con -25.79, -24.78, -23.99‰ y frutales con -25.34, -24.25 y -23.69‰ respectivamente (Tabla 9).

**Tabla 9.** Abundancia natural promedio de  $^{13}\text{C}$  por uso y cobertura del terreno.

| Uso y cobertura vegetal del terreno | n  | $\delta^{13}\text{C}$ (‰)     |                              |                             |
|-------------------------------------|----|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|                                     |    | 0-10 cm                       | 10-20 cm                     | 20-30 cm                    |
| Rs                                  | 7  | -23.18 (2.13) <sup>BCa</sup>  | -23.52 (1.68) <sup>Aa</sup>  | -23.43 (1.37) <sup>Aa</sup> |
| Cv                                  | 14 | -24.49 (0.82) <sup>ABCa</sup> | -23.98 (0.88) <sup>Aa</sup>  | -23.81 (1.03) <sup>Aa</sup> |
| Cy                                  | 1  | -23.29 <sup>BCa</sup>         | -24.28 <sup>Aa</sup>         | -23.22 <sup>Aa</sup>        |
| Ba                                  | 8  | -24.18 (1.36) <sup>ABCa</sup> | -24.42 (0.93) <sup>Aa</sup>  | -23.95 (1.33) <sup>Aa</sup> |
| Pl                                  | 3  | -25.38 (0.27) <sup>ABa</sup>  | -23.55 (1.23) <sup>Aa</sup>  | -23.89 (0.44) <sup>Aa</sup> |
| Cp                                  | 13 | -25.14 (0.61) <sup>ABCa</sup> | -24.34 (0.63) <sup>Ab</sup>  | -24.03 (0.65) <sup>Ab</sup> |
| Pa                                  | 18 | -22.67 (1.70) <sup>BCa</sup>  | -23.34 (1.03) <sup>Aa</sup>  | -23.09 (1.21) <sup>Aa</sup> |
| Cz                                  | 1  | -24.09 <sup>ABCa</sup>        | -23.66 <sup>Aa</sup>         | -23.64 <sup>Aa</sup>        |
| Gu                                  | 7  | -25.59 (0.86) <sup>ABa</sup>  | -24.96 (0.51) <sup>Aa</sup>  | -24.52 (0.42) <sup>Aa</sup> |
| Cs                                  | 3  | -25.79 (0.17) <sup>Aa</sup>   | -24.78 (0.14) <sup>Aab</sup> | -23.99 (0.03) <sup>Ab</sup> |
| Fr                                  | 3  | -25.34 (0.23) <sup>ABCa</sup> | -24.25 (0.23) <sup>Aab</sup> | -23.69 (0.56) <sup>Ab</sup> |
| Ca                                  | 10 | -24 (0.90) <sup>ABCa</sup>    | -23.82 (1.00) <sup>Aa</sup>  | -23.61 (1.00) <sup>Aa</sup> |
| Pc                                  | 1  | -25.31 <sup>ABCa</sup>        | -24.97 <sup>Aa</sup>         | -24.24 <sup>Aa</sup>        |
| Gc                                  | 1  | -24.63 <sup>ABCa</sup>        | -24.20 <sup>Aa</sup>         | -22.77 <sup>Aa</sup>        |
| He                                  | 1  | -24.94 <sup>ABCa</sup>        | -24.3 <sup>Aa</sup>          | -23.95 <sup>Aa</sup>        |
| Cñ                                  | 3  | -21.77 (1.68) <sup>Ca</sup>   | -22.76 (1.67) <sup>Aa</sup>  | -21.85 (0.44) <sup>Aa</sup> |
| Cx                                  | 1  | -24.75 <sup>ABCa</sup>        | -24.2 <sup>Aa</sup>          | -22.69 <sup>Aa</sup>        |
| Cc                                  | 1  | -20.72 <sup>Ca</sup>          | -21.81 <sup>Aa</sup>         | -22.63 <sup>Aa</sup>        |

Valores en paréntesis corresponden a la desviación estándar de la muestra. Letras mayúsculas diferentes en una columna indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre usos del terreno para el  $\delta^{13}\text{C}$  de la misma profundidad. Letras minúsculas diferentes en una fila indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre profundidades para el  $\delta^{13}\text{C}$  del mismo uso y cobertura vegetal.

### 3.3.2. Tasas de recambio y procedencia del carbono orgánico del suelo

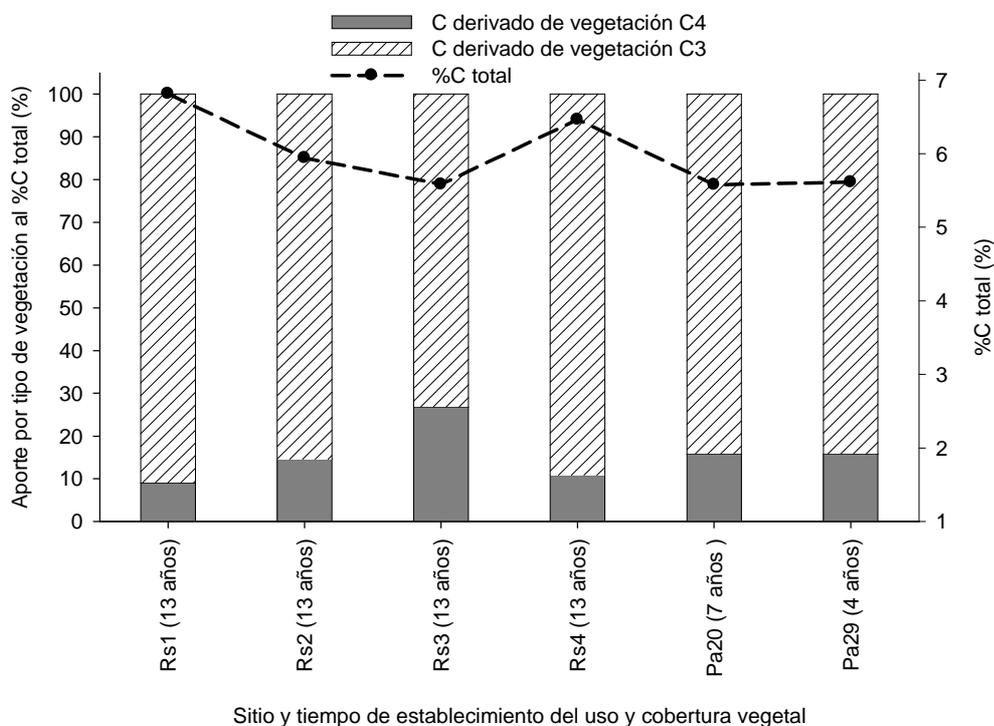
De los 96 sitios muestreados se encontraron 27 en los que hubo cambios de vegetación de tipo fotosintético C3 por C4 o viceversa. En tres lugares de la zona alta que fueron pastizales durante 60 años se dejó crecer la vegetación sin hacerle ningún tipo de manejo hasta convertirse en un relicto de selva de 13 años de edad. En otros tres sitios de la zona baja se encontraron cultivos de caña panelera que hacía dos años habían sido cafetales, y los 21 muestreos restantes fueron pastizales entre 1 y 17 años que anteriormente también fueron cultivos de café.

El  $\delta^{13}\text{C}$  de los sitios en los que hubo cambio de vegetación varió entre -25.31 y -18.82‰ para la profundidad 0-10 cm, entre -25.00 y -21.21‰ para 10-20 cm y entre -25.42 y 20.05‰ para 20-30 cm; dejando ver que ninguno de los lugares obtuvo valores cercanos a los de vegetación C4 (en promedio 12‰). Además se observó que los pastizales y cultivos de caña panelera conservaron el carbono proveniente de los cafetales, mientras que los relictos de selva con valores de  $\delta^{13}\text{C}$  cercanos a los de vegetación C3, mostraron que en un periodo de 13 años lograron sustituir el carbono derivado de los pastizales que estuvieron durante 60 años.

Las mayores tasas de recambio se encontraron en las profundidades 10-20 y 20-30 cm del Pa11 con valores de 20.1 y 19.3% año<sup>-1</sup> respectivamente. Sin embargo, también se observaron tasas altas en las tres profundidades de dos muestreos con caña panelera (Cñ-29, 30), con valores respectivos de 16.5 y 16.2 % año<sup>-1</sup> en 0-10 cm, 14.4 y 11.9 % año<sup>-1</sup> en 10-20 cm y 13.9 y 11.5% año<sup>-1</sup> en 20-30 cm. En las zonas alta y media se observó la tendencia de aumentar las tasas de recambio con la profundidad, mientras en la zona baja, se observó lo contrario, debido a que las mayores tasas de recambio de la materia orgánica estuvieron en la capa superficial del suelo (Tabla 10).

En la zona alta se encontró que el %C total promedio varió entre 5.57 y 6.81%, y la mayor proporción fue derivada de la vegetación C3. De los seis sitios evaluados, Rs3 fue el que presentó el mayor porcentaje de C derivado de vegetación C4 (26.8%) (Figura 11), y a pesar de existir otros dos muestreos (Rs1 y Rs2) cercanos geográficamente y con historias de uso similares, se presentaron diferencias en el aporte de la vegetación principalmente porque en Rs3 las tasas de recambio en las tres profundidades fueron más bajas que las de los otros tres relictos de selva.

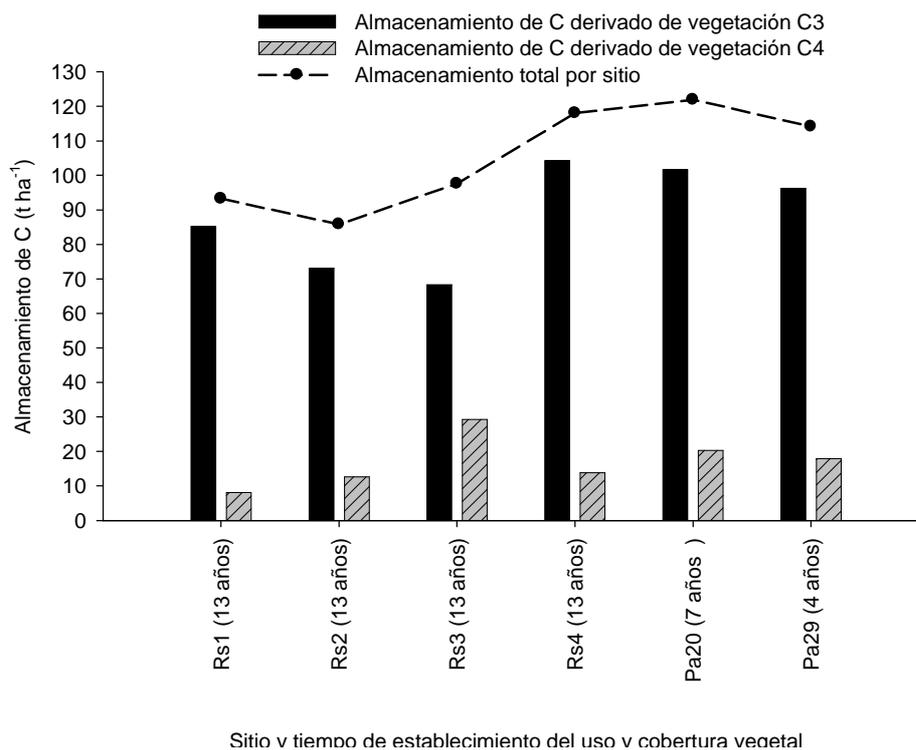
En la zona alta los pastizales (Pa-20,29) presentaron almacenamientos de C (121.89 y 114.13 t C ha<sup>-1</sup>) mayores a los de los relictos de selva, a excepción de Rs4. Sin embargo, estas acumulaciones en los pastizales en su mayoría no fueron derivadas de la vegetación actual sino de los cafetales existentes anteriormente (vegetación C3), los cuales aportaron 101.57 y 96.24 t C ha<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 12).



**Figura 11.** Aporte según el tipo fotosintético de la vegetación al porcentaje total de carbono promedio en sitios de la zona alta en los que se presentaron cambios de vegetación.

**Tabla 10.** Tasas de recambio de la materia orgánica en sitios donde hubo cambios de vegetación de tipo fotosintético C3 a C4 o viceversa.

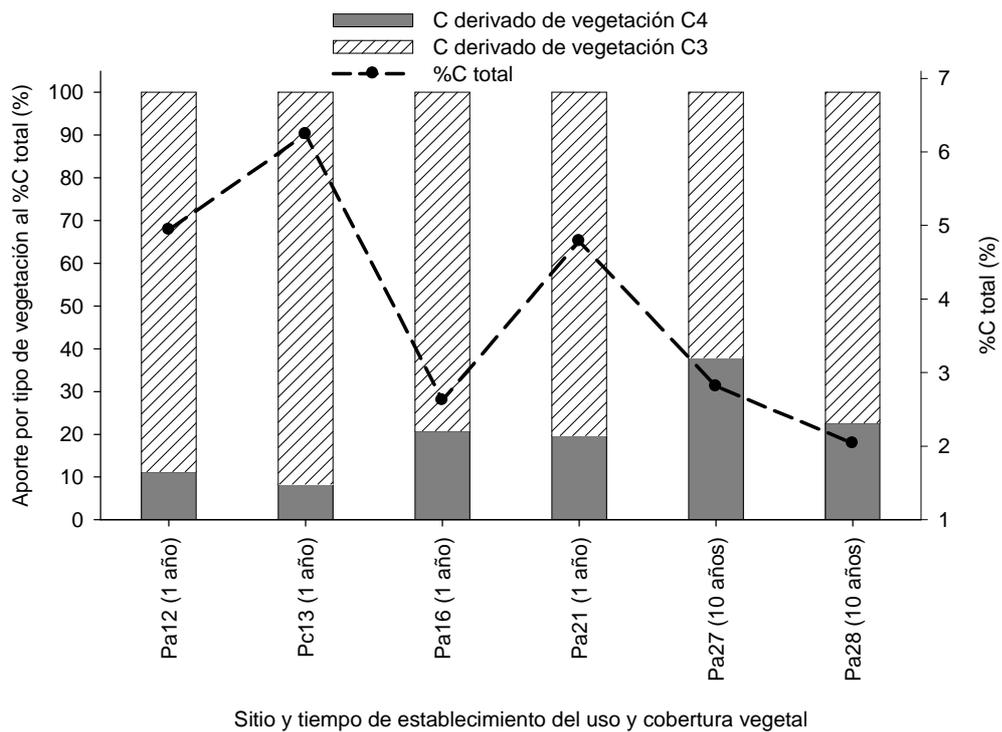
| Sitio      | Uso y cobertura vegetal actual | Tiempo (años) | Uso anterior | $\delta^{13}\text{C}$ en el suelo (‰) |          |          | Tasa de recambio de la materia orgánica (% año <sup>-1</sup> ) |          |          |
|------------|--------------------------------|---------------|--------------|---------------------------------------|----------|----------|--|----------|----------|
|            |                                |               |              | 0-10 cm                               | 10-20 cm | 20-30 cm | 0-10 cm  | 10-20 cm | 20-30 cm |
| Zona alta  |                                |               |              |                                       |          |          |  |          |          |
| Rs1        | Relicto de selva               | 13            | Pastizal     | -25.08                                | -25.00   | -24.11   | 6.3  | 6.3      | 5.9      |
| Rs2        | Relicto de selva               | 13            | Pastizal     | -23.70                                | -24.43   | -23.76   | 5.7  | 6.0      | 5.7      |
| Rs3        | Relicto de selva               | 13            | Pastizal     | -20.64                                | -22.65   | -23.44   | 4.2  | 5.2      | 5.5      |
| Rs4        | Relicto de selva               | 13            | Pastizal     | -23.54                                | -24.50   | -25.42   | 5.6  | 6.1      | 6.5      |
| Pa20       | Pastizal                       | 7             | Cafetal      | -22.85                                | -24.22   | -24.29   | 2.8  | 1.6      | 1.5      |
| Pa29       | Pastizal                       | 4             | Cafetal      | -24.13                                | -23.64   | -23.59   | 2.9  | 3.7      | 3.8      |
| Zona media |                                |               |              |                                       |          |          |  |          |          |
| Pa12       | Pastizal                       | 1             | Cafetal      | -24.79                                | -24.26   | -24.25   | 7.6  | 11.0     | 11.0     |
| Pc13       | Pastizal                       | 1             | Cafetal      | -25.31                                | -24.97   | -24.24   | 4.3  | 6.5      | 11.1     |
| Pa16       | Pastizal                       | 1             | Cafetal      | -23.40                                | -22.68   | -23.18   | 16.3   | 20.9     | 17.8     |
| Pa21       | Pastizal                       | 1             | Cafetal      | -23.99                                | -22.80   | -22.94   | 12.7   | 20.1     | 19.3     |
| Pa27       | Pastizal                       | 10            | Cafetal      | -18.82                                | -21.21   | -22.05   | 4.5  | 3.0      | 2.5      |
| Pa28       | Pastizal                       | 10            | Cafetal      | -21.14                                | -23.73   | -23.60   | 3.1  | 1.4      | 1.5      |
| Zona baja  |                                |               |              |                                       |          |          |  |          |          |
| Pa5        | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -23.55                                | -24.05   | -20.05   | 1.7  | 1.4      | 4.2      |
| Pa6        | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -22.01                                | -22.53   | -21.82   | 2.8  | 2.4      | 2.9      |
| Pa7        | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -21.21                                | -21.61   | -22.37   | 3.4  | 3.1      | 2.5      |
| Pa8        | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -19.90                                | -22.20   | -22.09   | 4.3  | 2.7      | 2.7      |
| Pa9        | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -22.96                                | -23.80   | -23.80   | 2.1  | 1.5      | 1.5      |
| Pa11       | Pastizal                       | 17            | Cafetal      | -25.16                                | -24.33   | -24.36   | 0.3  | 0.6      | 0.6      |
| Pa12       | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -23.11                                | -24.76   | -24.67   | 2.0  | 0.9      | 0.9      |
| Pa13       | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -24.51                                | -24.37   | -23.77   | 1.0  | 1.1      | 1.6      |
| Pa15       | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -21.97                                | -22.40   | -23.67   | 2.8  | 2.5      | 1.6      |
| Pa16       | Pastizal                       | 9             | Cafetal      | -21.69                                | -22.85   | -23.44   | 3.0  | 2.2      | 1.8      |
| Cñ28       | Caña panelera                  | 2             | Cafetal      | -23.72                                | -24.64   | -21.61   | 7.2  | 4.3      | 13.8     |
| Cñ29       | Caña panelera                  | 2             | Cafetal      | -20.76                                | -21.43   | -21.58   | 16.5   | 14.4     | 13.9     |
| Cñ30       | Caña panelera                  | 2             | Cafetal      | -20.85                                | -22.22   | -22.36   | 16.2   | 11.9     | 11.5     |
| Pa31       | Pastizal                       | 4             | Cafetal      | -22.68                                | -23.47   | -23.22   | 5.2  | 4.0      | 4.4      |
| Pa32       | Pastizal                       | 3             | Cafetal      | -24.28                                | -24.17   | -21.46   | 3.6  | 3.8      | 9.5      |



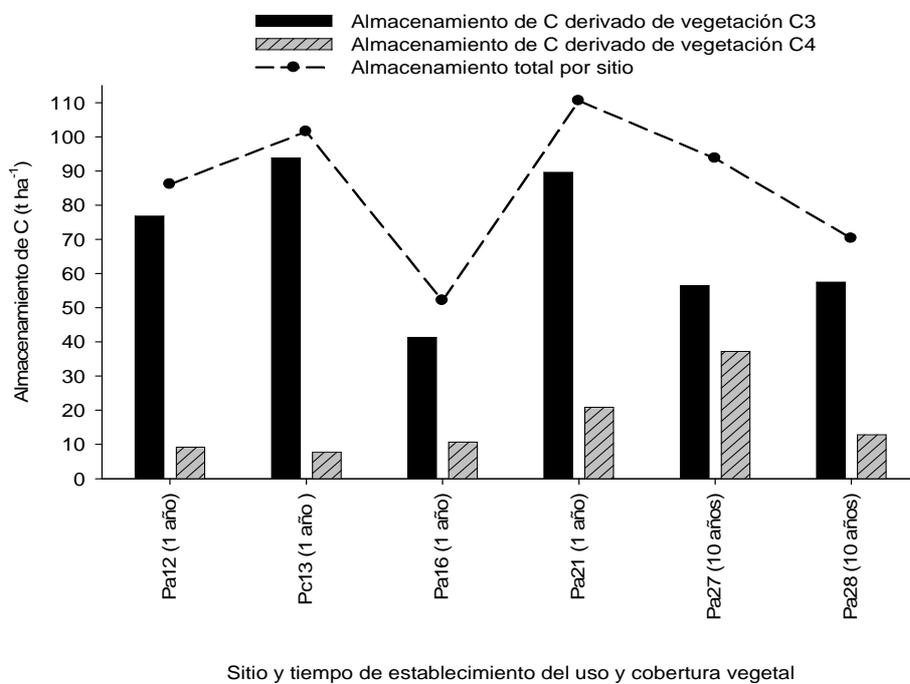
**Figura 12.** Carbono almacenado por tipo de vegetación en 0-30 cm (zona alta)

En la zona media el %C total promedio disminuyó considerablemente en relación con la zona alta; debido a que los valores oscilaron entre 2 y 6.2%. Se observó la dominancia del carbono proveniente de vegetación C3, aunque se encontró que el sitio Pa27 obtuvo un valor importante en el porcentaje de aporte de la vegetación C4 (37.9%), el cual a la vez varió notablemente en relación con el sitio Pa28 que se localizó en la misma finca y contó con el mismo tiempo de establecimiento (10 años) (Figura 13)

El mayor almacenamiento de C se encontró en Pa21 (110.49 t C ha<sup>-1</sup>) donde 89.62 t C ha<sup>-1</sup> fueron acumuladas por la vegetación C3 y 20.87 t C ha<sup>-1</sup> por la C4. Sin embargo, en este sitio se observó que a pesar de ser un pastizal de un año de establecimiento, el carbono acumulado por vegetación C4 fue superior al del sitio Pa12 (9.24 t C ha<sup>-1</sup>) con igual historia de uso del terreno y al de Pa28 (12.79 t C ha<sup>-1</sup>) con nueve años de diferencia (Figura 14), notándose en este muestreo la influencia de las tasas de recambio de materia orgánica que para las tres profundidades evaluadas (12.7, 20.1 y 19.3% año<sup>-1</sup> respectivamente) fueron superiores a las de los demás pastizales de la zona media.

