

PÉRDIDAS DE NITRÓGENO POR VOLATILIZACIÓN EN CAFETALES EN ETAPA PRODUCTIVA¹

Luis Alfredo Leal-Varón*; Alveiro Salamanca-Jiménez**; Siavosh Sadeghian-Khalajabadi**

RESUMEN

LEAL V., L.A.; SALAMANCA J., A.; SADEGHIAN KH., S. Pérdidas de nitrógeno por volatilización en cafetales en etapa productiva. *Cenicafé* 58(3):216-226. 2007.

En dos Estaciones Experimentales de Cenicafé (Estación Central Naranjal y Subestación Experimental Paraguaicito), con suelos derivados de cenizas volcánicas y ubicadas en la zona cafetera central de Colombia, se cuantificaron las pérdidas de nitrógeno por volatilización ocurridas en plantaciones de café a libre exposición solar y en etapa productiva. El nitrógeno volatilizado fue medido en colectores semiabierto estáticos a los 1, 2, 3, 5, 9, 14 y 20 días después de la aplicación superficial de urea. Las pérdidas de nitrógeno variaron a través del tiempo y tuvieron un incremento notable al segundo día, fecha en la cual se presentaron los máximos valores (8,6% para Naranjal y 9,3% para Paraguaicito). Durante los primeros cinco días las pérdidas acumuladas tuvieron promedios de 22,8% para Naranjal y 27,2% para Paraguaicito. Al finalizar el período de evaluación, el porcentaje total de pérdidas de N ascendió a 30,4% en Naranjal y 34,8% en Paraguaicito. El comportamiento de las pérdidas acumuladas de N a través del tiempo fue explicado por el modelo "exponente simple de tres parámetros" ($r^2 > 0,996$) y las diferencias registradas entre ellas, especialmente durante los primeros cinco días de evaluación, fueron asociadas a características del suelo como textura y CIC, y del clima como temperatura y precipitación.

Palabras clave: Zona cafetera central, Andisoles, café, urea.

ABSTRACT

Nitrogen losses by volatilization occurred in coffee plantations in productive stage under full sunlight exposure were evaluated at two experimental stations of Cenicafé (Central Station Naranjal and Experimental Substation Paraguaicito) with soils derived from volcanic ashes and located in the Colombian central coffee region. Using semi-open static collectors, volatilized nitrogen was measured on days 1, 2, 3, 5, 9, 14 and 20 after a superficial urea application. Nitrogen losses varied over time and have a considerable increase on the second day when the maximum values were registered (8.6% in Naranjal and 9.3% in Paraguaicito). During the first 5 days accumulated nitrogen losses presented averages of 22.8% in Naranjal and 27.2% in Paraguaicito. At the end of the evaluation period, the total losses percentages of nitrogen were 30.4% in Naranjal and 34.8% in Paraguaicito. The behavior of accumulated nitrogen losses through time was explained by the mathematical model "simple exponent with three parameters" ($r^2 > 0.996$). The differences registered between localities, especially during the first 5 days, were associated with some soil properties such as texture and CEC and with climatic variables such as temperature and precipitation.

Keywords: Colombian central coffee region, Andisols, coffee, urea.

¹ Fragmento de la tesis "Volatilización de nitrógeno en dos suelos de la zona cafetera colombiana" presentada por el primer autor, como requisito para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

* Ingeniero Agrónomo. Universidad del Tolima.

** Asistente de Investigación e Investigador Científico II, respectivamente. Suelos. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

El nitrógeno (N) es el elemento primario o macronutriente que las plantas utilizan en mayor cantidad (6). Participa en la síntesis de aminoácidos y de otros compuestos vitales como son la clorofila, los ácidos nucleicos y las enzimas (24). Según Havlin *et al.* (16), este nutriente es con frecuencia el más requerido para la producción de los cultivos.

Refiriéndose específicamente al cultivo de café, Uribe y Mestre (29) al evaluar la fertilización con tres niveles de nitrógeno, fósforo y potasio (0, 120 y 240kg.ha⁻¹), en ocho localidades de la zona cafetera colombiana, encontraron que el N fue el único nutriente que influyó positivamente sobre la producción en siete de los ocho sitios. En este mismo sentido, Sadeghian (26) encontró que cuando se deja de aplicar N, la producción se puede reducir hasta en un 49% en cafetales al sol y un 40% en cafetales con sombrero parcial, en los primeros dos años de producción.

Actualmente, para cafetales en producción se recomienda aplicar entre 200 y 280kg.ha⁻¹.año⁻¹ de N, de acuerdo con los niveles de materia orgánica en el suelo (27). Esta demanda puede ser suplida con diferentes fuentes nitrogenadas, entre las cuales se destacan: urea, nitrato de amonio, nitrato de amonio cálcico, fosfato diamónico (DAP), fosfato monoamónico (MAP), nitrato de potasio, nitrato de calcio y sulfato de amonio (31).