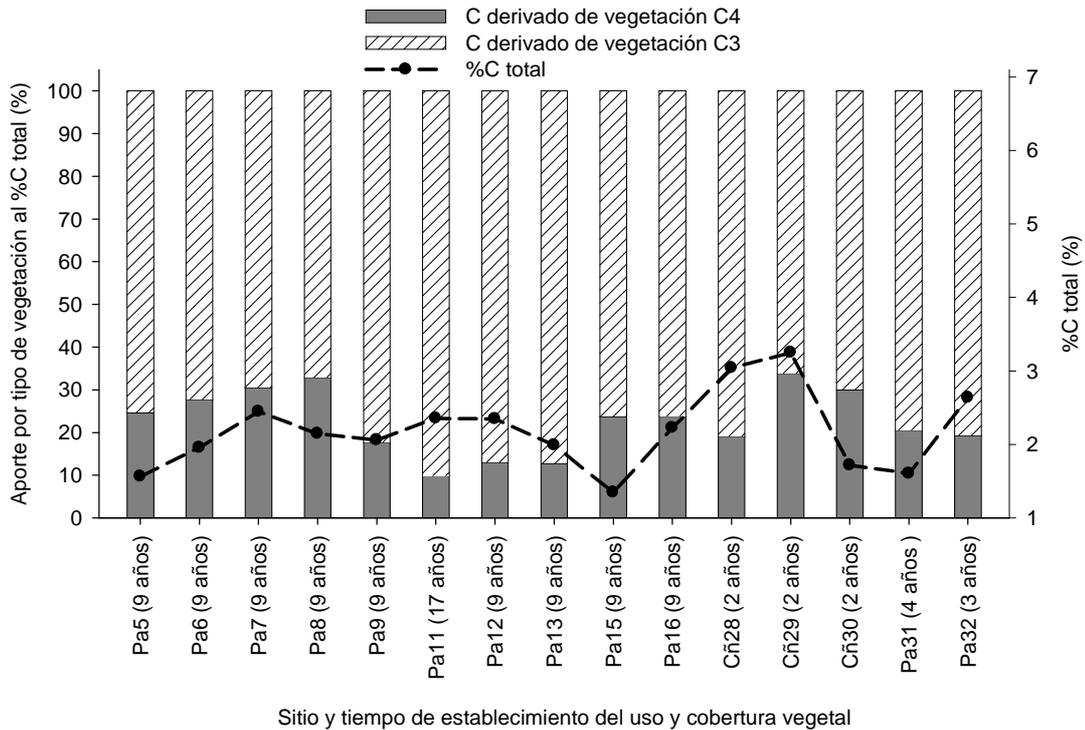


**Figura 13.** Procedencia del carbono en sitios de la zona media en los que se presentaron cambios en la vegetación.



**Figura 14.** C almacenado en 0-30 cm por tipo de vegetación (zona media)

La zona baja fue la que presentó más sitios con cambio de vegetación, 12 pastizales y tres cultivos de caña que anteriormente fueron cafetales. De las tres, esta zona presentó los menores porcentajes promedio de C total con valores que oscilaron entre 1.3 y 3.2%. El aporte de la vegetación C3 al carbono del suelo es notablemente superior a la participación de la vegetación C4 en todos los casos; aunque se observaron sitios como Cñ29, Pa8 y Cñ28 que se destacaron por presentar los mayores porcentajes de aporte de C4 con valores de 33.8, 32.8 y 29.9% respectivamente (Figura 15).



**Figura 15.** Procedencia del carbono en sitios de la zona baja en los que se presentaron cambios en la vegetación.

En la zona baja los sitios que más C almacenaron en el suelo fueron Cñ29 y Pa32 con 102.28 y 97.69 t C ha<sup>-1</sup> respectivamente. De estos totales, para Cñ29 67.27 t C ha<sup>-1</sup> fueron derivadas de vegetación C3 y 35.01 t C ha<sup>-1</sup> de C4, mientras para Pa32 74.61 t C ha<sup>-1</sup> provinieron de C3 y 23.07 t C ha<sup>-1</sup> de C4 (Figura 16). También se observó que estos dos sitios fueron algunos de los que presentaron tiempos menores de establecimiento (2 y 3 años respectivamente) y sin embargo obtuvieron más C almacenado por C4 que pastizales con nueve (Pa-5, 6, 7, 9, 12, 13, 15, 16) y 17 (Pa11) años.

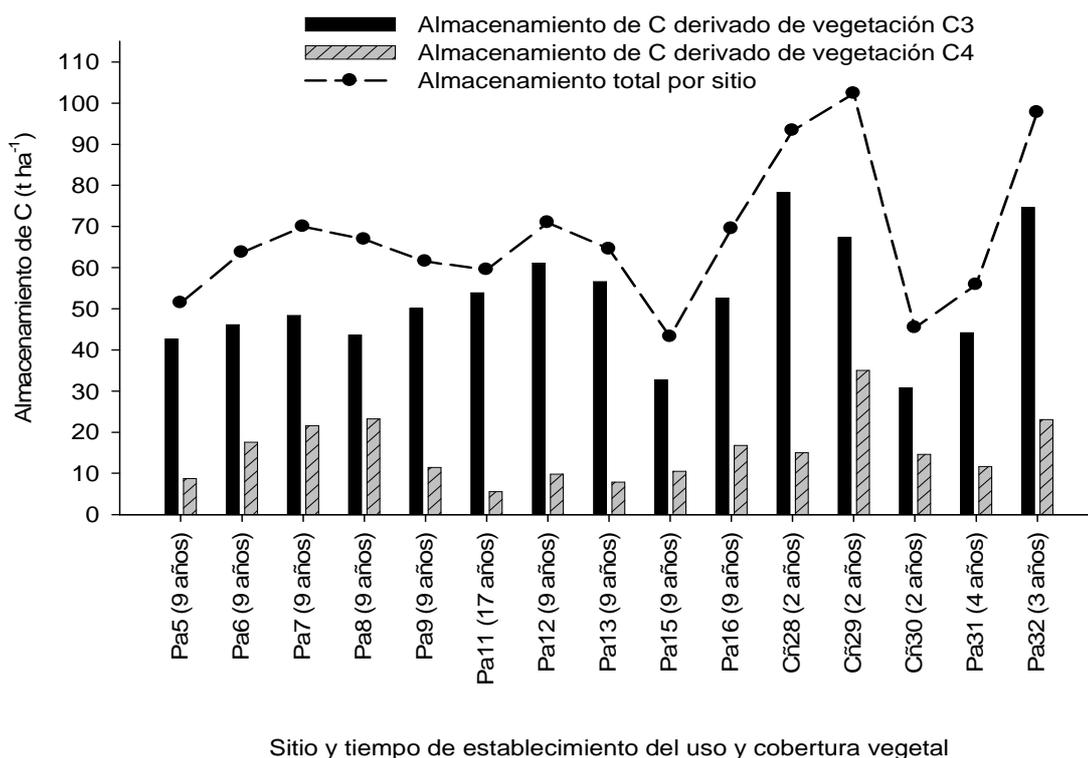


Figura 16. C almacenado en 0-30 cm por tipo de vegetación (zona baja).

### 3.4. Emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O en el suelo

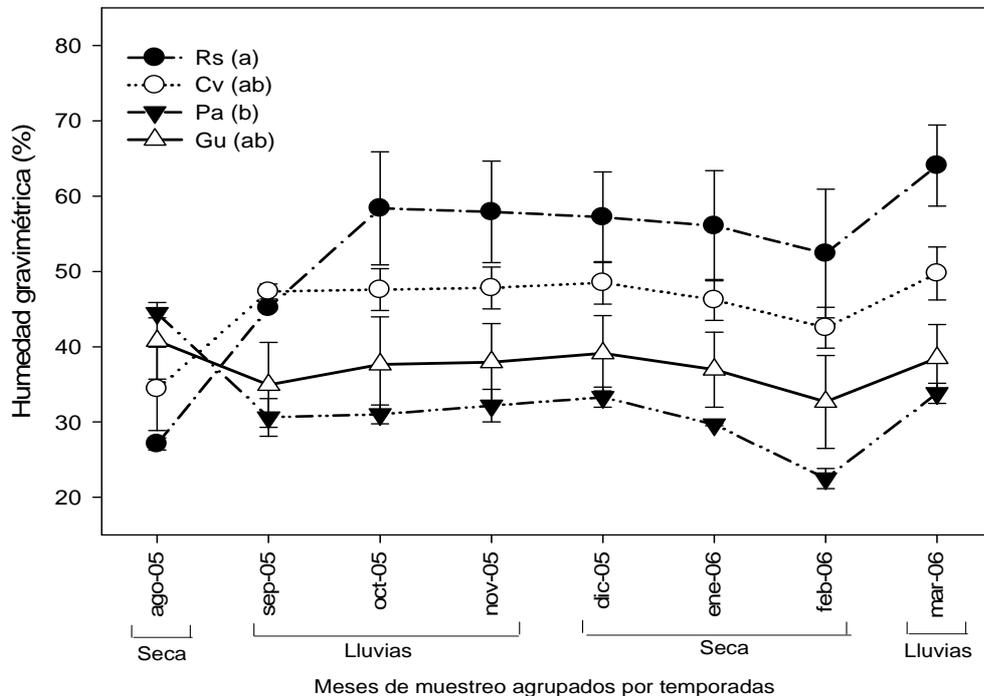
Las emisiones de metano y óxido nítrico no presentaron una correlación significativa (0.213,  $p < 0.05$ ); sin embargo se encontró en ambas un efecto del tiempo sobre los flujos de estos gases de invernadero. En los meses de octubre-05 y febrero-06 los suelos emitieron CH<sub>4</sub>, mientras en los restantes se encontró consumo de este gas (valores promedio negativos). Por el contrario, durante los ocho meses evaluados el N<sub>2</sub>O mostró valores promedio positivos, principalmente en agosto-05 (248.46  $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ); con una tendencia a mayores emisiones de óxido nítrico en las temporadas secas, a excepción del mes de septiembre-05 (169.57  $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ). En cuanto a la humedad gravimétrica del suelo se observó que estuvo relacionada con los regímenes de lluvias, encontrando el valor más bajo en el mes de agosto-05 (36.6%) correspondiente la temporada seca y el más alto en marzo-06 (46.5%) perteneciente a temporada de lluvias (Tabla 11).

**Tabla 11.** Humedad gravimétrica y emisiones promedio de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por mes

| Mes           | Humedad gravimétrica (%) |      | Emisiones CH <sub>4</sub> (μg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) |      | Emisiones N <sub>2</sub> O (μg m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ) |       |
|---------------|--------------------------|------|---|------|--|-------|
|               | Media                    | E.T. | Media   | E.T. | Media  | E.T.  |
| Seca          |                          |      |   |      |  |       |
| Agosto-05     | 36.6 <sup>ab</sup>       | 2.88 | -13.39 <sup>a</sup>   | 1.51 | 248.46 <sup>ab</sup>   | 74.44 |
| Lluvias       |                          |      |   |      |  |       |
| Septiembre-05 | 39.5 <sup>ab</sup>       | 2.88 | -54.23 <sup>b</sup>   | 2.49 | 169.57 <sup>b</sup>  | 14.54 |
| Octubre-05    | 43.6 <sup>a</sup>        | 4.37 | 7.39 <sup>c</sup>   | 2.16 | 67.22 <sup>a</sup>   | 3.60  |
| Noviembre-05  | 43.9 <sup>ab</sup>       | 4.09 | -75.93 <sup>abd</sup>   | 9.82 | 51.53 <sup>a</sup>   | 5.60  |
| Seca          |                          |      |   |      |  |       |
| Diciembre-05  | 44.5 <sup>ab</sup>       | 3.79 | -26.55 <sup>ab</sup>  | 3.34 | 102.29 <sup>ab</sup>   | 13.63 |
| Enero-06      | 42.2 <sup>a</sup>        | 4.13 | -124.87 <sup>d</sup>  | 1.15 | 109.03 <sup>a</sup>  | 10.99 |
| Febrero-06    | 37.5 <sup>b</sup>        | 4.69 | 67.40 <sup>e</sup>  | 0.61 | 98.78 <sup>a</sup>   | 18.57 |
| Lluvias       |                          |      |   |      |  |       |
| Marzo-06      | 46.5 <sup>a</sup>        | 4.65 | -44.31 <sup>b</sup>   | 0.66 | 64.15 <sup>ab</sup>  | 17.92 |

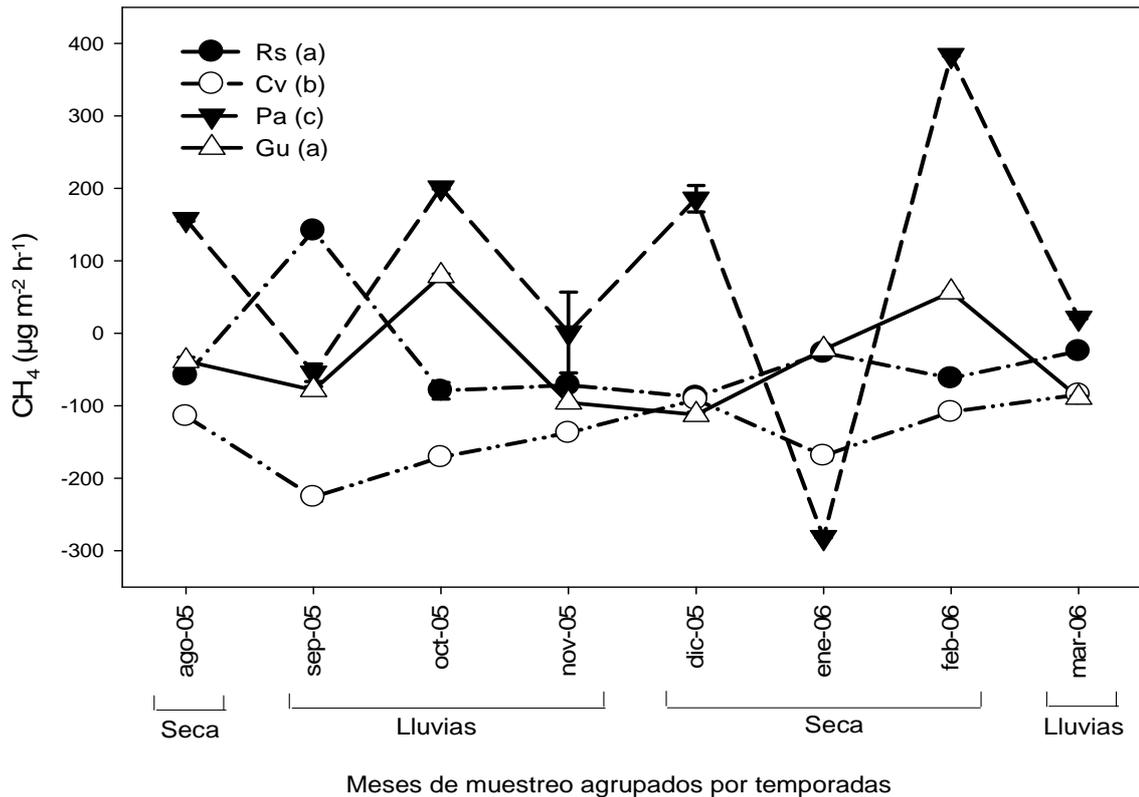
E.T.=Error típico de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0.05) entre meses.

La humedad gravimétrica mostró diferencias significativas (p<0.05) entre usos y coberturas del terreno, encontrándose relicto de selva como la cobertura de mayor humedad en el suelo con valores superiores al 50% la mayor parte del periodo evaluado. Contrariamente, pastizal presentó una baja capacidad de retención de agua en el suelo con valores que oscilaron entre 22.4 y 44.4% (Figura 17).



**Figura 17.** Porcentaje promedio de humedad gravimétrica del suelo por uso del terreno. Letras minúsculas diferentes en la leyenda indican diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno.

En las emisiones de CH<sub>4</sub> se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre usos y coberturas vegetales. El cafetal variedad Colombia fue diferente de los demás por presentar consumos (valores negativos) durante los ocho meses evaluados, con datos que oscilaron entre  $-225.96$  y  $-84.74 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ . Contrariamente el pastizal se diferenció por emitir CH<sub>4</sub> (valores positivos) durante seis meses, y consumir este gas solo en septiembre-05 ( $-54.3813 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) y enero-06 ( $-281.3972 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ); mientras que relicto de selva y guadual fueron similares, porque la mayor parte del tiempo consumieron CH<sub>4</sub> pero sin alcanzar valores tan bajos como los de cafetal variedad Colombia (Figura 18).

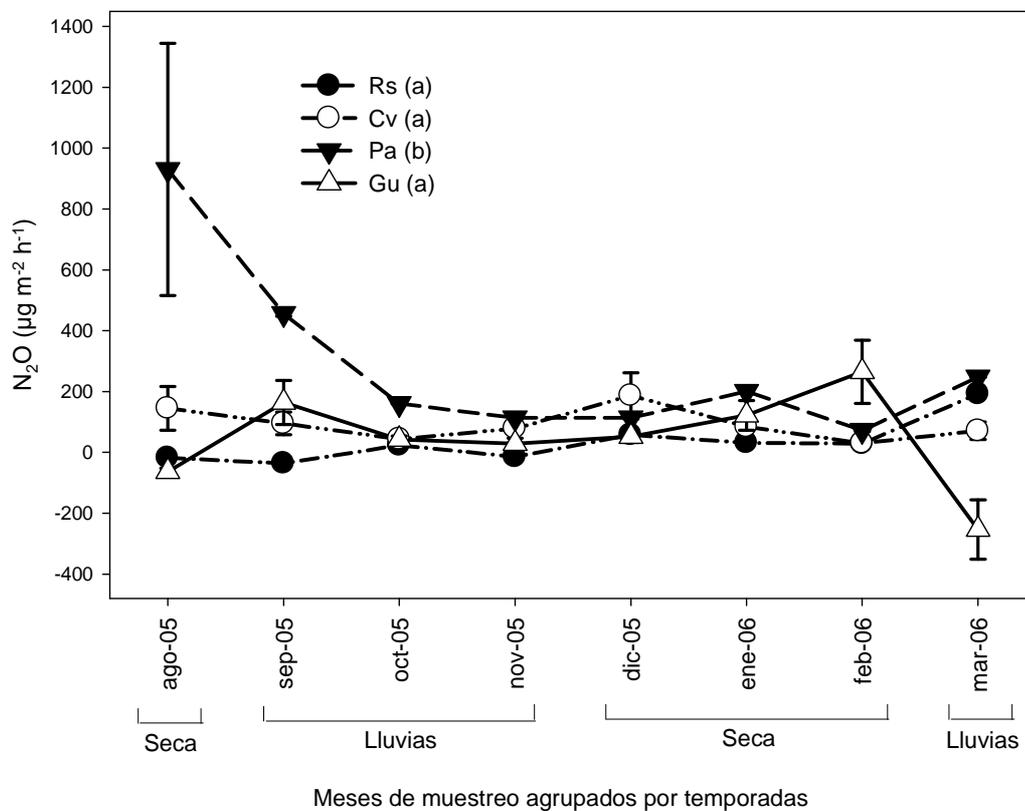


**Figura 18.** Emisiones promedio de CH<sub>4</sub> por uso del terreno. Letras minúsculas diferentes en la leyenda indican diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno.

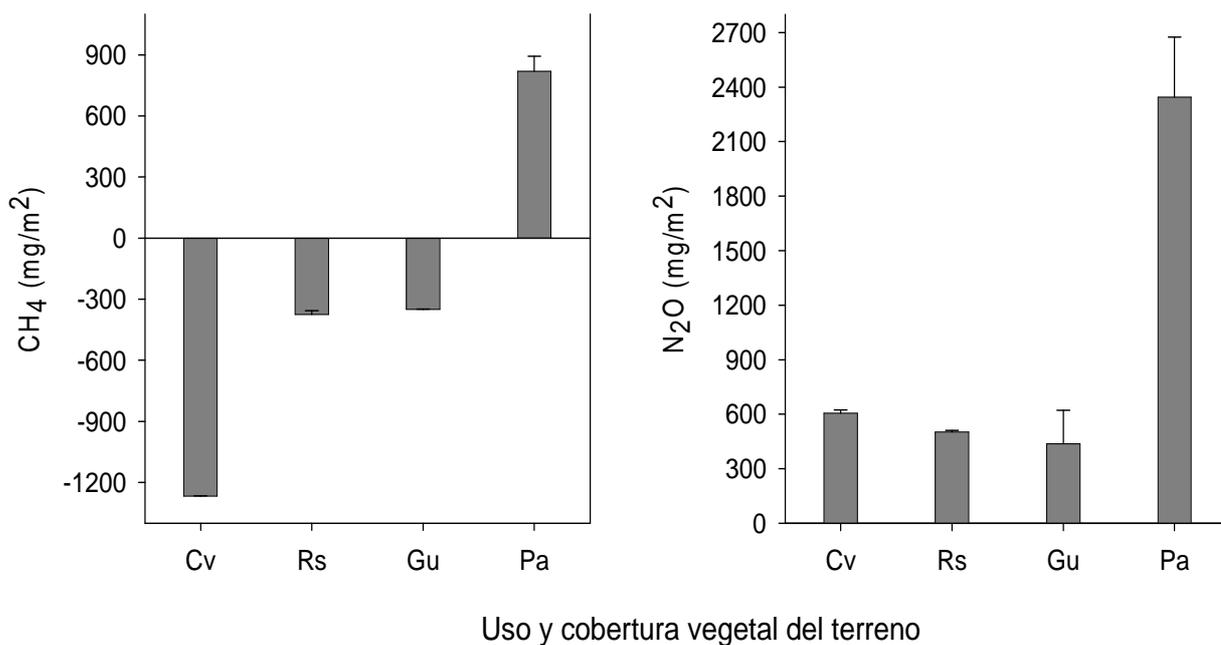
En las emisiones de N<sub>2</sub>O también se encontraron diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno. El pastizal fue el único que varió con respecto a los demás por presentar los valores más altos, principalmente en el mes de septiembre-05 ( $455.58 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ). Sin embargo, se observó que las coberturas fueron las únicas que presentaron consumos de este gas; las cuales en relicto de selva se presentaron durante los meses de agosto-05 ( $-17.9546 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), septiembre-05 ( $-36.5457 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) y noviembre-05 ( $-14.6037 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), mientras en guadual fueron en agosto-05 ( $-62.9634 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) y marzo-06 ( $-253.37 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) (Figura 19).

Los flujos netos acumulados promedio mostraron que pastizal fue el único uso que emitió CH<sub>4</sub> ( $444.76 \text{ mg m}^{-2}$ ) durante un periodo de ocho meses, mientras los demás sirvieron como sumideros de este gas de efecto invernadero, principalmente cafetal variedad Colombia que consumió  $-838.40 \text{ mg m}^{-2}$  en ocho meses. Por otra parte, todos los usos emitieron N<sub>2</sub>O, pero

nuevamente el pastizal mostró el mayor flujo neto acumulado con 1771.01 mg m<sup>-2</sup> (Figura 20).



**Figura 19.** Emisiones promedio de N<sub>2</sub>O por uso del terreno. Letras minúsculas diferentes en la leyenda indican diferencias significativas entre usos y coberturas vegetales del terreno.



**Figura 20.** Flujos netos acumulados promedio de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por uso del terreno.

### 3.5. Variabilidad espacial de los almacenamientos de carbono en la capa 0-30 cm

Los almacenamientos en la totalidad del perfil evaluado (0-30 cm) mostraron que los suelos a pesar de tener el mismo uso y cobertura vegetal variaron la cantidad de C y N fijado de acuerdo con la altura sobre el nivel del mar. Se observaron disminuciones considerables como la de relicto de selva que entre la zona alta y media dejó de acumular  $59.59 \text{ t C ha}^{-1}$  y  $5.59 \text{ t N ha}^{-1}$ , tendencia que también se encontró en los demás usos y coberturas que estuvieron presentes en los diferentes estratos evaluados, los cuales presentaron los menores almacenamientos en la zona baja (Tabla 12).

La dependencia espacial de los datos varió entre las grillas, incluso entre las pertenecientes a la misma zona, encontrando semivariogramas con líneas de tendencia diferentes (Figura 21). La mayor dependencia se encontró en la grilla uno con una proporción de estructura espacial de 0.99 y un rango de 271 m (Tabla 13), indicando este último la distancia de muestreo a partir de la cual los datos dejaron de estar correlacionados. Contrariamente la grilla dos no presentó ningún tipo de dependencia entre los sitios, mostrando en el semivariograma una línea recta que indicó que la semivarianza se mantuvo estable con los incrementos en la distancia.

En las grillas tres y cinco se ajustaron modelos anisotrópicos debido a la tendencia direccional de los datos, asumiendo como ejes principales ángulos de  $93^\circ$  y  $31^\circ$  respectivamente. En estos dos conjuntos de puntos se encontró que la distancia entre sitios no fue suficiente para eliminar la dependencia espacial entre ellos, debido a que se encontraron rangos que sobrepasaron la distancia de muestreo con valores de 2112 y 625-1882 m (Tabla 13).

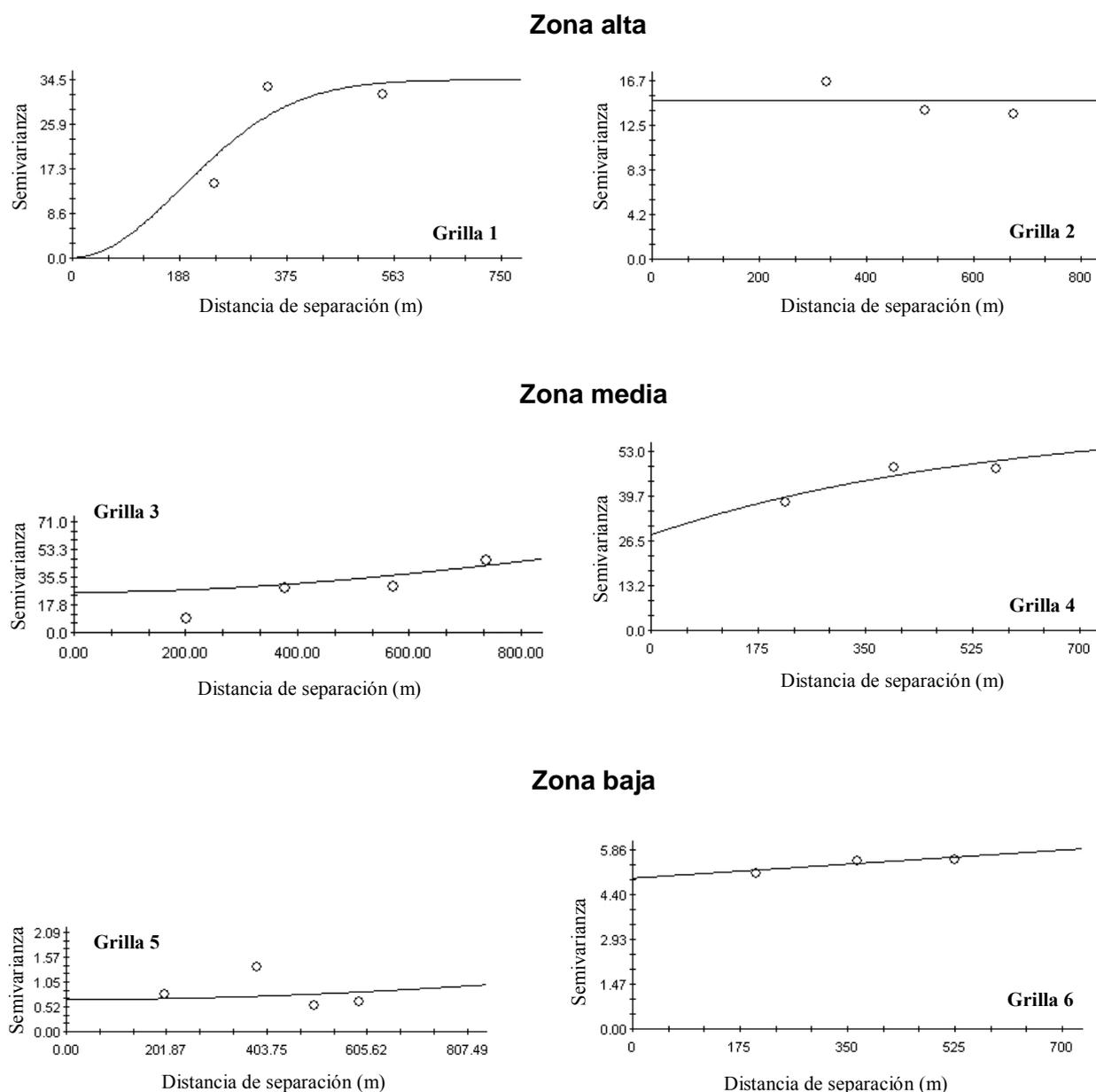
**Tabla 12.** Almacenamiento promedio de C y N en la capa de suelo 0-30 cm por usos y coberturas vegetales del terreno de cada zona de muestreo.

| Uso o cobertura vegetal del terreno | n  | Almacenamiento de C<br>(t C ha <sup>-1</sup> ) |       | Almacenamiento de N<br>(t N ha <sup>-1</sup> ) |      |
|-------------------------------------|----|--|-------|--|------|
|                                     |    | Media  | D.E.  | Media  | D.E. |
| <b>Zona alta</b>                    |    |  |       |  |      |
| Rs                                  | 6  | 102.67   | 15.29 | 9.03   | 1.68 |
| Cv                                  | 8  | 120.32   | 15.41 | 10.17  | 1.55 |
| Cy                                  | 1  | 114.78   | -     | 8.34   | -    |
| Ba                                  | 3  | 121.11   | 17.91 | 10.74  | 1.46 |
| Pl                                  | 1  | 137.97   | -     | 11.78  | -    |
| Cp                                  | 4  | 122.94   | 9.64  | 11.17  | 1.51 |
| Pa                                  | 2  | 118.01   | 5.49  | 10.18  | 0.38 |
| Cz                                  | 1  | 134.90   | -     | 11.24  | -    |
| Gu                                  | 3  | 130.43   | 8.51  | 12.18  | 1.06 |
| Cs                                  | 2  | 125.13   | 18.79 | 10.90  | 0.78 |
| Ca                                  | 1  | 123.64   | -     | 10.75  | -    |
| <b>Zona media</b>                   |    |  |       |  |      |
| Rs                                  | 1  | 43.08  | -     | 3.44   | -    |
| Cv                                  | 6  | 101.39   | 24.49 | 9.56   | 2.16 |
| Ba                                  | 2  | 105.18   | 7.69  | 9.91   | 0.04 |
| Pl                                  | 1  | 78.15  | -     | 6.84   | -    |
| Cp                                  | 8  | 89.79  | 28.02 | 8.16   | 2.10 |
| Pa                                  | 5  | 82.52  | 22.35 | 8.00   | 2.33 |
| Gu                                  | 1  | 87.90  | -     | 8.92   | -    |
| Fr                                  | 1  | 105.40   | -     | 9.38   | -    |
| Ca                                  | 4  | 80.08  | 7.66  | 7.47   | 0.63 |
| Pc                                  | 1  | 101.48   | -     | 9.29   | -    |
| Cx                                  | 1  | 85.14  | -     | 7.93   | -    |
| Cc                                  | 1  | 63.98  | -     | 5.95   | -    |
| <b>Zona baja</b>                    |    |  |       |  |      |
| Ba                                  | 2  | 62.18  | 16.30 | 6.28   | 1.48 |
| Pl                                  | 1  | 45.48  | -     | 4.53   | -    |
| Cp                                  | 1  | 68.28  | -     | 6.16   | -    |
| Pa                                  | 12 | 64.53  | 13.28 | 6.45   | 1.37 |
| Gu                                  | 3  | 58.24  | 15.61 | 6.03   | 1.78 |
| Cs                                  | 1  | 61.58  | -     | 6.29   | -    |
| Fr                                  | 2  | 57.85  | 6.21  | 5.57   | 0.54 |
| Ca                                  | 5  | 92.33  | 22.46 | 8.67   | 1.92 |
| Gc                                  | 1  | 41.75  | -     | 3.68   | -    |
| He                                  | 1  | 83.28  | -     | 6.35   | -    |
| Cñ                                  | 3  | 80.31  | 30.60 | 7.68   | 2.73 |

D.E.= desviación estándar

En la grilla uno los mayores almacenamientos de C (121-139 t ha<sup>-1</sup>) se encontraron en un gran parche que cubrió la mayoría la zona norte y parte de la zona central, correspondiendo a sitios de cafetal con sombrío (Cs10), barbecho (Ba9), guadual (Gu5) y cafetal variedad Colombia (Cv-6, 11). Contrariamente se encontró un patrón de distribución en la zona central izquierda,

con los valores más bajos en almacenamientos ( $95-104 \text{ t ha}^{-1}$ ), los cuales estuvieron relacionados con relictos de selva (Rs-1, 2, 3) (Figura 22).



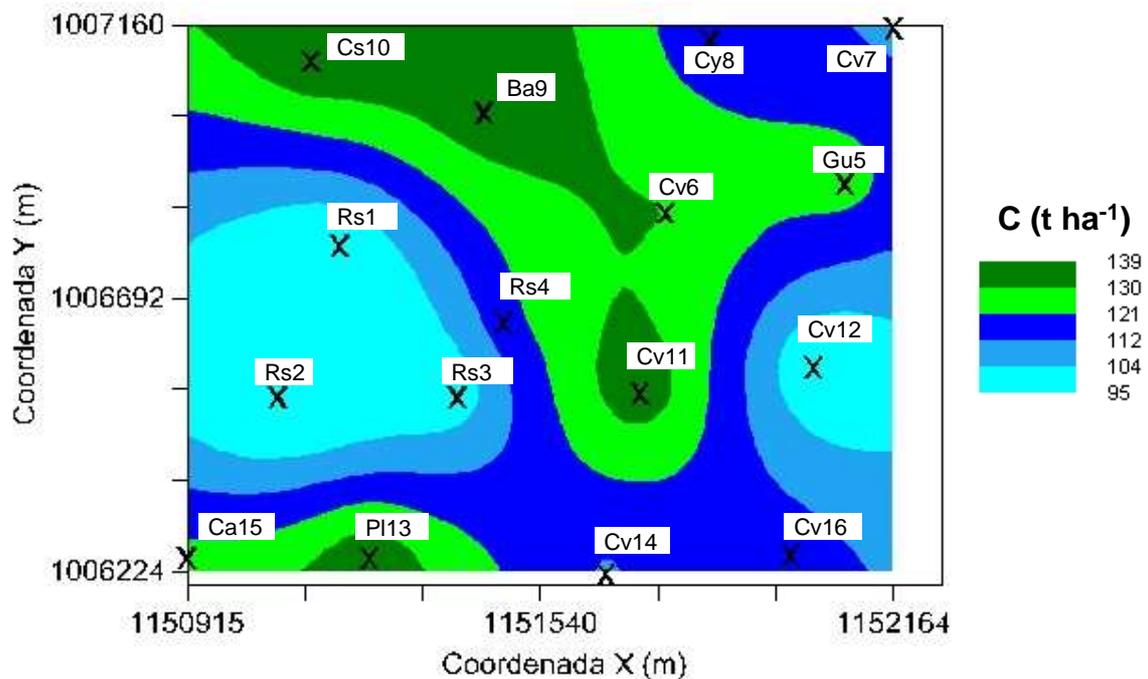
**Figura 21.** Semivariogramas ajustados a cada grilla de muestreo

Los mayores contenidos de C en la grilla dos ( $126-139 \text{ t ha}^{-1}$ ) se encontraron en la franja central en sentido norte-sur, agrupando dos sitios con guadual (Gu-26, 30) y uno con café-plátano-yuca (Cz22). Además se diferenció en la parte inferior derecha de la grilla un parche con baja densidad de carbono ( $105-112 \text{ t ha}^{-1}$ ) perteneciente a un muestreo en barbecho (Ba28) y café-plátano (Cp21) (Figura 23).

**Tabla 13.** Parámetros de los modelos ajustados para la interpolación

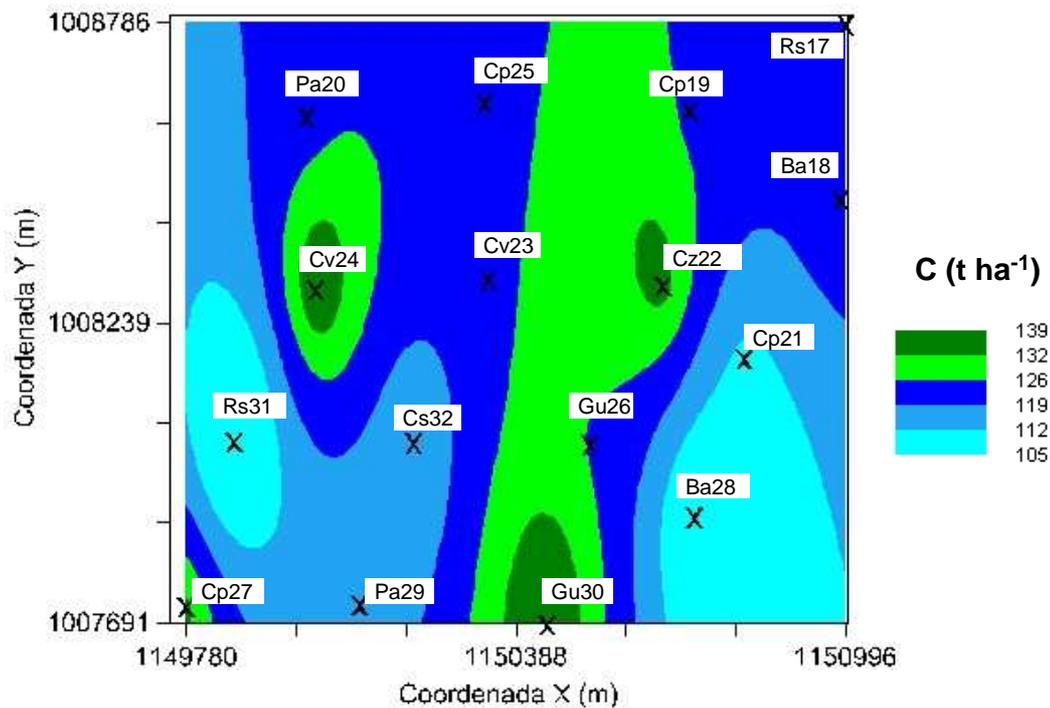
| Grilla     | Modelo | Tipo | Az<br>(°) | Efecto<br>Pepita<br>(C <sub>o</sub> ) | Silla<br>(C <sub>o</sub> +C) | Rango (m)      |                |                | Prop | r <sup>2</sup> |
|------------|--------|------|-----------|---------------------------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|------|----------------|
|            |        |      |           |                                       |                              | A <sub>0</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> |      |                |
| Zona alta  |        |      |           |                                       |                              |                |                |                |      |                |
| 1          | Gauss  | Iso  | -         | 0.1                                   | 34.5                         | 271            | -              | -              | 0.99 | 0.75           |
| 2          | Lin    | Iso  | -         | 14.82                                 | 14.82                        | 673            | -              | -              | 0    | 0.86           |
| Zona media |        |      |           |                                       |                              |                |                |                |      |                |
| 3          | Gauss  | Ani  | 93        | 25.87                                 | 96.91                        | -              | 1882           | 625            | 0.73 | 0.94           |
| 4          | Exp    | Iso  | -         | 28.3                                  | 62.93                        | 561            | -              | -              | 0.55 | 0.79           |
| Zona baja  |        |      |           |                                       |                              |                |                |                |      |                |
| 5*         | Gauss  | Ani  | 31        | 0.67                                  | 2.77                         | -              | 2112           | 2112           | 0.75 | 0.65           |
| 6          | Exp    | Iso  | -         | 4.9                                   | 5.62                         | 524            | -              | -              | 0.12 | 0.82           |

\*Datos transformados (distribución log-normal). Gauss: gaussiano, Lin: lineal, Exp: exponencial, Iso: isotrópico, Ani: anisotrópico, A<sub>0</sub>: rango en el modelo isotrópico, A<sub>1</sub>: rango mayor en el modelo anisotrópico, A<sub>2</sub>: rango menor en el modelo anisotrópico, Az: ángulo de azimut del eje principal del modelo anisotrópico, Prop: proporción de estructura espacial (C/C<sub>o</sub>+C), r<sup>2</sup>: bondad de ajuste del modelo.



**Figura 22.** Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 1.

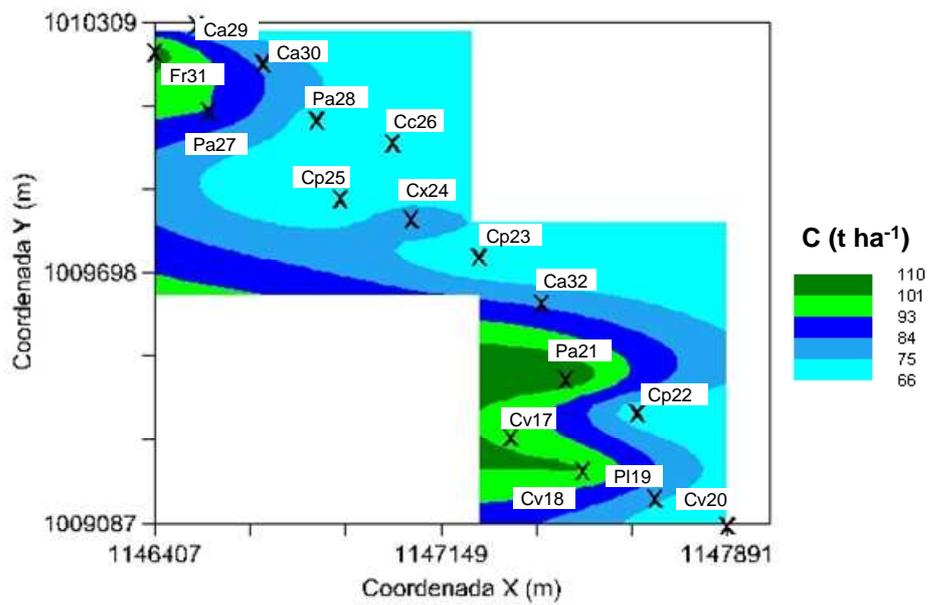
La grilla tres presentó una distribución de puntos con menor uniformidad, lo que no permitió el ajuste de un modelo isotrópico, debido a que se encontró una tendencia direccional. En este conjunto de puntos la mayoría de la superficie presentó valores bajos y medios de carbono, a excepción de la parte inferior izquierda con almacenamientos entre 101-110 t ha<sup>-1</sup> que estuvieron asociados con pastizal (Pa21), plátano (Pl19) y cafetal variedad Colombia (Cv17) (Figura 24).



**Figura 23.** Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 2.

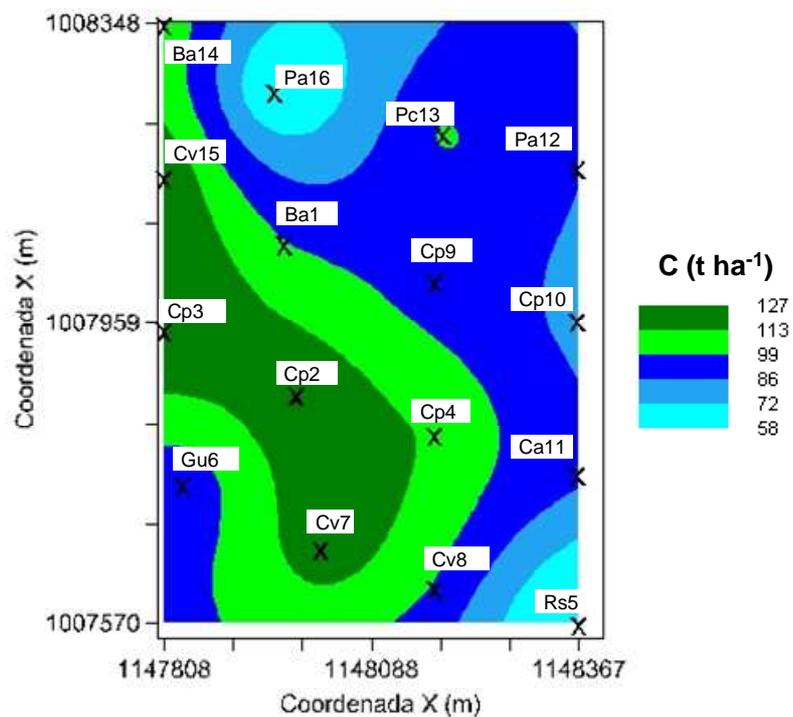
El mayor contenido de carbono en la grilla cuatro (99-127 t ha<sup>-1</sup>) se observó en un parche que ocupó gran parte de la superficie muestreada, con una tendencia hacia la zona centro y sur occidental, mostrándose como un conglomerado de sitios con barbechos (Ba-1, 14), cafetales asociados con plátano (Cp-2, 3, 4) y cafetales variedad Colombia (Cv-7, 8, 15) (Figura 25).