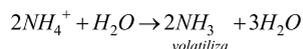
Del anterior grupo de fertilizantes, la urea es la fuente que más ha incrementado su demanda mundial en los últimos años (4), y ha adquirido gran importancia económica debido a la tendencia al alza en su precio y a las variaciones internacionales de los precios del petróleo, y más exactamente del gas natural, materia prima de la cual se deriva este insumo (8).

En la caficultura colombiana la urea es también la fuente química simple más utilizada para suplir los requerimientos de N en el cultivo, debido a su alta concentración (46%) y relativo bajo costo. Sin embargo, según Lara *et al.* (19) cuando esta fuente no se incorpora en el suelo, exhibe pérdidas por volatilización en forma de amoníaco (NH₃), hasta de un 50% del N aplicado; y a su vez, Fenilli *et al.* (11) encontraron para condiciones de Brasil que un 43% del N-NH₃ volatilizado fue reabsorbido por las plantas de café.

La volatilización del N proveniente de la urea se origina cuando esta fuente, al entrar en contacto con la superficie del suelo, se hidroliza para formar amonio (NH₄⁺) por acción de la ureasa, una enzima producida por los microorganismos del suelo (13, 31), como se indica en la siguiente reacción:



Posteriormente, esta hidrólisis enzimática favorece la formación de amoníaco (NH₃), que luego se libera a la atmósfera y provoca la pérdida de N, como se presenta a continuación:



La magnitud de las pérdidas está determinada por factores ambientales (temperatura, lluvia y viento), de suelo (pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica) y manejo del fertilizante (forma de aplicación, dosis y fuente) (15).

Para estimar las pérdidas de NH₃ provenientes de la aplicación de fertilizantes nitrogenados existen los métodos indirecto y directo. El método indirecto o por balance isotópico con N marcado (N¹⁵), consiste en determinar el amonio volatilizado a partir

de la diferencia entre el N aplicado y el residual del suelo, teniendo en cuenta el absorbido por la planta (22); el método directo o micrometeorológico, consta de equipos especializados con diversas formas y dimensiones para atrapar el amoníaco liberado del suelo, mediante sistemas absorbentes (láminas de poliuretano y filtros, entre otros), ubicados en el interior de cilindros o colectores (20). Según Nõmmik (22), el colector semi-abierto estático es el más conveniente para estudios en el campo, ya que posee una abertura permanente que posibilita el equilibrio de la atmósfera interna del colector con el aire exterior, minimizando así interferencias en la determinación del amoníaco volatilizado.

En Colombia, los estudios sobre este tema han sido pocos. Ordóñez *et al.* (23), al evaluar la volatilización de N en dos suelos del Valle del Cauca, en estudios en el laboratorio, encontraron que cuando la urea se aplica superficialmente, las pérdidas alcanzan valores entre 13,1 y 15,2% de N-NH₃, en comparación con la urea aplicada en banda e incorporada al suelo, cuyas pérdidas se reducen a 0,2 y 0,8% de N-NH₃.

Pese a la importancia que tiene la fertilización nitrogenada en la producción del cultivo del café, en Colombia no se habían

realizado trabajos en el campo para medir sus pérdidas por volatilización. El presente estudio tuvo como objetivo cuantificar estas pérdidas a partir de la aplicación superficial de la urea en plantaciones de café en etapa productiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y duración. El estudio se realizó en el primer semestre del 2006 en la Estación Central Naranjal y en la Subestación Experimental Paraguaicito, de Cenicafé, ubicadas en los departamentos de Caldas y Quindío, con condiciones climáticas contrastantes (Tabla 1).

Características de los suelos. Los suelos de las dos Estaciones Experimentales son derivados de cenizas volcánicas y corresponden a las unidades cartográficas Chinchiná para la Estación Central (Naranjal) y Montenegro para la Subestación (Paraguaicito), clasificadas taxonómicamente como *Melanudands* y *Hapludands*, respectivamente, contrastantes en sus características físicas y químicas (Tabla 2).

En cada localidad se seleccionó un lote de café tecnificado variedad Colombia, a libre exposición solar, en etapa productiva

Tabla 1. Ubicación geográfica y condiciones climáticas de las dos Estaciones Experimentales de Cenicafé.