En la franja central en el sentido norte sur de la grilla cinco se encontraron los mayores almacenamientos de C (105.64-126.47 t ha<sup>-1</sup>) y se encontraron dos grandes parches con los almacenamientos más bajos, uno en la parte superior izquierda correspondiente a muestreos en guadua-cacao (Gc18), caña panelera (Cñ30), plátano (Pl17) y barbecho (Ba19); y el otro en la esquina inferior derecha asociado con pastizal (Pa31) y guadual (Gu25) (Figura 26).

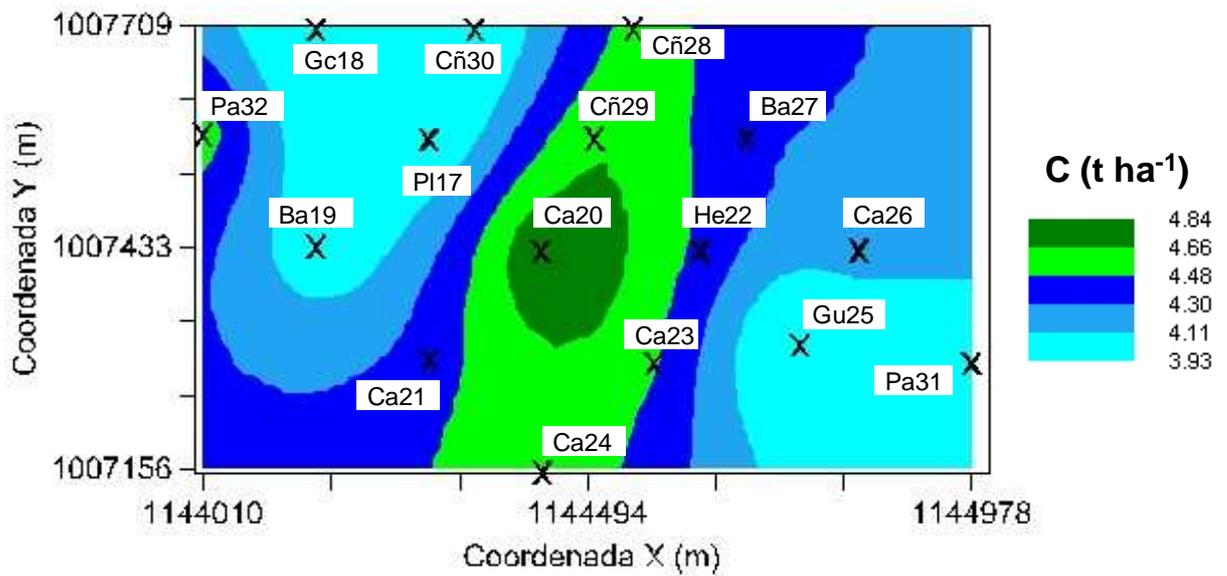


**Figura 24.** Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 3.

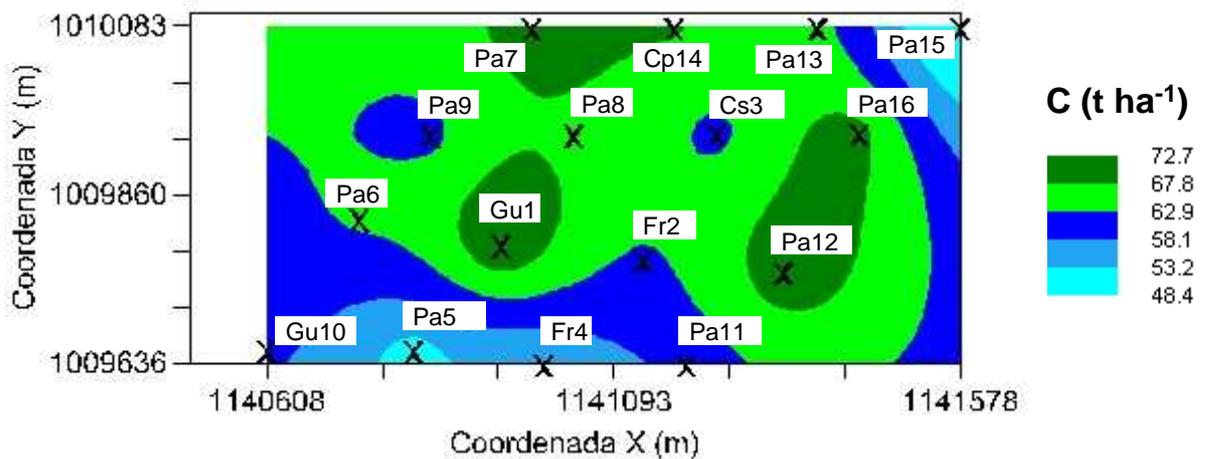
En la mayoría de la superficie de la grilla seis se encontraron almacenamientos de C superiores a  $62.9 \text{ t ha}^{-1}$ , encontrándose parches con almacenamientos entre  $67.8\text{-}72.7 \text{ t ha}^{-1}$  asociados con pastizales (Pa-7, 12, 16), guadual (Gu1) y cafetal plátano (Cp14) (Figura 27).



**Figura 25.** Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 4.



**Figura 26.** Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 5.



**Figura 27.** Distribución espacial del almacenamiento de C en la capa de suelo 0-30 cm de la grilla 6.

## 4. DISCUSIÓN

### 4.1. El método

La metodología utilizada para el muestreo de variables físico-químicas del suelo consistente en la proyección de puntos de manera sistemática cada 200 m de distancia (método de la red cuadrada), permitió observar la manera como cambió el paisaje en áreas de 1 km<sup>2</sup>, facilitando la comparación de sitios con características biofísicas similares pero con tipos de uso y cobertura diferentes. Además, Cochran (1974) resalta la importancia de este muestreo sistemático estratificado, porque en comparación con el completamente aleatorio tiene como ventaja que hace una distribución homogénea sobre la población que se quiere evaluar.

Con la definición de tres estratos (zonas) de muestreo se pudo corroborar que la altura sobre el nivel del mar afecta el carbono y el nitrógeno del suelo, y que el análisis de los almacenamientos de estos dos elementos no se puede realizar promediando valores de sitios con el mismo uso o cobertura pero localizados en diferentes rangos altitudinales. Por lo anterior, fue necesaria la utilización de herramientas de estadística multivariada como el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis de Conglomerados que permitieran la agrupación y posterior comparación entre sitios al interior de cada uno de los estratos, con el fin de eliminar el efecto de la altura.

El método del Programa Biología y Fertilidad de Suelos Tropicales (FBST) que se utilizó para la toma de muestras de suelo solo contempló la evaluación del perfil hasta la capa 20-30 cm. Al respecto Diekow *et al.* (2005) plantean que en la mayoría de las investigaciones relacionadas con C y N edáficos existe el problema de la definición del límite de profundidad para ser evaluado, y afirman que los almacenamientos y las disminuciones de estos elementos son más intensas en las capas superficiales; razón por la cual en este estudio se decidió trabajar solo hasta 30 cm porque se consideró una profundidad viable para encontrar cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo. Incluso al evaluar los porcentajes y almacenamientos de estos dos elementos se encontró que la capa 0-10 cm se diferenció de las demás, y que las variaciones entre las profundidades 10-20 y 20-30 cm no fueron significativas, lo que permitió predecir que en caso de continuar tomando muestras en capas más profundas sería posible obtener valores homogéneos entre ellas. Además, es frecuente encontrar que los estudios realizados a mayores profundidades se utilicen para comparar el efecto de la labranza sobre los almacenamientos de C y N, de manera que la toma de muestras a más de 30 cm por lo regular se hace con el objetivo de alcanzar suelo que no haya sido arado. Pero este no es el caso del estudio de Alcalá, porque a ninguno de los usos o coberturas evaluadas se le realizó labranza, debido a que no es una práctica común en el Eje Cafetero colombiano.

La estimación de los almacenamientos de carbono en el suelo se complementó con el cálculo de las tasas de recambio de la materia orgánica, las cuales según Oelbermann y Voroney (2007) se convierten en parte fundamental para el entendimiento de la dinámica del carbono terrestre e incluso pueden permitir en determinado momento calcular los flujos de carbono entre el suelo y la atmósfera. De manera que la técnica de <sup>13</sup>C adquiere importancia en los estudios de carbono edáfico, porque permite realizar evaluaciones en diferentes escalas de

tiempo que pueden ir desde uno hasta varios cientos de años, lo que permitió en este estudio calcular las tasas en sitios con diferentes historias de uso en los que los cambios de vegetación iban desde uno hasta 17 años. Además el uso de isótopos estables de carbono fue una herramienta que evitó llegar a conclusiones erróneas en relación con los sitios en los que se habían presentado cambios de vegetación, porque en el caso de haber realizado la evaluación solo teniendo en cuenta los resultados obtenidos con el método de Walkley-Black, se le hubieran atribuido los almacenamientos de carbono a los usos y coberturas actuales, cuando en realidad éstos fueron producto de la fijación de carbono por la vegetación anterior.

Para la medición de las emisiones de metano y óxido nitroso se utilizó el método de cámaras cerradas estáticas, el cual según Sagggar *et al.* (2007) se usa comúnmente para medir flujos de gases de efecto invernadero y su variabilidad espacial y temporal; incluso es un método que con el uso de un gran número de cámaras se ha utilizado en el suministro de datos para la calibración y validación de modelos de emisiones de gases responsables del cambio climático global. Por lo general la toma de datos se lleva a cabo durante un año, y aunque en este estudio solo fue posible realizar mediciones durante ocho meses, se pudo demostrar estadísticamente por medio del análisis de medidas repetidas que el tiempo tuvo un efecto considerable sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, mostrando diferencias significativas entre los meses evaluados.

La forma de mostrar los resultados sobre carbono y nitrógeno del suelo, Zinn *et al.* (2005) afirman que existen discrepancias sobre la presentación de los datos como concentraciones (%) o como totales (t ha<sup>-1</sup>) por capa de suelo evaluada; razón por la cual tanto en el trabajo que ellos realizaron en Brasil como en este estudio, la información se manejó en porcentajes y almacenamientos, con el objetivo de hacer comparables bases de datos heterogéneas sobre C y N del suelo. Además plantean que cuando se evalúan cambios en el carbono orgánico del suelo la alta variabilidad in situ, incluso en áreas aparentemente homogéneas, se convierte en un factor que dificulta el análisis de la información. Este es el caso de Brasil en el que los cambios en los almacenamientos de carbono fueron altamente variables incluso después de estratificar los datos por región, tipo y uso del suelo; algo similar a lo que se encontró en Alcalá, Colombia donde a pesar de haber estratificado por zonas de acuerdo con la altura sobre el nivel del mar, los almacenamientos variaron dentro de los mismos estratos, debido a la estructura vegetal y al manejo de los sistemas agrícolas.

Para futuros trabajos de investigación, el utilizar promedios de <sup>13</sup>C para la vegetación de tipo fotosintético C3 (-26‰) y C4 (12‰) se podría mejorar por medio de la medición de este isótopo en las especies vegetales dominantes de los sitios de muestreo de variables físicoquímicas del suelo, lo que permitiría aumentar la precisión en los cálculos de las tasas de recambio y en los aportes de carbono al suelo según el tipo fotosintético de las plantas. Además, para la evaluación de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O sería importante aumentar el tiempo de muestreo de ocho a 12 meses, con el fin de observar las variaciones temporales durante todo el año y poder calcular flujos netos acumulados anuales. También los análisis de materia orgánica en el suelo se podrían complementar con análisis de caracterización para correlacionar el carbono y el nitrógeno del suelo con otras variables físicoquímicas como textura, estructura, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases entre otras, que faciliten la explicación de los procesos que ocasionan las variaciones en los contenidos de C y N edáficos.

## 4.2. Variación del carbono y nitrógeno del suelo

El carbono y el nitrógeno del suelo en el municipio de Alcalá mostraron una alta variabilidad, la cual estuvo asociada a las diferencias en la altura sobre el nivel del mar, el tipo de vegetación, las prácticas de manejo y la historia del uso del terreno en cada sitio de muestreo. Al eliminar el efecto de la altura por medio de los análisis al interior de cada estrato, se encontró que el C y N no es igual en sitios que tienen el mismo uso o cobertura vegetal, y que para comprender los almacenamientos de estos dos elementos no solo bastan las mediciones in situ, sino que es necesaria la reconstrucción del pasado de cada lugar para tener nociones sobre las posibles causas de los resultados encontrados. Además, el hecho de evaluar el C y N edáficos por medio de muestreos a nivel de paisaje permitió constatar que lo que ocurre en condiciones ambientales en muchos casos difiere de lo encontrado en diseños con parcelas experimentales en las que ciertas variables son controladas.

La comparación de tres zonas de muestreo diferentes permitió identificar el notable efecto de la altura sobre el nivel del mar en el carbono y el nitrógeno del suelo, mostrando cómo una diferencia de 150 m entre los estratos causó para las tres profundidades del suelo disminuciones promedio de 8.49 t C ha<sup>-1</sup> y 0.62 t N ha<sup>-1</sup>. La separación de los porcentajes y almacenamientos de C y N por altura, exhibió los valores máximos en la zona alta (1450-1600 m); contrario a lo registrado en el trabajo de Manfrinato *et al.* (2001) en Brasil, quienes obtuvieron correlaciones bajas y negativas entre el carbono y la altura (-0.33) y, el nitrógeno y la altura (-0.28), observando los mayores almacenamientos en las partes bajas. Esto lo atribuyeron posiblemente a las fuertes precipitaciones en el área de estudio durante los meses más lluviosos, lo que pudo haber transportado hacia las zonas planas del terreno la fracción de la materia orgánica que se presenta en estado soluble o posible de suspensión.

También se encontró en este trabajo que los porcentajes y almacenamientos de C y N estuvieron altamente correlacionados, lo que se pudo haber presentado porque la disponibilidad de N regula el crecimiento de las plantas y por consiguiente la fijación de C. Por esta razón en el uso cafetal variedad Colombia se encontraron los mayores almacenamientos de estos dos elementos, ya que según lo afirmado por Diekow *et al.* (2005), en los sistemas de cultivo en los que se realiza fertilización con nitrógeno puede aumentar el almacenamiento de carbono, debido a que se favorece la asimilación de nitrógeno en forma de Amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) por parte de las plantas, estimulando la producción de fitomasa que posteriormente retorna al suelo y contribuye con los depósitos subterráneos de este elemento (Jones y Jacobsen, 2005).

En los estratos del suelo se encontraron diferencias con la profundidad, como en el caso de los pastizales de la zona baja que presentaron los almacenamientos de carbono más altos pero solo en 0-10 cm, de manera que la pérdida de este elemento en los horizontes inferiores pudo estar asociada con cambios en la temperatura, radiación, compactación, mal drenaje interno y sistema radicular poco profundo de la gramínea, que favorecieron una mayor mineralización de la materia orgánica (Escobar y Toriatti Dematté, 1991). Por el contrario, sistemas de cultivo como cafetales con arquitecturas vegetales conformadas por árboles cuyas raíces profundizan más en el perfil del suelo, presentaron almacenamientos de C y N importantes en las capas más profundas.

En relación con estos cambios asociados con la profundidad, también se encontró que en forma general los promedios de porcentajes y almacenamientos de C y N disminuyeron hacia

las capas inferiores, presentando una tendencia diferente a la encontrada por Diekow *et al.* (2005) en la estación agronómica experimental de la Universidad Federal de Rio Grande do Soul, Brasil, donde sistemas de cultivo con asociaciones de cereales y leguminosas almacenaron mayores cantidades de estos dos elementos en las partes más profundas, lo que explicaron por la posible disposición de material orgánico por medio del aporte directo de las raíces o por el transporte de residuos orgánicos a través del perfil del suelo por la meso y macrofauna edáfica.

Además, los porcentajes de carbono en la profundidad 0-10 cm variaron entre 0.52 y 10.52% en las tres zonas, presentando promedios de 7.7% en la alta, 5.0% en la media y 2.5% en la baja. En esta última localizada en el rango altitudinal 1150-1300 m el valor máximo fue de 4%, mientras que Jiménez *et al.* (2007) en Costa Rica reportaron para la misma capa de suelo en plantaciones de *Hieronyma alchorneoides* (Pilón), *Stryphnodendron excelsum* (Vainillo), *Vochysia guatemalensis* (Chancho blanco) y *Calophyllum brasiliense* (Cedro María) valores entre 4.49 y 5.52%; en un trabajo realizado en un andisol a menor altura sobre el nivel del mar (64 metros), con mayores promedios de temperatura (25.1°C), precipitación anual (3464 mm) y humedad relativa (87%) a los de la zona baja de Alcalá. De acuerdo con lo anterior, se observó que la precipitación pudo ser un factor más influyente que la temperatura en la acumulación de C y N en el suelo, porque según Stevenson (1994) a medida que aumenta la temperatura los contenidos de estos dos elementos son menores, mientras que la precipitación y la humedad poseen una relación directamente proporcional al almacenamiento; de manera que el haber encontrado en Costa Rica una zona de trabajo más calurosa y húmeda que la de este estudio, permitió atribuir a la alta disponibilidad de agua la estimulación del crecimiento de las plantas y por consiguiente el aumento en la producción de material vegetal crudo para la síntesis del humus.

Pero no solo los porcentajes y almacenamientos de C y N cambiaron con la profundidad, el  $^{15}\text{N}$  en las tres zonas de muestreo mostró diferencias significativas entre las profundidades 0-10, 10-20 y 20-30 cm, con los valores máximos en la capa más profunda. Al respecto Boeckx *et al.* (2006) afirman que los incrementos en el  $^{15}\text{N}$  con la profundidad son el resultado de los mayores grados de descomposición de la materia orgánica de las partes más profundas del suelo. Por otra parte, se observó que uno de los sitios en los que se aplicaron abonos orgánicos (P117), presentó valores más bajos que los usos con aplicaciones de fertilizantes de síntesis química, contrario a lo planteado por Watzka *et al.* (2005) quienes afirman que los fertilizantes minerales tienen valores de  $^{15}\text{N}$  cercanos a cero, mientras los orgánicos son enriquecidos con este isótopo de nitrógeno, de manera que los suelos en los que se utilizan estos últimos deben presentar abundancias de  $^{15}\text{N}$  superiores.

### 4.3. Dinámica del carbono orgánico del suelo (abundancia natural de $^{13}\text{C}$ )

24 de los 96 sitios muestreados en las tres zonas de Alcalá presentaron cambios de vegetación de tipo fotosintético C3 por C4, debido a procesos de sustitución de cafetales por pastizales o caña panelera. En todos se observó que la materia orgánica todavía no había sido estabilizada, por el hecho de encontrar señales de  $^{13}\text{C}$  que correspondían a vegetación anterior y no a la actual; indicando que en su gran mayoría el carbono almacenado en el suelo se debía a los procesos de fijación de los cafetos establecidos en épocas anteriores y no a las gramíneas predominantes en los últimos años. Lo anterior permite reconocer la importancia de la estimación de la abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  y el conocimiento de la historia del uso del terreno

de cada sitio de muestreo, porque de lo contrario se le podrían haber atribuido principalmente a los pastizales capacidades sobrevaloradas sobre la capacidad de captura de CO<sub>2</sub>.

Los valores de <sup>13</sup>C en las tres zonas de muestreo fueron menos negativos en la profundidad 20-30 cm, pero en relación con usos y coberturas se encontró que en siete de ellas (Rs, Cy, Ba, Pl, Pa, Cñ, Cc) el <sup>13</sup>C no aumentó con la profundidad, mientras en los 11 restantes se conservó esta tendencia y se destacaron cafetal-plátano, cafetal con sombrío y frutales por presentar diferencias altamente significativas entre 0-10 y 20-30 cm, alcanzando variaciones superiores a una unidad (‰). De acuerdo con lo anterior Sisti *et al.* (2004) afirman que la materia orgánica del suelo en las partes más bajas está más humificada, lo que hace que los valores de <sup>13</sup>C sean menos negativos a medida que se profundiza en el perfil, alcanzando entre la superficie y los 100 cm diferencias entre una y dos unidades (‰); sin embargo en este estudio se encontraron cambios de esta magnitud entre la capa superficial y los 30 cm. Los mismos autores plantean que los factores que pueden ser responsables de estos incrementos con la profundidad, están relacionados con el aumento en los últimos 150 años en la utilización de combustibles fósiles de baja abundancia de <sup>13</sup>C, los cuales han disminuido el promedio de <sup>13</sup>C atmosférico por lo menos en un 1.3‰; además la edad de la materia orgánica del suelo es mayor hacia las capas inferiores, siendo posible que el C introducido en el suelo vía fotosíntesis en tiempos anteriores, haya tenido valores más altos de <sup>13</sup>C. Con relación a esto Rao *et al.* (1994) afirman que otra posible causa de este fenómeno puede ser el resultado de una descomposición preferencial en las zonas más profundas, donde lo primero que se remueven son los componentes o moléculas con valores bajos de <sup>13</sup>C.

Sitios con pastizales de nueve, diez y 17 años de edad obtuvieron valores de <sup>13</sup>C que en las tres profundidades variaron entre -18.82 y -25.16‰, mostrando la predominancia del carbono proveniente de los cafetales (C3). Contrariamente Rao *et al.* (1994) encontraron en Carimagua, Colombia pastizales con 12 años de edad en los que se notó la rapidez con que cambió la materia orgánica, al presentarse valores de <sup>13</sup>C que variaron entre -12.08 y -13.26‰, dejando ver que en estos suelos el carbono edáfico se había derivado de las gramíneas (C4).

Por otra parte, Manfrinato *et al.* (2001) en el estudio realizado en selva nativa, pastizal de 20 años, y pastizales con tiempo de abandono de cinco y diez años, encontró valores de δ<sup>13</sup>C en 0-10 cm de -27.74, -22.90, -25.10 y -26.49‰ respectivamente, mostrando que la zona con cobertura nativa presentó los valores más altos correspondientes a vegetación C3, que el pastizal a pesar de tener una edad de 20 años todavía no se acercaba a los valores de <sup>13</sup>C de vegetación C4 (14‰ en promedio), y los pastizales abandonados que ya comenzaban a presentar vegetación arbustiva y arbórea tendían nuevamente a valores más negativos que se acercaban a los de la vegetación inicial. Lo anterior permite afirmar que las tasas de recambio en esas zonas fueron menores a las encontradas en Alcalá, donde pastizales de nueve y diez años presentaron valores de -19.90‰ (Pa8-zona baja) y -18.82‰ (Pa27-zona media) respectivamente, con tasas de recambio de la materia orgánica de 4.3 y 4.5% año<sup>-1</sup>.

Las tasas de recambio se observó que en general todos los sitios tuvieron alta capacidad para estabilizar la materia orgánica; en pastizales abandonados con vegetación arbórea en sucesión, los valores de <sup>13</sup>C en todas las profundidades después de 13 años variaron entre -20.64 y 25.42‰, acercándose más al promedio de la vegetación C<sub>3</sub> (-26‰) que al de C<sub>4</sub> (-14‰). Sólo se encontraron excepciones en los sitios Pa11 (0.3% año<sup>-1</sup>) y Pa 13 (1.0% año<sup>-1</sup>) de la zona baja, cuyos valores fueron menores a los encontrados por Roscoe *et al.* (2001) en Brasil donde

pastizales después de 23 años de establecidos solo habían logrado reemplazar el 36% del carbono proveniente de la vegetación nativa, indicando una tasa de recambio del 1.6% año<sup>-1</sup>, la cual se consideró como una tasa rápida, que difiere notablemente de tasas encontradas en lugares como Cñ-29 y 30 en los que la velocidad de transformación fue de 16.5 y 16.2% año<sup>-1</sup> respectivamente.

El alto porcentaje de carbono derivado de plantas C3 en los lugares con varios años de pastizales, comparado con aquellos relictos de selva de la zona alta que contaron con poco carbono proveniente de plantas C4, indica que el depósito de carbono de la vegetación C3 es recalcitrante, mientras que el correspondiente a vegetación C4 posee tasas de retorno relativamente rápidas (Lemenih *et al.*, 2005).

#### 4.4. Emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O

Los flujos de metano y óxido nitroso en el municipio de Alcalá mostraron que los suelos pueden actuar como fuente o como sumidero de gases de efecto invernadero, principalmente de CH<sub>4</sub> que en los usos y coberturas evaluadas presentó valores negativos que indicaron consumos de este gas, y valores positivos que reflejaron la capacidad de producción del mismo a partir de los diferentes procesos biológicos que se llevan a cabo en el suelo. En sitios con relictos de selva, gradual y cafetal variedad Colombia se consumió CH<sub>4</sub>, indicando que posiblemente en estos usos las bacterias metanotróficas oxidaron el metano antes de que saliera del suelo (Kamman *et al.*, 2001) contribuyendo con la disminución de sus concentraciones en la atmósfera. Los mismos autores también plantean que las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados afectan la oxidación de metano, debido a que el amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) inhibe la enzima metano-monooxigenasa que es la encargada de catalizar el proceso oxidativo.

Ghosh *et al.* (2003) afirman que la utilización de fertilizantes de síntesis química contribuye con las emisiones porque el fertilizante aplicado puede ayudar a aumentar la metanogénesis, debido a que suple el nitrógeno necesario para el metabolismo de los microorganismos encargados de esta reacción. Además los fertilizantes favorecen el aumento en la biomasa vegetal, la cual retorna al suelo en forma de compuestos carbonados que también son utilizados en la metanogénesis, y a la vez este aumento en la biomasa provoca un mayor intercambio gaseoso porque las plantas sirven como conducto para el transporte de metano desde el suelo hasta la atmósfera. Por todo lo anterior, era de esperarse que el uso cafetal variedad Colombia presentara las mayores emisiones de CH<sub>4</sub> por las constantes aplicaciones de fertilizantes a base de N, P y K (15-15-15), sin embargo se encontró todo lo contrario porque fue el uso que más consumió este gas durante los ocho meses, con valores que oscilaron entre -225.96 y -84.74 μg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

En relación con los flujos de N<sub>2</sub>O Weitz *et al.* (2001) plantean que la fertilización en suelos tropicales incrementa significativamente sus emisiones en el suelo, razón por la cual se cree que la expansión y la intensificación de la agricultura tropical son las principales causas del aumento en la concentración del óxido nitroso atmosférico. Sin embargo, el uso cafetal variedad Colombia no fue el de mayores emisiones de N<sub>2</sub>O a pesar de haber sido sometido a aplicaciones de fertilizantes de síntesis química, mientras que el pastizal se mostró como el de mayor producción de este gas.

#### 4.5. Variabilidad espacial de los almacenamientos de C en la capa 0-30 cm

Los almacenamientos de C en 0-30 cm difirieron de otros estudios realizados en el neo y paleotrópico, En el caso de la cobertura relicto de selva en la zona alta de este estudio, almacenó en promedio 102.67 t C ha<sup>-1</sup>, mientras que la misma cobertura y a la misma profundidad presentó valores de 75 y 82.20 t C ha<sup>-1</sup> en los estudios de Escobar y Toriatti Dematté (1991) y Powers y Schlesinger (2002) respectivamente. Incluso, los valores fueron superiores a los obtenidos por Glenday (2006) en la profundidad 0-60 cm de bosques nativos en Kenia. Además, se observó en la mayoría de los usos evaluados una alta capacidad para el almacenamiento de C, y aunque la comparación con otros estudios se dificulta por la profundidad del perfil evaluado, se puede afirmar que en general los suelos del municipio de Alcalá cuentan con un alto potencial para la captura de CO<sub>2</sub> (Tabla 13).

Cuando se realizaron los análisis de varianza no paramétricos para los usos y coberturas del terreno de cada grilla no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), sin embargo al utilizar la herramienta geoestadística cokriging se encontró que en cuatro de las grillas los rangos variaron entre 271-673 m indicando que a partir de estas distancias ya no existía autocorrelación espacial entre las muestras, lo que se puede atribuir a los cambios en los usos y coberturas que implican estructuras vegetales y prácticas de manejo diferentes. Esto corrobora lo planteado por Zhang y McGrath (2004) cuando afirman que la geoestadística provee una herramienta útil para la evaluación espacial de cambios en las ciencias ambientales y que puede detectar características que no son perceptibles cuando solo se utilizan estadísticos convencionales.

El hecho de haber encontrado rangos ( $A_0$ ) en los modelos isotrópicos que estaban dentro de las distancias máximas que podían existir entre los puntos de una misma grilla, indica que la escala a la cual se realizaron los muestreos fue apropiada para encontrar sitios que no presentaban dependencia espacial (muestras independientes), indicando un alto nivel de confiabilidad en el momento de realizar análisis estadísticos con estos conjuntos de datos (Jung *et al.*, 2006). Por el contrario, en el estudio realizado por Muñoz *et al.* (2006) en parcelas dedicadas al cultivo de papa en Cundinamarca, Colombia, encontraron para el carbono orgánico un rango que superaba la distancia de muestreo utilizada, para lo cual concluyeron que esta variable estaba siendo afectada posiblemente por factores que variaban a distancias superiores a las muestreadas, como la pendiente y la forma del terreno. Sin embargo en este trabajo se encontró que cuándo se realizan evaluaciones a nivel de paisaje y no de parcela, lo que puede provocar los cambios en el carbono edáfico son las diferencias en la vegetación y la historia del uso del terreno.

En este estudio los rangos encontrados en las seis grillas variaron entre 271-2112 m, mientras en el trabajo realizado por Liu *et al.* (2006) se llevó a cabo un análisis en grillas de 10 km<sup>2</sup>, encontrando rangos de 632 km; contrario a la investigación desarrollada por Schönig *et al.* (2006) quienes realizaron evaluaciones a pequeña escala en una parcela con plantación de haya (*Fagus sylvatica* L) y un área de 10.000 m<sup>2</sup> (1 ha), observando rangos de 5 m. Lo anterior deja ver que la escala a la cual se realizan los muestreos tienen gran influencia en la conclusión de las distancias mínimas para encontrar variaciones en el carbono orgánico del suelo, además, muestra que los resultados varían significativamente entre evaluaciones en parcelas en las que el uso es el mismo para toda el área de estudio, y análisis a nivel de paisaje con parches y mosaicos producto de la heterogeneidad de los usos y las coberturas vegetales del terreno.

**Tabla 14.** Almacenamiento de carbono en diferentes usos y coberturas vegetales del terreno

| Uso o cobertura vegetal                            | Orden del Suelo      | Altura (m) | Prof (cm) | Alm (t C ha <sup>-1</sup> ) | Localización | Referencia                       |
|--|----------------------|------------|-----------|-----------------------------|--------------|----------------------------------|
| Guadua   | Andisol              | 900-2000   | 25        | 62.66                       | Colombia     | Arias y Hoyos, 2004              |
| Pastizal ( <i>Ischaemum sp.</i> )                  | Andisol              | 64         | 50        | 115.6                       | Costa Rica   | Jiménez <i>et al.</i> , 2007     |
| Pastizal   | Cambisol             | 6-9        | 10        | 59.47                       | Brasil       | Manfrinato <i>et al.</i> , 2001  |
| Pastizal abandonado (cinco años)                   | Cambisol             | 6-9        | 10        | 50.39                       | Brasil       | Manfrinato <i>et al.</i> , 2001  |
| Pastizal   | Andisol              | 1350-2150  | 5         | 26                          | Colombia     | Hoyos y Comerford, 2005          |
| Pastizal (Zona media)                              | Andisol              | 1300-1450  | 30        | 82.52                       | Colombia     | Este estudio                     |
| Pastizal (Zona baja)                               | Alfisol              | 1150-1300  | 30        | 64.53                       | Colombia     | Este estudio                     |
| Pastizal ( <i>Paspalum notatum</i> ) <sup>30</sup> |                      |            | 30        | 55                          | Colombia     | Escobar y Toriatti Dematté, 1991 |
| Pastizal   | Andisol              | 0-1600     | 25        | 80.47                       | Ecuador      | López-Ulloa <i>et al.</i> , 2005 |
| Pastizal   | Inceptisol           | 0-1600     | 25        | 53.66                       | Ecuador      | López-Ulloa <i>et al.</i> , 2005 |
| Pastizal con árboles                               | Vertisol             | 550-650    | 100       | 284                         | Etiopía      | Michelsen <i>et al.</i> , 2004   |
| Cafetal a libre exposición                         | Andisol              | 1350-2150  | 5         | 23                          | Colombia     | Hoyos y Comerford, 2005          |
| Cafetal con sombrío                                | Andisol              | 1350-2150  | 5         | 19                          | Colombia     | Hoyos y Comerford, 2005          |
| Cafetal variedad Colombia (Zona alta)              | Andisol              | 1450-1600  | 30        | 120.32                      | Colombia     | Este estudio                     |
| Cafetal variedad Colombia (Zona media)             | Andisol              | 1300-1450  | 30        | 101.39                      | Colombia     | Este estudio                     |
| Cafetal variedad caturra (Zona baja)               | Alfisol              | 1150-1300  | 30        | 92.33                       | Colombia     | Este estudio                     |
| Cafetal-plátano (Zona media)                       | Andisol              | 1300-1450  | 30        | 89.79                       | Colombia     | Este estudio                     |
| Plátano  | Ultisol y Alfisol    | 50-300     | 30        | 35                          | Panamá       | Tschakert <i>et al.</i> , 2006   |
| Barbecho (un año)                                  | Ultisol y Alfisol    | 50-300     | 30        | 49                          | Panamá       | Tschakert <i>et al.</i> , 2006   |
| Barbecho (dos años)                                | Ultisol y Alfisol    | 50-300     | 30        | 51                          | Panamá       | Tschakert <i>et al.</i> , 2006   |
| Bosque secundario                                  | Andisol              | 0-1600     | 25        | 88.50                       | Ecuador      | López-Ulloa <i>et al.</i> , 2005 |
| Bosque secundario                                  | Inceptisol           | 0-1600     | 25        | 66.14                       | Ecuador      | López-Ulloa <i>et al.</i> , 2005 |
| Bosque nativo (>20 años)                           | Acrisol y Cabrisol   | 1520-1680  | 60        | 100                         | Kenia        | Glenday, 2006                    |
| Bosque nativo (<20 años)                           | Acrisol y Cabrisol   | 1520-1680  | 60        | 63                          | Kenia        | Glenday, 2006                    |
| Selva  | Cambisol             | 6-9        | 10        | 36.33                       | Brasil       | Manfrinato <i>et al.</i> , 2001  |
| Selva tropical                                     | -                    | -          | 50        | 90.7                        | India        | Chhabra <i>et al.</i> , 2003     |
| Selva húmeda tropical                              | Inceptisol y Ultisol | 47-799     | 30        | 82.20                       | Costa Rica   | Powers y Schlesinger, 2002       |
| Selva  |                      |            | 30        | 75                          | Colombia     | Escobar y Toriatti Dematté, 1991 |
| Relicto de selva (Zona alta)                       | Andisol              | 1450-1600  | 30        | 102.67                      | Colombia     | Este estudio                     |

Prof: profundidad, Alm: almacenamiento

#### 4.6. Discusión general

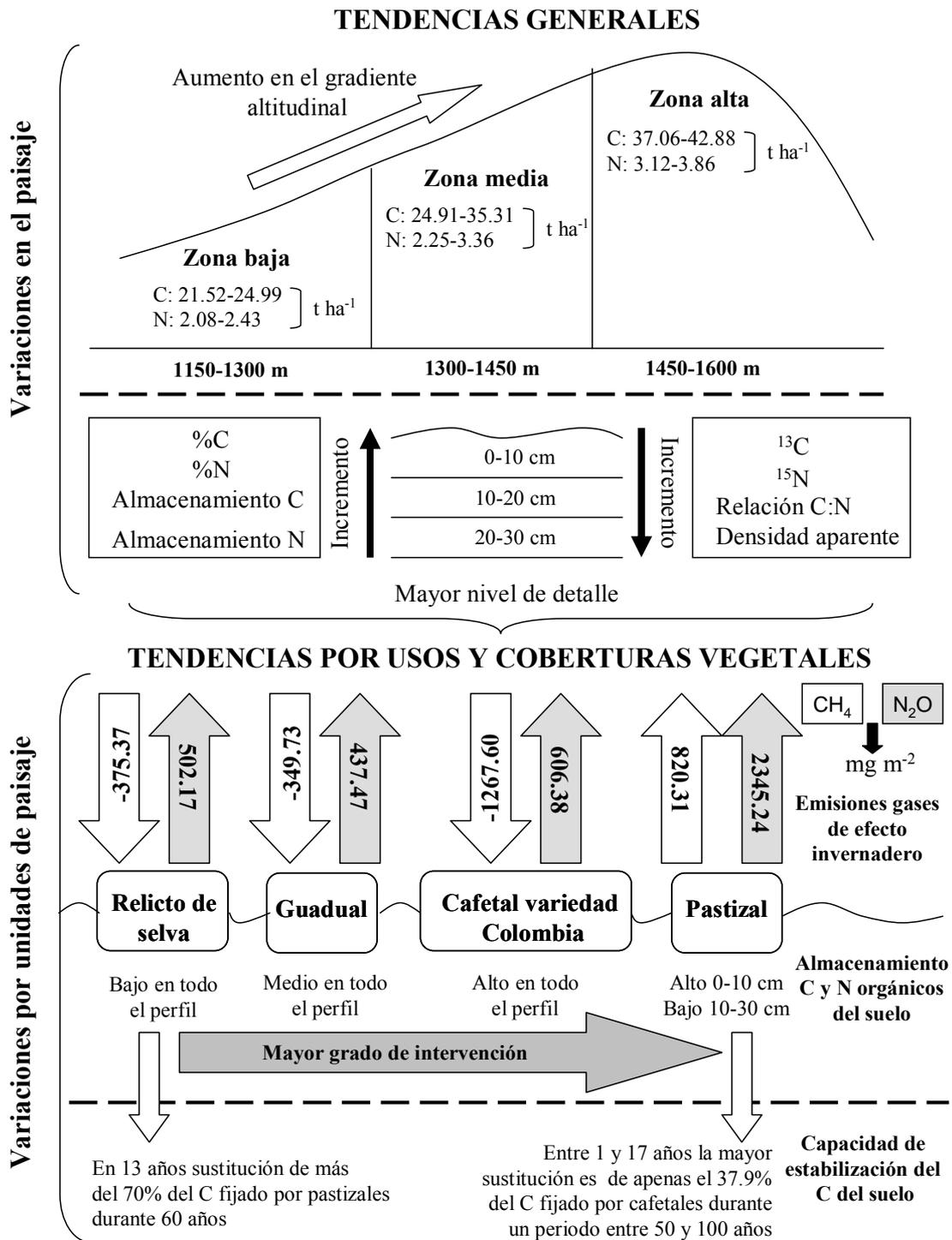
En relación con la relevancia de este trabajo en términos de contribución a la mitigación de la problemática del cambio climático, se debe resaltar el haber encontrado el alto potencial de almacenamiento de carbono en los suelos del municipio de Alcalá, porque según afirma Lal (2004b) una de las estrategias viables para disminuir las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, es el incremento de la densidad del carbono orgánico del suelo, mejorando la distribución en la profundidad del perfil y estabilizarlo encapsulándolo dentro de los microagregados, de manera que el C esté protegido de los procesos microbiales y se convierta en C recalcitrante con largos tiempos de retorno.

La evaluación del carbono y el nitrógeno del suelo en el municipio de Alcalá, demostró que estos dos elementos están altamente relacionados con los usos y coberturas vegetales del terreno presentes en el momento de realizar los muestreos y aquellos establecidos en el mismo lugar en tiempos anteriores. Por lo tanto, se destaca la importancia de complementar estos estudios con el conocimiento de la historia de los usos y la utilización de isótopos estables que permitan determinar la procedencia del C y N. Además, se encontró que la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero facilitó el contraste entre la capacidad de captura del suelo y el potencial de generación de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, permitiendo la identificación de usos como pastizal que a pesar de almacenar cantidades considerables de C y N en la capa superficial del suelo es uno de los responsables del aumento en las concentraciones de estos gases en la atmósfera (Figura 28).

El trabajo permitió demostrar que cuando se realizan evaluaciones de carbono y nitrógeno en el suelo a nivel de paisaje, es necesario el trabajo con las comunidades de la zona de estudio (en este caso 48 familias), con el fin de aprovechar los saberes locales para documentar la historia de los usos del terreno y construir las cronosecuencias de los sitios de muestreo, que finalmente son las que permiten complementar los análisis de laboratorio con isótopos estables de C y N y determinar la procedencia de estos dos elementos en el suelo. Lo anterior es sustentado también por la FAO (2002) al plantear que la información sobre el uso del terreno es de gran importancia para determinar las existencias de carbono en el suelo, porque mientras los factores edáficos y climáticos son importantes para explicar el almacenamiento o los reservorios en largos períodos, los cambios de vegetación o en el uso determinan los cambios en períodos más cortos; y regularmente lo que se encuentra es que en la mayor parte de los perfiles de suelos disponibles, la historia de uso no ha sido documentada.

Odum y Odum (2003) afirman que la Ecotecnología es el estudio y la práctica de la adaptación de las tecnologías ambientales al autodiseño de los ecosistemas, con el fin de obtener el máximo rendimiento a partir de los procesos de autorregulación de la naturaleza que hacen que estos autodiseños requieran poca energía, sean menos costosos y por consiguiente sostenibles. De acuerdo con los resultados encontrados, cafetal variedad Colombia podría ser considerado un uso del terreno apropiado para la prestación de servicios ambientales como la captura de carbono y nitrógeno, y la disminución de emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, pero esto va en contravía de los principios de la Ecotecnología, debido a que la condición de monocultivo lo convierte en un sistema en el que los procesos de autorregulación no son efectivos, razón por la cual requiere de la intervención constante del ser humano por medio de prácticas de manejo como fertilización, fumigación, zoca y eliminación de arvenses. Estas prácticas representan costos monetarios y energéticos altos, lo

que en un determinado momento puede afectar la sostenibilidad de este tipo de sistemas, como en el caso del municipio de Alcalá en el que muchos productores de café han debido dedicarse a la producción de otras especies vegetales como el plátano, porque sus ingresos económicos no le permiten la adquisición de insumos químicos y la contratación de mano de obra para el desarrollo de cultivos de variedades de café mejoradas genéticamente.



**Figura 28.** Tendencias encontradas en los almacenamientos de C y N y las emisiones de gases de efecto invernadero en el suelo.

En el municipio de Alcalá se encontró que usos con mayor grado de conservación como los relictos de selva presentaron menores almacenamientos de C que otros sitios con usos más intervenidos como los cultivos de café, posiblemente esto se debió a que en sitios con menor intervención antrópica se pueden haber favorecido los procesos de descomposición a partir de la biota del suelo, lo que se reflejó en mayores pérdidas de carbono debido a los procesos de respiración. Al respecto Janzen (2006) afirma que no siempre las ganancias de carbono son buenas y no todas las pérdidas son malas, debido a que el hecho de encontrar suelos con almacenamientos altos de C podría ser catalogado como un servicio ecosistémico, pero se podría estar presentando por la interrupción de procesos ecológicos que en este caso corresponderían a la inhibición de microorganismos en la descomposición de la materia orgánica, de manera que surge el dilema sobre que es más beneficioso la acumulación o el uso del C, teniendo en cuenta que la materia orgánica es el combustible para la maquinaria biológica del suelo encargada de producir los nutrientes para las plantas, de manera que aquí la MO puede llegar a ser más útil en su proceso de descomposición, porque además trae efectos benéficos en las propiedades físicas (estructura del suelo, retención de humedad) y químicas (intercambio iónico, acción buffer) del suelo.

Según Lal (2004b), los depósitos de carbono en el suelo y su dinámica se encuentran estrechamente relacionados con la biota edáfica (principalmente lombrices, termitas, hormigas y larvas de algunos insectos), la cual es considerada un factor de gran influencia en las propiedades físicas y biológicas del suelo, especialmente en lo relacionado con la estructura, porosidad, aireación, infiltración, drenaje, ciclaje de nutrientes y flujo de materia orgánica. Por lo anterior, se proponen líneas de investigación que integren variables fisicoquímicas y biológicas que permitan explicar mejor los depósitos y flujos de carbono en el perfil del suelo; teniendo en cuenta que con la utilización de métodos multivariados se pueden llegar a encontrar patrones de asociación entre estos dos grupos de variables. También se puede aprovechar que el método de muestreo de Fertilidad Biológica de Suelos Tropicales (FBST) utilizado en este estudio, permite la recolección de macroinvertebrados en las diferentes capas de suelo, indicando que el protocolo de toma de muestras se puede complementar y obtener mayor información que permita explicar la variabilidad de la información.