Localidad	Municipio (Departamento)	Latitud/ Longitud	Altitud (m)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Brillo solar (h.año ⁻¹)	Lluvia (mm. año ⁻¹)
E.C. Naranjal	Chinchiná (Caldas)	4°58'N 75°39'W	1.381	21,3	73,1	1.797	2.711
S.E. Paraguaicito	Buenavista (Quindío)	4°24'N 75°44'W	1.203	21,9	77,0	1.720	2.149

Fuente: Cenicafé (6).

E.C.: Estación Central

S.E.: Subestación Experimental

Tabla 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos de estudio.

Localidad	Unidad de Suelo	Profundidad (cm)	Arena	Limo	Arcilla (%)	MO	pH	CIC (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)
E.C. Naranja	Chinchiná	0-20	49	32	19	11,3	4,8	23
S.E. Paraguaicito	Montenegro	0-20	54	27	19	7,1	5,2	13

E.C. Estación Central; S.E. Subestación Experimental

(tres años de edad) y con una densidad de siembra de 6.700 plantas/ha; dentro de éste se ubicaron diez bloques, cada uno conformado por dos árboles contiguos. Por cada árbol se ubicó un punto de muestreo en la zona del plato, a 30cm del tallo; un punto de muestreo se fertilizó superficialmente con 3g de N (equivalentes a 6,5g de urea) y el otro se tomó como Testigo (sin fertilización).

Para cuantificar las pérdidas por volatilización de N-NH₃ se utilizó un colector semi-abierto estático, de acuerdo con la metodología propuesta por Nömmik (22) y modificada por Lara *et al.* (21), la cual consiste en atrapar el amoníaco por medio de un cilindro de PVC de 15cm de diámetro por 44cm de altura, en cuyo interior se colocan dos láminas o espumas de poliuretano de 3cm

de espesor, separadas 15,4cm entre sí (Figura 1). Para tal fin, cada espuma se embebió con 70mL de una solución compuesta por ácido sulfúrico 0,5N y glicerina 3% (v/v); la espuma inferior atrapó el amoníaco liberado desde el suelo, mientras que la espuma superior evitó el ingreso del amoníaco proveniente de la atmósfera.

La volatilización del amoníaco se determinó a los 1, 2, 3, 5, 9, 14 y 20 días después de la aplicación de la urea. Para cada día de evaluación se reemplazaron las dos espumas de cada cilindro y se adicionó un volumen de agua similar a la precipitación recogida en recipientes cercanos. Posteriormente, la espuma inferior se llevó al laboratorio, donde se determinó el N volatilizado por el método Kjeldahl, descrito por Carrillo (5).



Figura 1. a) Esquema del colector de amoníaco; b) Colector de amoníaco con la espuma inferior; c) Colector de amoníaco instalado en el campo.

Los días de observación y la dosis de N (urea) empleados se definieron a partir de un ensayo preliminar realizado en las instalaciones de Cenicafé.

Como información complementaria, a partir de las dos estaciones climáticas de Cenicafé ubicadas en estas localidades, se obtuvieron los registros diarios de temperatura media del aire y precipitación para todo el período de evaluación, por ser las variables climáticas que mayor efecto ejercen sobre las condiciones de humedad del suelo y que por ende pudieron afectar las pérdidas de NH_3 ocurridas por la aplicación superficial de la urea.

Diseño experimental y variables evaluadas.

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar, con diez repeticiones, y se empleó como factor de bloqueo el grado de fertilidad del suelo, determinado por la posición en la pendiente del terreno. La variable de respuesta fue la cantidad de amoníaco volatilizado para cada día de evaluación.

Análisis de la información. Por cada localidad y tratamiento se estimaron los promedios y los coeficientes de variación de la variable de respuesta. Luego, para cada localidad se realizó un análisis de varianza al 5%, bajo el modelo de análisis para el diseño experimental utilizado, y se aplicó la prueba Diferencia Mínima Significativa-DMS al 5% para comparar los promedios de los dos tratamientos, con y sin aplicación de N.

Igualmente, para cada localidad se realizó un análisis de regresión, empleando el Software SigmaPlot 9.0 y se seleccionó el modelo que mejor explicó el comportamiento de las pérdidas acumuladas de N a través del tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan para las dos Estaciones donde se realizó el experimento, las pérdidas por volatilización en mg de N, ocurridas a través del tiempo a partir de la aplicación superficial de la urea.

En los dos sitios y durante todos los días de evaluación, en los tratamientos donde se aplicó N, las pérdidas fueron mayores y significativamente diferentes de los tratamientos sin este nutriente. Cuando no se aplicó urea (Sin N) las pérdidas fueron constantes a través de tiempo en los dos sitios, con mayores promedios en Paraguaicito (entre 0,87 y 0,95mg de N) que en Naranjal (entre 0,40 y 0,61mg de N). Estas pérdidas se encontraron dentro de los rangos reportados para tratamientos similares por Barbieri y Echeverría (2) y Sangoi *et al.* (28), y pudieron provenir de algunas formas de N que según Havlin *et al.* (16), se liberan del suelo como producto de la actividad microbiana.