Pueden surgir nuevos trabajos de investigación en los que se evalúen los contenidos de carbono en la biomasa aérea utilizando ecuaciones alométricas, para complementar los estudios realizados en suelos y poder realizar balances de C a nivel ecosistémico. También se pueden desarrollar análisis de la materia orgánica disuelta en el suelo, cuya dinámica es más compleja y es de gran importancia en el ciclaje de nutrientes, al igual que la evaluación y validación de modelos diseñados específicamente para carbono que por lo regular se han construido con información de zonas templadas y subtropicales.

Por otra parte, el IPCC (1996) afirma que el sector agrícola se caracteriza por presentar grandes diferencias a nivel regional, tanto en las prácticas de gestión como en el ritmo al que sería posible aplicar medidas de mitigación, de manera que para evaluar los cambios en las emisiones y las necesidades de mitigación se requieren análisis detallados del uso del terreno, los sistemas de cultivo y las prácticas de manejo en los agroecosistemas. Por lo anterior se propone una línea de investigación en cambio climático para la maestría en Ecotecnología de la Universidad Tecnológica de Pereira, con el objetivo de continuar evaluando procesos de autorregulación de los ecosistemas y su relación con la captura de CO<sub>2</sub> y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, de manera que se pueda llegar a la formulación de

propuestas que desde lo local y lo regional permitan mitigar los efectos de una problemática que tiene un impacto a nivel global.

## 5. CONCLUSIONES

- Los almacenamientos de carbono y nitrógeno en el suelo varían de acuerdo con la altura sobre el nivel del mar, y en el caso de Alcalá se encontró que las mayores cantidades estuvieron en la zona alta del municipio correspondiente al rango altitudinal 1450-1600 m.
- El carbono y el nitrógeno fluctúan entre las profundidades del suelo, con usos del terreno como pastizal que almacenan la mayor cantidad de estos elementos en la capa superficial (0-10 cm), mientras que el cafetal variedad Colombia los distribuye a través de la totalidad del perfil.
- La abundancia natural de  $^{13}\text{C}$  permitió demostrar que los depósitos de carbono y nitrógeno en el suelo no solo dependen del uso y la cobertura vegetal actual, también tienen alta influencia de usos que establecidos con anterioridad y que han fijado estos dos elementos en el suelo.
- Los relictos de selva poseen una alta capacidad para la estabilización del carbono en el suelo, mostrando que en un periodo de 13 años pudieron sustituir más del 70% del C que había sido fijado por pastizales durante 60 años.
- Los pastizales fueron los que más contribuyeron con la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, siendo el único uso que presentó emisiones de metano y obtuvo los mayores valores para las emisiones de óxido nitroso. Por el contrario, usos y coberturas como cafetal variedad Colombia, relicto de selva y gradual consumieron metano durante los ocho meses en los que se realizó el estudio.
- En la distribución espacial del carbono almacenado en la capa de suelo 0-30 cm se encontró la existencia de dependencia espacial en algunas de las grillas, pero con rangos que estuvieron dentro de las distancias de muestreo utilizadas, de manera que la metodología de grillas con 16 puntos cada 200 m, es apropiada para realizar evaluaciones de carbono edáfico a nivel de paisaje.
- Cafetal variedad Colombia a pesar de tener los mayores almacenamientos en la totalidad del perfil y los mayores consumos de  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$ , no fue considerado un uso apropiado para la prestación de servicios ambientales relacionados con el ciclaje de nutrientes, porque va en contravía de los principios de la Ecotecnología debido a que la condición de monocultivo lo convierte en un sistema en el que los procesos de autorregulación no son efectivos, requiriendo la intervención constante del ser humano por medio de prácticas de manejo como fertilización, fumigación, zoca y eliminación de arvenses; las cuales representan costos monetarios y energéticos altos.
- Los suelos del municipio de Alcalá poseen alto potencial para la prestación de servicios ambientales relacionados con la captura de  $\text{CO}_2$ , porque al comparar los resultados con los de otros estudios del neo y paleotrópico se encontró que los almacenamientos de carbono en el suelo fueron notablemente superiores.

## 6. RECOMENDACIONES

- Es necesaria la construcción de la línea base nacional de almacenamiento de carbono y nitrógeno en el suelo, con la que ya cuentan algunos países y les ha permitido la construcción y validación de modelos utilizando toda la información depositada en esta base de datos, permitiendo así realizar predicciones a futuro de lo que puede ocurrir con la captura de C y N de acuerdo con las características climáticas, fisiográficas y de usos y coberturas vegetales del terreno de un determinado territorio.
- La utilización de herramientas geoestadísticas debe convertirse en un instrumento de apoyo para la realización de investigaciones relacionadas con propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, porque además de identificar dependencias espaciales entre los sitios de muestreo, permite visualizar patrones de distribución que en un determinado momento se podrían utilizar para realizar zonificaciones del terreno.
- Las instituciones encargadas del diseño de políticas relacionadas con el cambio climático, deberían asignar mayor importancia a la captura de carbono en el suelo, ya que a diferencia del C fijado en la biomasa aérea, el que se deposita en la parte subterránea es más estable (recalcitrante), lo que puede asegurar un mayor tiempo de retención y una mitigación de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>.
- Para la evaluación del carbono y el nitrógeno edáficos en zonas con paisajes heterogéneos, es de gran importancia la utilización de métodos de muestreo que abarquen áreas considerables, en las que se puedan apreciar los diversos patrones de uso y cobertura del terreno y la forma como éstos inciden en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M., Etchevers, J., Monreal, C., Quednow, K., Hidalgo, C., 2001. Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) en sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. En: Gayoso, J., Jandl, R. Memorias Simposio Internacional “Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales”. IUFRO World Series Vol 13, 9-18. Chile.
- Albrecht A, Kandji ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99, 15–27.
- Alcaldía Municipal de Alcalá, 2003. Esquema de Ordenamiento Territorial-Diagnóstico año 2003-2011. Secretaría de Planeación. Alcalá, Valle del Cauca.
- Ahlgrimm, H.J., 1996. Contribution of agriculture to emissions of climatically relevant trace gases-possibilities for abatement? *Plant research and development* 44, 38-60.
- Anderson, J.M., 1992. Responses of soils to climate change. *Advances in ecological research* 22, 163-210.
- Arias, L.M., Hoyos, D.P., 2004. Cuantificación del contenido de carbono en suelos bajo rodales de guadua (*Angustifolia Kunth*) en el eje cafetero de Colombia y estrategias de manejo para su conservación como beneficio ambiental. Trabajo de grado. Administración del Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Aristizabal, J., Guerra, A., Gutiérrez, B., Romero, M., 2002. Estimación de la tasa de fijación de carbono en el sistema agroforestal nogal cafetero (*Cordia alliodora*)–cacao (*Theobroma cacao L*)–plátano (*Musa paradisiaca*). Trabajo de grado. Ingeniería Forestal. Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Universidad Francisco José de Caldas, Bogotá.
- Baer, S.G., Church, J.M., Williard, K.W.J., Groninger, J.W., 2006. Changes in intrasystem N cycling from N<sub>2</sub>-fixing shrub encroachment in grassland: multiple positive feedbacks. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 115, 174-182.
- Boeckx, P., Van Meirvenne, M., Raulo, F., Van Cleemput, O., 2006. Spatial patterns of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  in the urban topsoil of Gent, Belgium. *Organic Geochemistry* 37, 1383-1393.
- Calderón, P.A., Romero, A., 2004. Evaluación de la Relación entre diferentes Usos de la Tierra y la Fauna del Suelo como Herramienta para la Construcción del Diálogo de Saberes en un Área Rural del Municipio de Alcalá. Trabajo de Grado Administración del Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira. 115 p.
- Callo, D., Krishnamurthy, L., Alegre, J., 2001. Cuantificación del Carbono Secuestrado por algunos Sistemas Agrícolas Forestales y Testigos, en tres Pisos Ecológicos de la Amazonía del Perú. En: Gayoso, J. y Jandl, R. Memorias Simposio Internacional “Medición y Monitoreo

de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales”. IUFRO World Series Vol 13. Chile, pp. 19-31.

Cenicafé (Centro Nacional de Investigaciones de Café). 2007. Unidades de suelos. <http://www.cenicafe.org.co>

Chaparro, L.R., Cuervo, M.P., Gómez, J., Toro, M.A., 2001. Emisiones al ambiente en Colombia. En: El medio ambiente en Colombia. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). Leyva, P (Ed). Bogotá, Colombia. <http://www.ideam.gov.co/publica/medioamb/cap13.pdf>

Chhabra, A., Palria, S., Dadhwal, V.K., 2003. Soil organic carbon pool in Indian forests. *Forest Ecology and Management* 173, 187-199.

Cochran, W.G., 1974. Técnicas de muestreo. Cuarta Edición. Continental S.A. México.

Curtis CJ, Emmett BA, Reynolds B, Shilland J. 2006. How important is N<sub>2</sub>O production in removing atmospherically deposited nitrogen from UK moorland catchments? *Soil Biology and Biochemistry* 38, 2081-2091.

CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca), 1997. Estudio general de suelos Zona Andina (Unidades de suelos). Cali, Colombia.

Diekow, J., Mielniczuk, J., Knicker, H., Bayer, C., Dick, D.P., Ko gel-Knabner, I., 2005. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil and Tillage Research* 81, 87–95.

Dignac, M.F., Bahri, H., Rumpel, C., Rasse, D.P., Bardoux, G., Balesdent, J., Girardin C., Chenu, C., Mariotti, A., 2005. Carbon-13 natural abundance as a tool to study the dynamics of lignin monomers in soil: an appraisal at the Closeaux experimental field (France). *Geoderma* 128, 3–17.

Escobar, C.J., Toriatti Dematté, J.L., 1991. Distribución de la materia orgánica y del carbono-13 en un Ultisol del piedemonte amazónico. *Pasturas Tropicales* Vol 13 N°2, 27-30.

Eshetu, Z., 2004. Natural <sup>15</sup>N abundance in soils under young-growth forests in Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 187, 139–147.

Feijoo, A., Camargo, J.C., Zúñiga, M.C., Larrarte, C., Ossa, C.A., 2002. Evaluación de la regeneración natural de árboles y construcción de indicadores de calidad del suelo en sistemas silvopastoriles del Eje Cafetero de Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira.

Feijoo, A., Zúñiga, M.C., Quintero, H., Lavelle, P., 2007. Relaciones entre el uso de la tierra y las comunidades de lombrices en la cuenca del río La Vieja, Colombia. *Pastos y Forrajes* Vol. 30 N° 2.

Gamma Design Software Inc., 2001.

- Ghosh, S., Majumdar, D., Jain, M.C., 2003. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India. *Chemosphere* 51, 181-195.
- Glenday, J., 2006. Carbon storage and emissions offset potential in an East African tropical rainforest. *Forest Ecology and Management* 235, 72–83.
- Gregorich, E.G., Hopkins, D.W., Elberling, B., Sparrow, A.D., Novis, P., Greenfield L.G., Rochette, P., 2006. Emission of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from lakeshore soils in an Antarctic dry valley. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 3120-3129.
- Hoyos, N., Comerford, N.B., 2005. Land use and landscape effects on aggregate stability and total carbon of Andisols from the Colombian Andes. *Geoderma* 129, 268– 278.
- Huang, Y., Wang, H., Huang, H., Feng, Z.W., Yang, Z.H., Luo, Y.C., 2005. Characteristics of methane emission from wetland rice-duck complex ecosystem. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 181-193.
- Hurtado, E., Navarro, G.A., 2006. Evaluación de la captura de carbono en sistemas de producción en algunas fincas del municipio de Alcalá. Proyecto de grado. Ingeniería Ambiental. Universidad Libre de Pereira.
- Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, Purnomo E , Tsuruta H. 2003. Seasonal changes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan. *Chemosphere* 52, 603–608.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático). 1996. Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático. Documento técnico I del IPCC.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre Cambio Climático). 1997. Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC. Documento técnico II del IPCC
- Janzen, H.H., 2006. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry* 38, 419-424.
- Jiménez, J.J., Lal, R., Leblanc, H.A., Russo, R.O., 2007. Soil organic carbon pool under native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 241, 134-144.
- Jones, C., Jacobsen J., 2005. Nitrogen in soil and fertilizers. Nitrogen Cycling, Testing and Fertilizer Recommendations. Nutrient Management Module No. 3. Montana State University.
- Jung, K., Stelzenmüller, V., Zauke, G.P., 2006. Spatial distribution of heavy metal concentrations and biomass indices in *Cerastoderma edule* Linnaeus (1758) from the German Wadden Sea: An integrated biomonitoring approach. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 338, 81–95.

- Khalil, M.I., Baggs, E.M., 2005. CH<sub>4</sub> oxidation and N<sub>2</sub>O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH<sub>4</sub> concentrations. *Soil Biology and Biochemistry* 37, 1785–1794.
- Kamman, C., Grünhage, L., Jäger, H.-J., Wachinger, G., 2001. Methane fluxes from differentially managed grassland study plots: the important role of CH<sub>4</sub> oxidation in grassland with a high potential for CH<sub>4</sub> production. *Environmental Pollution* 115, 261-273.
- Kiese, R., Butterbach-Bahl, H., 2002. N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions from three different tropical forest sites in the wet tropics of Queensland, Australia. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 975-987.
- Lal, R. 2004a. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* Vol 304 N° 5677, 1623-1626.
- Lal, R. 2004b. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123, 1-22.
- Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J., 2005. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics and altitude. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 255-266.
- Lemenih, M., Karlton, E., Olsson, M., 2005. Soil organic matter dynamics after deforestation along a farm field chronosequence in southern highlands of Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109, 9–19.
- Liu, D., Wang, Z., Zhang, B., Song, K., Li, X., Li, J., Li, F., Duan, H., 2006. Spatial distribution of soil organic carbon and analysis of related factors in croplands of the black soil region, Northeast China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113, 73–81.
- López-Ulloa, M., Veldkamp, E., de Koning, G.H.J., 2005. Soil carbon stabilization in converted tropical pastures and forests depends on soil type. *Soil Science Society of America Journal* 69, 4, 1110-1117.
- Manfrinato, W., Piccolo, M.C., Cerri, C.C., Bernoux, M., Pellegrino, C.E., 2001. Medición de la variabilidad espacial y temporal del carbono del suelo con el uso de isótopos estables, en una transición bosque-pradera en el estado de Paraná, Brasil. Simposio internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.
- Michelsen, A., Anderson, M., Jensen, M., Kjøller, A., Gashew, M., 2004. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland, woodland and forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 1707-1717.
- Montagnini, F., Nair, P.K.R., 2004. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61, 281-295.
- Muñoz, J.D., Martínez, L.J., Giraldo, R., 2006. Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana* 24 (2), 355-366.

- Odum, H.T., Odum, B., 2003. Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering* 20, 339-361.
- Oelbermann, M., Voroney, R.P., 2007. Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. *Ecological Engineering* 29, 342-349.
- Paul, E.A., Collins, H.P., Leavitt, S.W., 2001. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring  $^{14}\text{C}$  abundance. *Geoderma* 104, 239-256.
- Powers, J.S., Schlesinger, W.H., 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica. *Geoderma* 109, 165-190.
- Rao, I.M., Ayarza, M.A., Thomas, R.J., 1994. The use of carbon isotope ratios to evaluate legume contribution to soil enhancement in tropical pastures. *Plant and soil* 162, 177-182.
- Roscoe, R., Buurman, P., Velthorst, E.J., Vasconcellos, C.A., 2001. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. *Geoderma* 104, 185-202.
- Saggar, S., Hedley, C.B., Giltrap, D.L., Lambie, S.M., 2007. Measured and modelled estimates of nitrous oxide emission and methane consumption from a sheep-grazed pasture. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122, 357-365.
- Saynes V, Hidalgo C, Etchevers JD, Campo JE. 2005. Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology* 29, 282-289.
- Schöning, I., Totsche, K.U., Kögel-Knabner, I., 2006. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. *Geoderma* 136, 631-642.
- Small, C.J., McCarthy, B.C., 2005. Relationship of understory diversity to soil nitrogen, topographic variation, and stand age in an eastern oak forest, USA. *Forest Ecology and Management* 217, 229-243.
- SPSS (Statistical Product and Service Solution) Inc., 1999.
- Stevenson, F.J., 1994. *Humus Chemistry Genesis, Composition, Reactions*. New York, USA, pp. 8-9.
- Tan, Z., Lal, R., 2005. Carbon sequestration potential estimates with changes in land use and tillage practice in Ohio, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 111, 140-152.
- Tschakert, P., Coomes, O.T., Potvin, C., 2006. Indigenous livelihoods, slash-and-burn agriculture, and carbon stocks in Eastern Panama. *Ecological Economics* 60, 807-820.

Veldkamp, E., Weitz, A.M., Keller, M., 2001. Management effects on methane fluxes in humid tropical pasture soils. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 1493-1499.

Watzka, M., Buchgraber, K., Wanek, W., 2005. Natural  $^{15}\text{N}$  abundance of plants and soils under different management practices in a montane grassland. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1564-1576.

Weitz AM, Linder E, Frohling S, Crill PM, Keller M. 2001.  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 1077-1093.

Young, A., 2002. *Agroforestry for Soil Management*. CAB International Centre for Research in Agroforestry. Norwich, UK, 320 p.

Zhang, C., McGrath, D., 2004. Geochemical and GIS analyses on soil organic carbon concentrations in grassland of southeastern Ireland from two different periods. *Geoderma* 119, 261-275.

Zinn, Y.L., Lal, R., Resck, D., 2005. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Tillage and Research* 84, 28-40.

Zúniga, M., Quintero, H., Feijoo, A., 2003. Trayectoria de los sistemas campesinos de cría en un área del piedemonte de Alcalá, Valle del Cauca. *Scientia et Technica Año IX Vol. 23*, 117-122.

## ANEXOS

### Anexo 1. Resultados de los análisis estadísticos obtenidos con cada programa utilizado

a) Análisis de varianza no paramétrico: prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes (SPSS versión 10.0)

Las abreviaciones de las variables utilizadas fueron; DA: densidad aparente, STC: almacenamiento total de carbono, STN: almacenamiento total de nitrógeno, C\_N: relación C:N, POR\_C: porcentaje de carbono, POR\_N: porcentaje de nitrógeno, C\_MANT: porcentaje de carbono en el mantillo, C13: abundancia natural de <sup>13</sup>C, N15: abundancia natural de <sup>15</sup>N. Las abreviaciones acompañadas por un número indican la profundidad del muestreo en cm.

- Comparación entre zonas (estratos) para todas las variables

Estadísticos de contraste <sup>a,b</sup>

|               | DA_10  | DA_20  | DA_30  | STC_10 | STC_20 | STC_30 | STN_10 | STN_20 | STN_30 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Chi-cuadrado  | 63.847 | 63.281 | 55.856 | 36.617 | 40.138 | 35.940 | 30.907 | 31.326 | 27.001 |
| gl            | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      |
| Sig. asintót. | .000   | .000   | .000   | .000   | .000   | .000   | .000   | .000   | .000   |

<sup>a</sup>. Prueba de Kruskal-Wallis

<sup>b</sup>. Variable de agrupación: ESTRATO

Estadísticos de contraste <sup>a,b</sup>

|               | C_N_10 | C_N_20 | C_N_30 | C_MANT | POR_C_10 | POR_C_20 | POR_C_30 | POR_N_10 | POR_N_20 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Chi-cuadrado  | 20.695 | 31.818 | 20.281 | 31.347 | 64.497   | 63.511   | 60.558   | 61.052   | 58.154   |
| gl            | 2      | 2      | 2      | 2      | 2        | 2        | 2        | 2        | 2        |
| Sig. asintót. | .000   | .000   | .000   | .000   | .000     | .000     | .000     | .000     | .000     |

<sup>a</sup>. Prueba de Kruskal-Wallis

<sup>b</sup>. Variable de agrupación: ESTRATO

Estadísticos de contraste <sup>a,b</sup>

|               | POR_N_30 | C13_10 | C13_20 | C13_30 | N15_10 | N15_20 | N15_30 |
|---------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Chi-cuadrado  | 54.710   | 4.132  | 1.823  | 3.965  | 54.910 | 57.948 | 62.034 |
| gl            | 2        | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      |
| Sig. asintót. | .000     | .127   | .402   | .138   | .000   | .000   | .000   |

<sup>a</sup>. Prueba de Kruskal-Wallis

<sup>b</sup>. Variable de agrupación: ESTRATO

- Comparación entre profundidades de cada zona de muestreo

Zona alta

Estadísticos de contraste<sup>a,b</sup>

|               | DA     | STC   | STN    | C_N   | POR_C  | POR_N  | C13   | N15   |
|---------------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Chi-cuadrado  | 15.664 | 7.703 | 12.397 | 9.631 | 24.662 | 29.547 | 5.973 | 9.760 |
| gl            | 2      | 2     | 2      | 2     | 2      | 2      | 2     | 2     |
| Sig. asintót. | .000   | .021  | .002   | .008  | .000   | .000   | .050  | .008  |

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: PROFUND

Zona media

Estadísticos de contraste<sup>a,b</sup>

|               | DA   | STC    | STN    | C_N   | POR_C  | POR_N  | C13    | N15    |
|---------------|------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| Chi-cuadrado  | .139 | 17.581 | 23.087 | 5.875 | 15.349 | 21.018 | 16.589 | 16.755 |
| gl            | 2    | 2      | 2      | 2     | 2      | 2      | 2      | 2      |
| Sig. asintót. | .933 | .000   | .000   | .053  | .000   | .000   | .000   | .000   |

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: PROFUND

Zona baja

Estadísticos de contraste<sup>a,b</sup>

|               | DA    | STC    | STN    | C_N   | POR_C  | POR_N  | C13   | N15   |
|---------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| Chi-cuadrado  | 1.425 | 11.465 | 11.729 | 6.542 | 13.163 | 14.278 | 2.401 | 6.923 |
| gl            | 2     | 2      | 2      | 2     | 2      | 2      | 2     | 2     |
| Sig. asintót. | .490  | .003   | .003   | .038  | .001   | .001   | .301  | .031  |

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: PROFUND

Análisis de componentes principales (ADE4, SPSS versión 10.0)

Zona alta (profundidad 0-10 cm)

```

Total inercia:          9
-----
Num. Eigenval.  R.Iner.  R.Sum  | Num. Eigenval.  R.Iner.  R.Sum  |
01  +3.9763E+00 +0.4418 +0.4418 | 02  +1.7002E+00 +0.1889 +0.6307 |
03  +1.2301E+00 +0.1367 +0.7674 | 04  +9.8108E-01 +0.1090 +0.8764 |
05  +6.1055E-01 +0.0678 +0.9442 | 06  +4.8895E-01 +0.0543 +0.9986 |
07  +1.0175E-02 +0.0011 +0.9997 | 08  +2.3068E-03 +0.0003 +1.0000 |
09  +3.9114E-04 +0.0000 +1.0000
  
```

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |       |
|----------|------------|-------|
|          | 1          | 2     |
| DA_10    | .172       | .906  |
| STC_10   | .904       | .316  |
| STN_10   | .933       | .341  |
| C_N_10   | -.292      | -.176 |
| C_MANT   | .182       | -.535 |
| POR_C_10 | .912       | -.281 |
| POR_N_10 | .942       | -.234 |
| C13_10   | -.560      | .169  |
| N15_10   | -.330      | .429  |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona alta (profundidad 10-20 cm)

| Total inercia: |             | 8       |         |      |             |         |         |
|----------------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| Num.           | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
| 01             | +3.8130E+00 | +0.4766 | +0.4766 | 02   | +1.4752E+00 | +0.1844 | +0.6610 |
| 03             | +1.2039E+00 | +0.1505 | +0.8115 | 04   | +8.2510E-01 | +0.1031 | +0.9146 |
| 05             | +6.6969E-01 | +0.0837 | +0.9984 | 06   | +8.2025E-03 | +0.0010 | +0.9994 |
| 07             | +4.4438E-03 | +0.0006 | +0.9999 | 08   | +4.7054E-04 | +0.0000 | +1.0000 |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |       |
|----------|------------|-------|
|          | 1          | 2     |
| DA_20    | .141       | .825  |
| STC_20   | .936       | .162  |
| STN_20   | .954       | .286  |
| C_N_20   | -.153      | -.433 |
| POR_C_20 | .925       | -.276 |
| POR_N_20 | .950       | -.113 |
| C13_20   | -.453      | .367  |
| N15_20   | -.145      | .525  |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona alta (profundidad 20-30 cm)

| Total inercia: |             | 8       |         |      |             |         |         |
|----------------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| Num.           | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
| 01             | +3.7986E+00 | +0.4748 | +0.4748 | 02   | +1.5797E+00 | +0.1975 | +0.6723 |
| 03             | +1.3690E+00 | +0.1711 | +0.8434 | 04   | +7.3540E-01 | +0.0919 | +0.9353 |
| 05             | +5.0135E-01 | +0.0627 | +0.9980 | 06   | +1.2476E-02 | +0.0016 | +0.9996 |
| 07             | +2.7988E-03 | +0.0003 | +0.9999 | 08   | +6.6790E-04 | +0.0001 | +1.0000 |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_30    | .161       | -.649     |
| STC_30   | .905       | 5.131E-02 |
| STN_30   | .966       | -.136     |
| C_N_30   | -.277      | .445      |
| POR_C_30 | .875       | .415      |
| POR_N_30 | .931       | .195      |
| C13_30   | -.556      | .483      |
| N15_30   | -5.24E-02  | -.704     |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona media (profundidad 0-10 cm)

|                |             |         |         |      |             |         |         |
|----------------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| Total inercia: |             |         | 9       |      |             |         |         |
| -----          |             |         |         |      |             |         |         |
| Num.           | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
| 01             | +4.9373E+00 | +0.5486 | +0.5486 | 02   | +1.7301E+00 | +0.1922 | +0.7408 |
| 03             | +1.1897E+00 | +0.1322 | +0.8730 | 04   | +5.4510E-01 | +0.0606 | +0.9336 |
| 05             | +2.9513E-01 | +0.0328 | +0.9664 | 06   | +2.6230E-01 | +0.0291 | +0.9955 |
| 07             | +3.8917E-02 | +0.0043 | +0.9998 | 08   | +1.3379E-03 | +0.0001 | +1.0000 |
| 09             | +9.2227E-05 | +0.0000 | +1.0000 |      |             |         |         |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_10    | -.681      | .547      |
| STC_10   | .853       | .398      |
| STN_10   | .804       | .513      |
| C_N_10   | .418       | -.736     |
| C_MANT   | .506       | -.133     |
| POR_C_10 | .980       | 8.173E-02 |
| POR_N_10 | .968       | .189      |
| C13_10   | -.632      | -.172     |
| N15_10   | -.612      | .614      |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona media (profundidad 10-20 cm)

-----  
 Total inercia: 8  
 -----

| Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
|------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| 01   | +4.4375E+00 | +0.5547 | +0.5547 | 02   | +1.6612E+00 | +0.2077 | +0.7623 |
| 03   | +9.7603E-01 | +0.1220 | +0.8843 | 04   | +6.8434E-01 | +0.0855 | +0.9699 |
| 05   | +2.1097E-01 | +0.0264 | +0.9963 | 06   | +2.3758E-02 | +0.0030 | +0.9992 |
| 07   | +5.8297E-03 | +0.0007 | +0.9999 | 08   | +4.0362E-04 | +0.0000 | +1.0000 |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_20    | -.307      | .806      |
| STC_20   | .888       | .391      |
| STN_20   | .823       | .562      |
| C_N_20   | .203       | -.585     |
| POR_C_20 | .972       | -6.99E-02 |
| POR_N_20 | .949       | 5.733E-02 |
| C13_20   | -.529      | .300      |
| N15_20   | -.843      | .322      |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona media (profundidad 20-30 cm)

-----  
 Total inercia: 8  
 -----

| Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
|------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| 01   | +4.1605E+00 | +0.5201 | +0.5201 | 02   | +2.0062E+00 | +0.2508 | +0.7708 |
| 03   | +9.3825E-01 | +0.1173 | +0.8881 | 04   | +6.5980E-01 | +0.0825 | +0.9706 |
| 05   | +2.0315E-01 | +0.0254 | +0.9960 | 06   | +2.6660E-02 | +0.0033 | +0.9993 |
| 07   | +4.9186E-03 | +0.0006 | +0.9999 | 08   | +4.9925E-04 | +0.0001 | +1.0000 |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_30    | -.299      | .874      |
| STC_30   | .851       | .451      |
| STN_30   | .709       | .698      |
| C_N_30   | .289       | -.657     |
| POR_C_30 | .969       | -.197     |
| POR_N_30 | .962       | 3.552E-03 |
| C13_30   | -.416      | -6.87E-03 |
| N15_30   | -.851      | .286      |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona baja (profundidad 0-10 cm)

```

-----
Total inercia:          9
-----

```

| Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
|------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| 01   | +4.2218E+00 | +0.4691 | +0.4691 | 02   | +1.5130E+00 | +0.1681 | +0.6372 |
| 03   | +1.3332E+00 | +0.1481 | +0.7853 | 04   | +1.0274E+00 | +0.1142 | +0.8995 |
| 05   | +5.6110E-01 | +0.0623 | +0.9618 | 06   | +3.2753E-01 | +0.0364 | +0.9982 |
| 07   | +1.2987E-02 | +0.0014 | +0.9997 | 08   | +2.5596E-03 | +0.0003 | +1.0000 |
| 09   | +4.4216E-04 | +0.0000 | +1.0000 |      |             |         |         |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_10    | -2.13E-02  | .503      |
| STC_10   | .930       | 1.536E-02 |
| STN_10   | .941       | .159      |
| C_N_10   | -.178      | -.390     |
| C_MANT   | -.390      | -.714     |
| POR_C_10 | .948       | -.236     |
| POR_N_10 | .945       | -.101     |
| C13_10   | .203       | .560      |
| N15_10   | -.674      | .439      |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona baja (profundidad 10-20 cm)

```

-----
Total inercia:          8
-----

```

| Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
|------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| 01   | +4.3409E+00 | +0.5426 | +0.5426 | 02   | +1.6076E+00 | +0.2010 | +0.7436 |
| 03   | +9.7540E-01 | +0.1219 | +0.8655 | 04   | +6.6049E-01 | +0.0826 | +0.9481 |
| 05   | +3.8794E-01 | +0.0485 | +0.9965 | 06   | +1.5180E-02 | +0.0019 | +0.9984 |
| 07   | +1.2117E-02 | +0.0015 | +1.0000 | 08   | +3.2635E-04 | +0.0000 | +1.0000 |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_20    | .269       | .503      |
| STC_20   | .978       | .135      |
| STN_20   | .986       | -1.97E-02 |
| C_N_20   | -.154      | .821      |
| POR_C_20 | .978       | -2.56E-02 |
| POR_N_20 | .962       | -.197     |
| C13_20   | -.422      | .506      |
| N15_20   | -.507      | -.605     |

Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

Zona baja (profundidad 20-30 cm)

| Total inercia: 8 |             |         |         |      |             |         |         |
|------------------|-------------|---------|---------|------|-------------|---------|---------|
| Num.             | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   | Num. | Eigenval.   | R.Iner. | R.Sum   |
| 01               | +4.6815E+00 | +0.5852 | +0.5852 | 02   | +1.4045E+00 | +0.1756 | +0.7608 |
| 03               | +9.5297E-01 | +0.1191 | +0.8799 | 04   | +5.5567E-01 | +0.0695 | +0.9493 |
| 05               | +3.9664E-01 | +0.0496 | +0.9989 | 06   | +7.6709E-03 | +0.0010 | +0.9999 |
| 07               | +9.1466E-04 | +0.0001 | +1.0000 | 08   | +8.1539E-05 | +0.0000 | +1.0000 |

**Matriz de componentes<sup>a</sup>**

|          | Componente |           |
|----------|------------|-----------|
|          | 1          | 2         |
| DA_30    | .246       | .823      |
| STC_30   | .976       | .116      |
| STN_30   | .970       | .184      |
| C_N_30   | -3.51E-02  | -.581     |
| POR_C_30 | .983       | -.115     |
| POR_N_30 | .984       | -2.70E-02 |
| C13_30   | -.422      | .541      |
| N15_30   | -.783      | .188      |

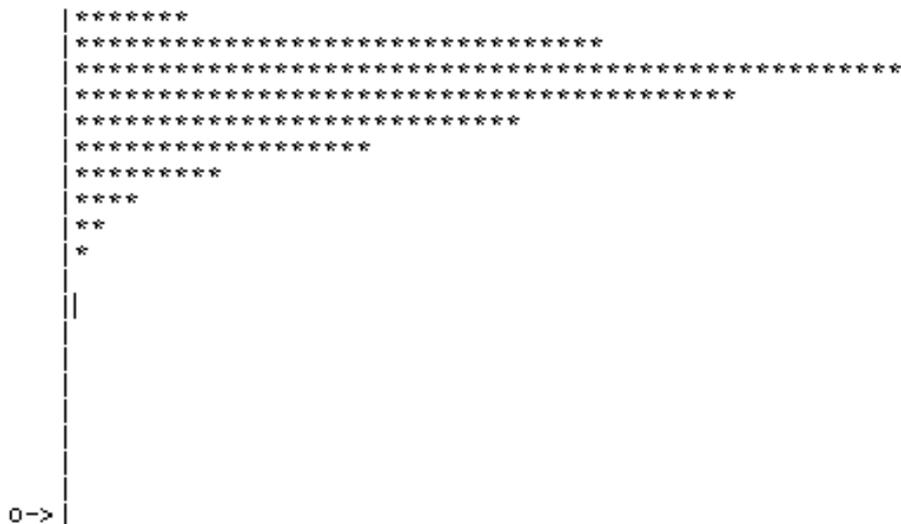
Método de extracción: Análisis de componentes principales.

a. 2 componentes extraídos

**Análisis discriminante para validar los agrupamientos (ADE4)**

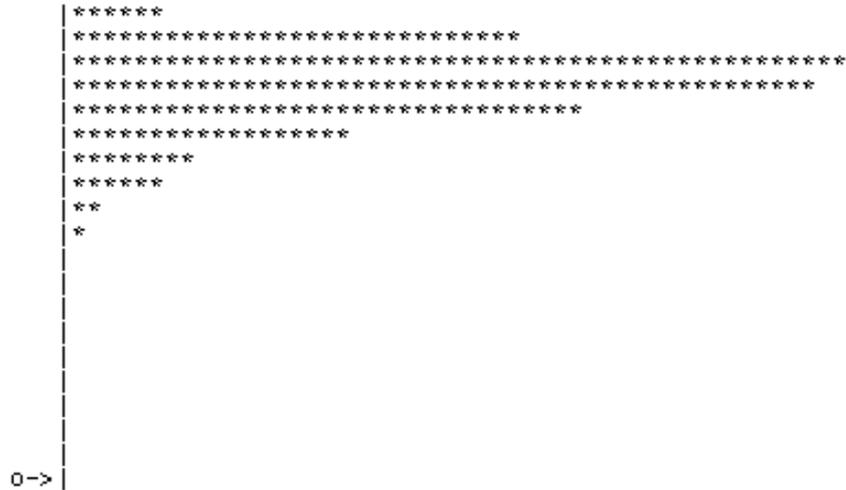
Zona alta (profundidad 0-10 cm)

number of random matching: 1000 Observed: 4.802862  
 Histogramm: minimum = 0.396417, maximum = 4.802862  
 number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
 number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)



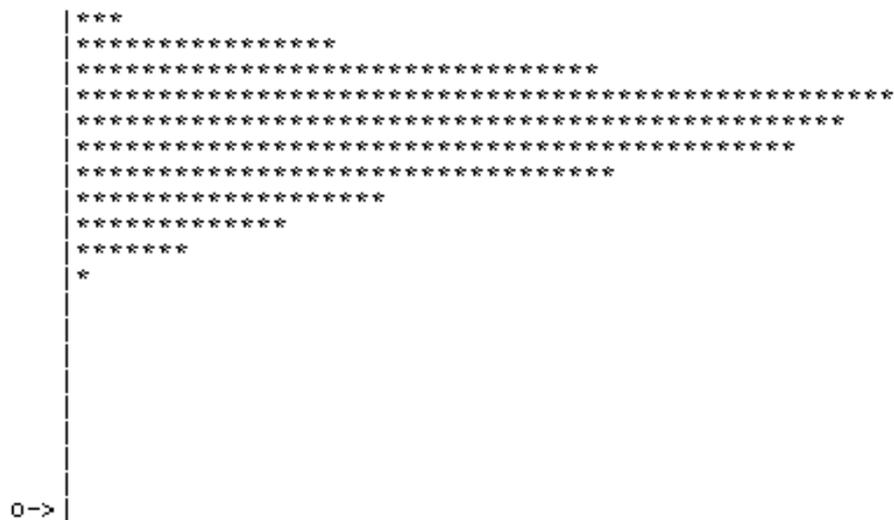
Zona alta (profundidad 10-20 cm)

number of random matching: 1000 Observed: 5.118755  
Histogramm: minimum = 0.461875, maximum = 5.118755  
number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)



Zona alta (profundidad 20-30 cm)

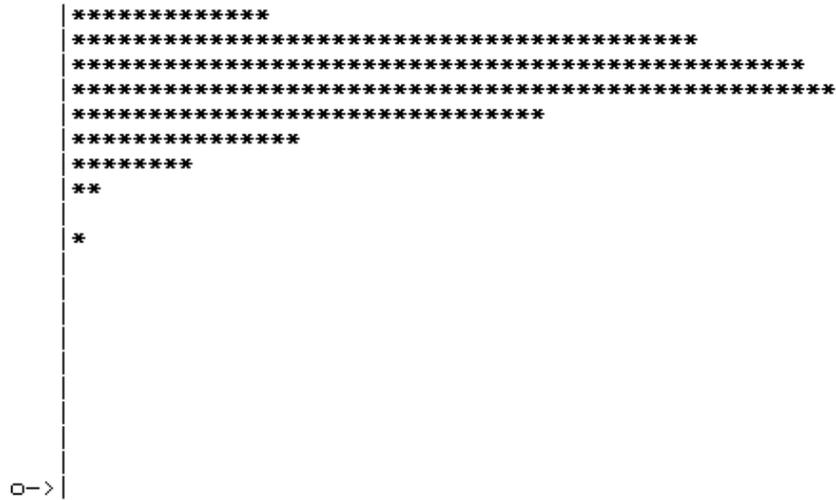
number of random matching: 1000 Observed: 5.433972  
Histogramm: minimum = 0.663708, maximum = 5.433972  
number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)





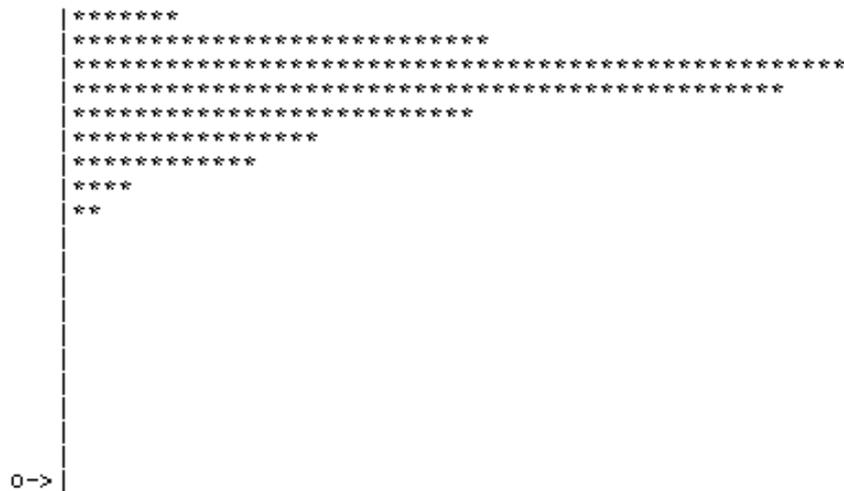
### Zona media (profundidad 20-30 cm)

number of random matching: 1000 Observed: 5.115689  
Histogramm: minimum = 0.270970, maximum = 5.115689  
number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)



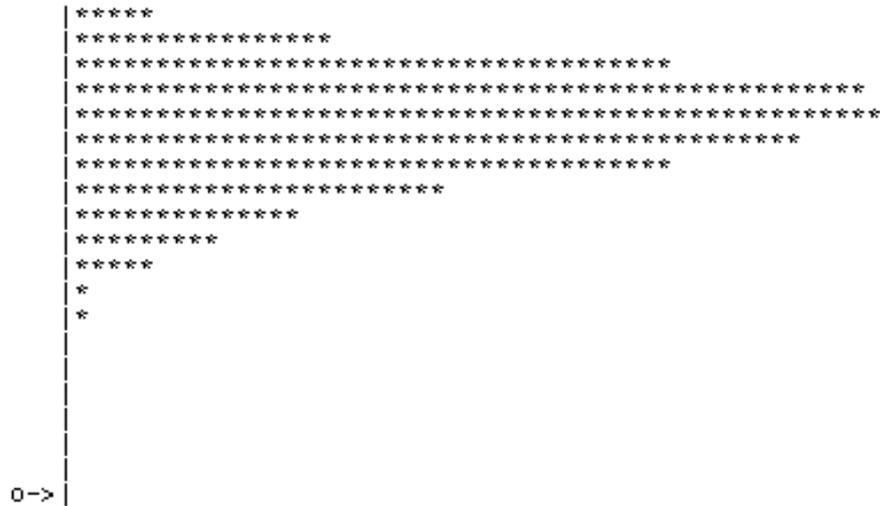
### Zona baja (profundidad 0-10 cm)

number of random matching: 1000 Observed: 4.991283  
Histogramm: minimum = 0.346013, maximum = 4.991283  
number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)



Zona baja (profundidad 10-20 cm)

-----  
number of random matching: 1000 Observed: 5.985281  
Histogramm: minimum = 0.781422, maximum = 5.985281  
number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)



Zona baja (profundidad 20-30 cm)

number of random matching: 1000 Observed: 6.481133  
Histogramm: minimum = 0.852396, maximum = 6.481133  
number of simulation X<Obs: 1000 (frequency: 1.000000)  
number of simulation X>=Obs: 0 (frequency: 0.000000)



## Anexo 2. Descripción de cada sitio de muestreo de carbono y nitrógeno del suelo

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m) | Uso anterior | Manejo                     |  |          |                     |                |                                    |   |
|----------------|-----------|----------------------|--------------|----------------------------|--|----------|---------------------|----------------|------------------------------------|---|
|                |           |                      |              | Fertilización              |  |          | Fumigación          |                |                                    | Otras prácticas   |
| Producto       | Cantidad  | Frec (vez/año)       | Producto     | Cantidad                   | Frec (vez/año)   | Producto | Cantidad            | Frec (vez/año) |                                    |   |
| Alta           |           |                      |              |                            |  |          |                     |                |                                    |   |
| Rs1            | 13        | -                    | Pa           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | -   |
| Rs2            | 13        | -                    | Pa           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | -   |
| Rs3            | 13        | -                    | Pa           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | -   |
| Rs4            | 13        | -                    | Pa           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | -   |
| Gu5            | >80       | -                    | Gu           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | -   |
| Cv6            | 12        | 1.5x1.2              | Cs           | 25-4-24*                   | 80 g/planta  | 2        | Thionil*            | 11/2001        | 1                                  | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año |
| Cv7            | 13        | 1.5x1.2              | Cs           | Úrea*, cloruro de potasio* | Recomendada según análisis de suelos cada cuatro meses | 3        |                     |                |                                    | Zoca cada cuatro años, limpiezas tres veces/año               |
| Cy8            | 27        | 1.5x1.5              | Cs           | Mezcla (úrea* y 15-15-15*) | 90 g/planta  | 3        | Oxicloruro de cobre | No específica  | Épocas con alta presencia de broca | Zoca cada cinco años, eliminación de arvenses dos veces/año   |
| Ba9            | 1         | -                    | Ca           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | -   |
| Cs10           | 57        | 3.2x2.4              | Rs           | -                          | -  | -        | -                   | -              | -                                  | No se hace zoca, eliminación de arvenses una vez/año          |
| Cv11           | 12        | 1.5x1.2              | Cs           | 25-4-24*                   | 80 g/planta  | 2        | Thionil*            | 11/2001        | 1                                  | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año |
| Cv12           | 12        | 1.5x1.2              | Cs           | 25-4-24*                   | 80 g/planta  | 2        | Thionil*            | 11/2001        | 1                                  | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m)      | Uso anterior | Manejo  |                  |                |              |               |                                    |  |
|----------------|-----------|---------------------------|--------------|---|------------------|----------------|--------------|---------------|------------------------------------|--|
|                |           |                           |              | Fertilización   |                  |                | Fumigación   |               |                                    | Otras prácticas  |
|                |           |                           |              | Producto  | Cantidad         | Frec (vez/año) | Producto     | Cantidad      | Frec (vez/año)                     |  |
| Pl13           | 37        | 6x6                       | Cs           | 15-15-15  | 200-300 g/planta | 3              | -            | -             | -                                  | años, eliminación de arvenses tres veces/año<br>Deshojar y destroncar tres veces/año       |
| Cv14           | 12        | 2x1.4                     | Cs           | 25-4-24*  | 120 g/planta     | 1              | Alto 100 SL* | 0.002 l/20l   | 1                                  | Zoca cada 5 años, eliminación de arvenses tres veces/año                                   |
| Ca15           | 1         | 1.2x0.6                   | Cv           | Fertilizante foliar (COLJAP desarrollo*)                                | 20 g/20l agua    | 1              | Roundup*     | 1 l/200l      | 2                                  | -  |
|                |           |                           |              | Fertilizante foliar (COLJAP desarrollo*)                                | 1000 g/200l      | 1              |              |               |                                    |  |
| Cv16           | 1         | 1.5x1.3                   | Ca           | 15-15-15*   | 40 g/planta      | 2              | Fentopen*    | No específica | Épocas con alta presencia de broca | Eliminación de arvenses tres veces/año   |
|                |           |                           |              | DAP*  | 40 g/planta      | 2              |              |               |                                    |  |
|                |           |                           |              | Mezcla (DAP*, Agrosolar*, óxido de magnesio, úrea*, cloruro de potasio) | 100 g/planta     | 3              |              |               |                                    |  |
| Rs17           | >50       | -                         | Rs           | -   | -                | -              | -            | -             | -                                  | -  |
| Ba18           | >50       | -                         | Rs           | -   | -                | -              | -            | -             | -                                  | Siembras esporádicas de maíz   |
| Cp19           | 14        | Café: 2x2<br>Plátano: 6x4 | Ba           | 25-4-24*  | 70 g/planta      | 1              | -            | -             | -                                  | -Eliminación de arvenses tres veces/año<br>-Deshojar y destroncar el plátano dos veces/año |
| Pa20           | 7         | -                         | Cs           | -   | -                | -              | -            | -             | -                                  | -  |
| Cp21           | 25        | Café: 5x5                 | Cs           | 15-15-15*   | 100 g/planta     | 2              | -            | -             | -                                  | Zoca cada 5 años,  |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m)                       | Uso anterior | Manejo                              |              |                |            |                  |                |  |
|----------------|-----------|--|--------------|-------------------------------------|--------------|----------------|------------|------------------|----------------|--|
|                |           |  |              | Fertilización                       |              |                | Fumigación |                  |                | Otras prácticas  |
|                |           |  |              | Producto                            | Cantidad     | Frec (vez/año) | Producto   | Cantidad         | Frec (vez/año) |  |
|                |           | Plátano: no específica                     |              |                                     |              |                |            |                  |                | eliminación de arvenses dos veces/año                        |
| Cz22           | 25        | Café: 5x5<br>Plátano y yuca: no específica | Cs           | 15-15-15*                           | 100 g/planta | 2              | -          | -                | -              | Zoca cada 5 años, eliminación de arvenses dos veces/año      |
| Cv23           | 4         | 1.5x1.2                                    | Cs           | Mezcla (cal dolomita*, DAP*, úrea*) | 50 g/planta  | 4              | -          | -                | -              | -  |
| Cv24           | 9         | 1.5x1.2                                    | Cs           | Mezcla (DAP*, úrea*, 15-15-15*)     | 50 g/planta  | 1              | Thiodan*   | 100 g/200l       | 2              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses dos veces/año |
| Cp25           | 5         | Café: 1.5x1.5<br>Plátano: 6x6              | Cv           | 15-15-15*                           | 100 g/planta | 2              | -          | -                | -              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses dos veces/año |
| Gu26           | >50       | -  | Gu           | -                                   | -            | -              | -          | -                | -              | Extracción esporádica de guadua para construcción            |
| Cp27           | 27        | Café: 1.5x1.5<br>Plátano: 10x2.5           | Cs           | 25-4-24*                            | 75 g/planta  | 2              | Roundup*   | 0.15 l/10 l agua | 1              | Zoca cada cinco años   |
| Ba28           | 3         | -  | Cv           | -                                   | -            | -              | -          | -                | -              | -  |
| Pa29           | 4         | -  | Cv           | -                                   | -            | -              | -          | -                | -              | -  |
| Gu30           | 7         | -  | Cs           | -                                   | -            | -              | -          | -                | -              | -  |
| Rs31           | >50       | -  | Rs           | -                                   | -            | -              | -          | -                | -              | -  |
| Cs32           | 24        | -  | Rs           | -                                   | -            | -              | -          | -                | -              | Eliminación de arvenses una vez/año                          |
| Media          |           |  |              |                                     |              |                |            |                  |                |  |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m) | Uso anterior | Manejo  |  |                |            |            |                |  |  |
|----------------|-----------|----------------------|--------------|---|--|----------------|------------|------------|----------------|--|--|
|                |           |                      |              | Fertilización   |  |                | Fumigación |            |                | Otras prácticas  |  |
|                |           |                      |              | Producto  | Cantidad                                       | Frec (vez/año) | Producto   | Cantidad   | Frec (vez/año) |  |  |
| Ba1            | 1         | -                    | Cp           | -   | -  | -              | -          | -          | -              | -  |  |
| Cp2            | >15       | 1.8x1                | Cp           | Mezcla (lombricompost, gallinaza, miel de purga, cal, sulfato de aluminio, levadura y azufre) | 2000 g/planta de café                          | 4              | -          | -          | -              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses dos veces/año |  |
|                |           |                      |              | 15-15-15*   | 100 g/planta de plátano y 200 g/planta de café | 2              |            |            |                |  |  |
| Cp3            | >15       | 1.8x1                | Cp           | Mezcla (lombricompost, gallinaza, miel de purga, cal, sulfato de aluminio, levadura y azufre) | 2000 g/planta de café                          | 4              | -          | -          | -              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses dos veces/año |  |
|                |           |                      |              | 15-15-15*   | 100 g/planta de plátano y 200 g/planta de café | 2              |            |            |                |  |  |
| Cp4            | >15       | 1.8x1                | Cp           | Mezcla (lombricompost, gallinaza, miel de purga, cal, sulfato de aluminio, levadura y azufre) | 2000 g/planta de café                          | 4              | -          | -          | -              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses dos veces/año |  |
|                |           |                      |              | 15-15-15*   | 100 g/planta de plátano y 200 g/planta de café | 2              | -          | -          | -              |  |  |
| Rs5            | >35       | -                    | Rs           | -   | -  | -              | -          | -          | -              | -  |  |
| Gu6            | >10       | -                    | Gu           | -   | -  | -              | -          | -          | -              | -  |  |
| Cv7            | 8         | 1.5x1.5              | Cs           | Mezcla (DAP*, úrea*, 15-15-15*)   | 100 g/planta                                   | 2              | Thiodan*   | 100 g/200l | 2              | Zoca cada cinco años, eliminación                            |  |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m) | Uso anterior | Manejo                          |                |          |            |                |   |  |
|----------------|-----------|----------------------|--------------|---------------------------------|----------------|----------|------------|----------------|---|--|
|                |           |                      |              | Fertilización                   |                |          | Fumigación |                |   | Otras prácticas  |
| Producto       | Cantidad  | Frec (vez/año)       | Producto     | Cantidad                        | Frec (vez/año) | Producto | Cantidad   | Frec (vez/año) |   |  |
| Cv8            | 8         | 1.5x1.5              | Cs           | Mezcla (DAP*, úrea*, 15-15-15*) | 100 g/planta   | 2        | Thiodan*   | 100 g/200l     | 2 | de arvenses dos veces/año<br>Zoca cada cinco años, eliminación de arvenses dos veces/año |
| Cp9            | 6         | 1.5x1.2              | Cv           | Mezcla (DAP*, úrea*, 15-15-15*) | 25 g/planta    | 6        | -          | -              | - | Zoca cada cinco años, eliminación de arvenses tres veces/año                             |
| Cp10           | 6         | 1.5x1.2              | Cv           | Mezcla (DAP*, úrea*, 15-15-15*) | 25 g/planta    | 6        | -          | -              | - | Zoca cada cinco años, eliminación de arvenses tres veces/año                             |
| Ca11           | >10       | 1.5x1.5              | Ca           | 15-15-15*                       | 75 g/planta    | 2        | -          | -              | - | -  |
| Pa12           | 1         | -                    | Cv           | -                               | -              | -        | -          | -              | - | -  |
| Pc13           | 1         | -                    | Cv           | -                               | -              | -        | -          | -              | - | -  |
| Ba14           | 4         | -                    | Cv           | -                               | -              | -        | -          | -              | - | -  |
| Cv15           | 10        | 1x1                  | Ca           | 17-6-18-2*                      | 150 g/planta   | 2        | Lorsban*   | 0.004 l/l agua | 2 | Zoca a 80 cm de alto cada cuatro años  |
| Pa16           | 1         | -                    | Cv           | -                               | -              | -        | -          | -              | - | -  |
| Cv17           | 5         | 1.5x1.5              | Ca           | 15-15-15*                       | 100 g/planta   | 3        | Lorsban*   | 40 g/20 l agua | 2 | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año                            |
| Cv18           | 5         | 1.5x1.5              | Ca           | 15-15-15*                       | 100 g/planta   | 3        | Lorsban*   | 40 g/20 l agua | 2 | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año                            |
| Pl19           | 2         | 6x6                  | Cv           | Pulpa de café                   | 4 kg/planta    | 2        | -          | -              | - | Deshojar y destroncar dos veces/año  |
| Cv20           | 5         | 1.5x1.5              | Ca           | 15-15-15*                       | 100 g/planta   | 3        | Lorsban*   | 40 g/20 l agua | 2 | Zoca cada cuatro años, eliminación   |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m)          | Uso anterior | Manejo   |                                    |                |                             |                   |                               |   |
|----------------|-----------|-------------------------------|--------------|--|------------------------------------|----------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------|---|
|                |           |                               |              | Fertilización  |                                    |                | Fumigación                  |                   |                               | Otras prácticas   |
|                |           |                               |              | Producto   | Cantidad                           | Frec (vez/año) | Producto                    | Cantidad          | Frec (vez/año)                |   |
| Pa21           | 1         | -                             | Cv           | -  | -                                  | -              | -                           | -                 | -                             | de arvenses tres veces/año  |
| Cp22           | 16        | 2x2                           | Cs           | 15-15-15*  | 100 g/planta                       | 3              | -                           | -                 | -                             | -Zoca cada cinco años, eliminación de arvenses cuatro veces/año<br>-Deshojar y destroncar el plátano cuatro veces/año |
| Cp23           | 15        | 1.5x1.5                       | Cs           | -  | -                                  | -              | Thiodan*                    | 100 g/20 l agua   | 4                             | Zoca cada cinco años, eliminación de arvenses tres veces/año  |
| Cx24           | 6         | Café: 2x2<br>Cítricos:<br>6x6 | Cv           | Cítricos. Mezcla:<br>-pulpa de café<br>-Gallinaza<br>-Cal Dolomita*<br>-25-4-24* | -10 kg<br>-10 kg<br>-6 kg<br>-2 kg | 2              | Roundup*                    | 0.1 l/ 20 l agua  | 1                             | -   |
| Cp25           | 15        | Café: 2x1<br>Plátano:<br>4x4  | Ca           | Pulpa de café  | 4 kg/planta                        | 1              | Lorsban*                    | 0.05 l/ 20 l agua | 3                             | -Deshojar y destroncar el plátano tres veces/año  |
| Cc26           | 6         | 2x2                           | Cv           | -  | -                                  | -              | -                           | -                 | -                             | -   |
| Pa27           | 10        | -                             | Cv           | -  | -                                  | -              | -                           | -                 | -                             | -   |
| Pa28           | 10        | -                             | Cv           | -  | -                                  | -              | -                           | -                 | -                             | -   |
| Ca29           | 15        | 2x1                           | Cs           | Mezcla: cloruro de potasio* y úrea*  | 100 g/planta                       | 2              | Mezcla: Lorsban* y Thiodan* | -0.1 l/20 l agua  | Cuando hay presencia de broca | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año   |
| Ca30           | 15        | 2x1                           | Cs           | Mezcla: cloruro de potasio* y úrea*  | 100 g/planta                       | 2              | Mezcla: Lorsban y Thiodan*  | -0.1 l/20 l agua  | Cuando hay presencia de broca | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año   |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m)         | Uso anterior | Manejo  |              |                |            |                  |                                      |  |
|----------------|-----------|------------------------------|--------------|---|--------------|----------------|------------|------------------|--------------------------------------|--|
|                |           |                              |              | Fertilización                                 |              |                | Fumigación |                  |                                      | Otras prácticas                                |
|                |           |                              |              | Producto                                      | Cantidad     | Frec (vez/año) | Producto   | Cantidad         | Frec (vez/año)                       |  |
| Fr31           | 15        | 10x10                        | Cs           | Mezcla: 15-15-15* y cloruro de potasio        | 2 kg/planta  | 4              | Abasac     | 0.04 l/20 l agua | Cuando hay presencia de ácaro blanco | -  |
| Ca32           | 10        | 1.5x1.5                      | Cs           | 15-15-15*                                     | 100 g/planta | 2              | -          | -                | -                                    | -  |
| Baja           | >40       | -                            | -            | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | Extracción de guadua cada cuatro años          |
| Gu1            |           |                              |              |   |              |                |            |                  |                                      |  |
| Fr2            | 8         | 6x6                          | Cv           | 15-15-15*                                     | 500 g/planta | 2              | -          | -                | -                                    | -  |
|                |           |                              |              | Abono orgánico (mezcla gallinaza y estiércol) | 5 kg/planta  | 1              | -          | -                | -                                    | -  |
| Cs3            | 12        | 2x1                          | Cv           | 15-15-15*                                     | 30 g/planta  | 4              | -          | -                | -                                    | No se hace zoca con una frecuencia determinada |
| Fr4            | 8         | 6x6                          | Cv           | 15-15-15*                                     | 500 g/planta | 2              | -          | -                | -                                    | -  |
|                |           |                              |              | Abono orgánico (mezcla gallinaza y estiércol) | 5 kg/planta  | 1              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa5            | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa6            | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa7            | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa8            | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa9            | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Gu10           | 7         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa11           | 17        | -                            | Ba           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa12           | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Pa13           | 9         | -                            | Cv           | -   | -            | -              | -          | -                | -                                    | -  |
| Cp14           | 5         | Café:<br>1.5x1.5<br>Plátano: | Cv           | 15-15-15*                                     | 100 g/planta | 3              | -          | -                | -                                    | -  |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m) | Uso anterior | Manejo   |                                      |                |            |                 |                |   |
|----------------|-----------|----------------------|--------------|--|--------------------------------------|----------------|------------|-----------------|----------------|---|
|                |           |                      |              | Fertilización  |                                      |                | Fumigación |                 |                | Otras prácticas   |
|                |           |                      |              | Producto   | Cantidad                             | Frec (vez/año) | Producto   | Cantidad        | Frec (vez/año) |   |
| Pa15           | 9         | 4x4                  | Cv           | -  | -                                    | -              | -          | -               | -              | -   |
| Pa16           | 9         | -                    | Cv           | -  | -                                    | -              | -          | -               | -              | -   |
| Pl17           | 0.25      | 4x4                  | Cv           | Lombricompost  | 5 kg/planta                          | 1              | -          | -               | -              | Deshojar y destroncar seis veces/año                            |
| Gc18           | 37        | 4x4                  | Cs           | -  | -                                    | -              | -          | -               | -              | -   |
| Ba19           | 5         | -                    | Ca           | -  | -                                    | -              | -          | -               | -              | -   |
| Ca20           | 12        | 1.5x0.7              | Cs           | Mezcla: 15-15-15*, úrea*, DAP*                       | 120 g/planta                         | 3              | Lorsban*   | 0.1 l/20 l agua | 2              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses cuatro veces/año |
| Ca21           | 12        | 1.5x0.7              | Cs           | Mezcla: 15-15-15*, úrea, DAP*                        | 120 g/planta                         | 3              | Lorsban*   | 0.1 l/20 l agua | 2              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses cuatro veces/año |
| He22           | 6         | 3x3                  | Ca           | 15-15-15*  | Recomendada según análisis de suelos | 2              | Thionil*   | 1 l/200 l agua  | 2              | -   |
| Ca23           | 20        | 1.5x0.8              | Cs           | 15-15-15*  | 100 g/planta                         | 3              | -          | -               | -              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año   |
| Ca24           | 20        | 1.5x0.8              | Cs           | Mezcla: cloruro de potasio, úrea*, DAP*<br>15-15-15* | 120 g/planta<br>100 g/planta         | 3<br>3         | -<br>-     | -<br>-          | -<br>-         | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año   |
| Gu25           | 3         | -                    | -            | Mezcla: cloruro de potasio, úrea*, DAP*              | 120 g/planta                         | 3              | -          | -               | -              | -   |
| Ca26           | 20        | 1.5x0.8              | Cs           | 15-15-15*  | 100 g/planta                         | 3              | -          | -               | -              | Zoca cada cuatro años, eliminación de arvenses tres veces/año   |

| Código muestra | TE (años) | Densidad siembra (m) | Uso anterior | Manejo    | Fertilización                           |                |                | Fumigación |          |                | Otras prácticas                          |
|----------------|-----------|----------------------|--------------|-----------|---|----------------|----------------|------------|----------|----------------|--|
|                |           |                      |              |           | Producto                                | Cantidad       | Frec (vez/año) | Producto   | Cantidad | Frec (vez/año) |  |
| Ba27           | 3         | -                    | -            | -         | Mezcla: cloruro de potasio, úrea*, DAP* | 120 g/planta   | 3              | -          | -        | -              |  |
| Cñ28           | 2         | 0.5x0.5              | Cv           | 15-15-15* | 15-15-15*                               | No determinada | 1              | -          | -        | -              | No se quema la caña antes de ser cortada |
| Cñ29           | 2         | 0.5x0.5              | Cv           | 15-15-15* | 15-15-15*                               | No determinada | 1              | -          | -        | -              | No se quema la caña antes de ser cortada |
| Cñ30           | 2         | 0.5x0.5              | Cv           | 15-15-15* | 15-15-15*                               | No determinada | 1              | -          | -        | -              | No se quema la caña antes de ser cortada |
| Pa31           | 4         | -                    | -            | -         | -                                       | -              | -              | -          | -        | -              | -  |
| Pa32           | 3         | -                    | -            | -         | -                                       | -              | -              | -          | -        | -              | -  |

\* Productos descritos en el anexo 3. TE: tiempo de establecimiento, Frec: frecuencia de aplicación

### Anexo 3. Descripción de productos utilizados en las prácticas de fertilización y fumigación

| Producto                        | Componentes   | Conc (%)  |      |
|---------------------------------|---|---|------|
| Fertilización                   | 15-15-15  | Nitrógeno total (N)                                 | 15   |
|                                 |   | Nitrógeno amoniacal (N)                             | 8.89 |
|                                 |   | Nitrógeno nítrico (N)                               | 6.11 |
|                                 |   | Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 15   |
|                                 |   | Potasio soluble en agua (K <sub>2</sub> O)          | 15   |
|                                 |   | Calcio (CaO)  | 2.5  |
|                                 | 25-4-24   | Nitrógeno total (N)                                 | 25   |
|                                 |   | Nitrógeno amoniacal (N)                             | 1.5  |
|                                 |   | Nitrógeno uréico (N)                                | 23.5 |
|                                 |   | Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 4    |
|                                 |   | Potasio soluble en agua (K <sub>2</sub> O)          | 24   |
|                                 | 17-6-18-2   | Nitrógeno total (N)                                 | 17   |
|                                 |   | Nitrógeno amoniacal (N)                             | 9.7  |
|                                 |   | Nitrógeno nítrico (N)                               | 7.3  |
|                                 |   | Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 6    |
|                                 | Potasio soluble en agua (K <sub>2</sub> O)          | 18  |      |
|                                 | Calcio (CaO)  | 2.5   |      |
|                                 | Magnesio (MgO)                                      | 2.0   |      |
|                                 | Azufre total (S)                                    | 1.6   |      |
|                                 | Boro (B)  | 0.2   |      |
|                                 | Zinc (Zn)   | 0.1   |      |
| DAP-Fosfato diamónico (18-46-0) | Nitrógeno total (N)                                 | 18  |      |
|                                 | Nitrógeno amoniacal (N)                             | 18  |      |
|                                 | Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 46  |      |
| COLJAP desarrollo (foliar)      | Nitrógeno total (N)                                 | 30  |      |
|                                 | Nitrógeno amoniacal (N)                             | 1   |      |
|                                 | Nitrógeno uréico (N)                                | 29  |      |
|                                 | Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 7   |      |
|                                 | Potasio soluble en agua (K <sub>2</sub> O)          | 6   |      |
| Úrea                            | Nitrógeno total (N)                                 | 46  |      |
|                                 | Nitrógeno uréico (N)                                | 46  |      |
|                                 | Biuret máximo                                       | 1.5   |      |
| Agrosolar                       | Fósforo asimilable (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 3   |      |
|                                 | Potasio soluble en agua (K <sub>2</sub> O)          | 3   |      |
|                                 | Calcio (CaO)  | 18.5  |      |
|                                 | Magnesio (MgO)                                      | 7   |      |
|                                 | Azufre total (S)                                    | 2.7   |      |
|                                 | Boro (B)  | 0.13  |      |
|                                 | Cobalto (Co)  | 0.011   |      |
|                                 | Cobre (Cu)  | 0.14  |      |
|                                 | Hierro (He)   | 0.6   |      |
|                                 | Manganeso (Mn)                                      | 0.020   |      |

| Producto                          | Componentes  | Conc (%) |
|-----------------------------------|--|----------|
|                                   | Molibdeno (Mo)   | 0.036    |
|                                   | Silicio (SiO <sub>2</sub> )                                    | 11       |
|                                   | Zinc (Zn)  | 2.1      |
| Cloruro de potasio (0-0-60)       | Potasio soluble en agua (K <sub>2</sub> O)                     | 60       |
| Cal Dolomita                      | Carbonato de Magnesio y carbonato de Calcio                    | 35       |
| Fumigación                        |  |          |
| Fentopen (insecticida)            | Ingrediente activo: fentoato                                   | -        |
| Thiodan o Thionil (insecticida)   | Ingrediente activo: endosulfan                                 | 34       |
|                                   | Ingredientes aditivos  | 66       |
| Alto 100 SL (fungicida sistémico) | Ingrediente activo: cyproconazol                               | -        |
| Roundup (herbicida sistémico)     | Ingrediente activo: sal isopropilamina de N-fosfometil glicina | -        |
| Lorsban (insecticida)             | Principio activo: clorpirifós                                  | -        |

Conc: concentración