Al expresar los promedios de los tratamientos con aplicación de N presentados en la Tabla 3, en términos de porcentaje de pérdidas diarias de N (Figura 2), se encontró que el comportamiento de la volatilización fue similar en las dos localidades, con pérdidas muy bajas en el primer día y un incremento notable en el día dos, con porcentajes de 8,6 y 9,3% para Naranjal y Paraguaicito, respectivamente. En Paraguaicito las pérdidas ocurridas entre el tercero y el quinto día fueron similares al día dos, mientras que en Naranjal se presentó un leve descenso durante este mismo período.

Según Sangoi *et al.* (28), cuando la aplicación del fertilizante se realiza en la superficie y no es incorporado al suelo ocurren las máximas pérdidas de N; Rodrigues y Kiehl (25), también afirman que el N volatilizado

Tabla 3. Promedios (\bar{X}) y coeficientes de variación (C.V.) de las pérdidas de N para cada día de evaluación, en las Estaciones Experimentales Naranjal y Paraguaicito.

Localidad	Tratamiento	Parámetro	Días después de la aplicación						
			1	2	3	5	9	14	20
Estación Central Naranjal	Sin N	\bar{X} (mg)	0,60 b	0,61 b	0,59 b	0,55 b	0,57 b	0,42 b	0,40 b
		C.V. (%)	38,9	36,3	42,3	42,5	30,8	50,1	39,6
	Con N	\bar{X} (mg)	22,0 a	257,7 a	199,9 a	205,1 a	119,6 a	64,0 a	43,9 a
		CV (%)	38,1	12,5	13,8	18,6	7,8	4,3	23,7
Subestación Experimental Paraguaicito	Sin N	\bar{X} (mg)	0,89 b	0,87 b	0,86 b	0,87 b	0,88 b	0,95 b	0,86 b
		C.V. (%)	12,2	10,3	16,5	12,4	10,4	10,5	13,1
	Con N	\bar{X} (mg)	13,4 a	279,6 a	260,7 a	263,3 a	126,5 a	68,1 a	33,9 a
		C.V. (%)	26,6	22,6	9,5	16,6	7,5	10,0	31,5

* Valores con letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos por localidad y día de evaluación (Prueba DMS al 5%).

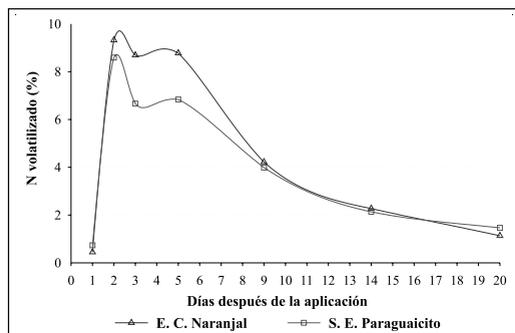


Figura 2. Promedio de pérdida diaria de N a través de tiempo, en las Estaciones Experimentales Naranjal y Paraguaicito.

aumenta proporcionalmente con la cantidad de fertilizante aplicado.

Kiehl (18) y Vitti *et al.* (30) reportan que las elevadas pérdidas de N durante los primeros días, se deben a que la rápida disolución o hidrólisis de la urea produce un aumento del pH alrededor del gránulo de fertilizante, que causa un desequilibrio químico entre los iones amonio (NH_4^+) y amoníaco (NH_3) del suelo, e intensifica la conversión de NH_4^+ a NH_3 , forma en la cual

el N se volatiliza. Según Rodrigues y Kiehl (25), dicho comportamiento está asociado a características del suelo que intensifican la rápida disolución de la urea como son la humedad, la textura, la porosidad y la capacidad del suelo para retener el amonio.

A partir del día 5 el porcentaje de N volatilizado se redujo gradualmente hasta llegar a los niveles más bajos en el día 20; comportamiento que puede asociarse a la reducción en la cantidad de N aportado por el fertilizante.

Al expresar el porcentaje de pérdidas de N en forma acumulada (Figura 3), se encontró que al finalizar el período de evaluación (día 20), el N volatilizado fue mayor en Paraguaicito (35%) con respecto a Naranjal (30%), con valores en los primeros cinco días de 23% para Naranjal y 27% para Paraguaicito. Dichas pérdidas de N fueron similares a las reportadas por Costa *et al.* (9), para plantaciones de caña de azúcar en Brasil, cuyos valores fluctuaron entre 35 y 36% del N aplicado.

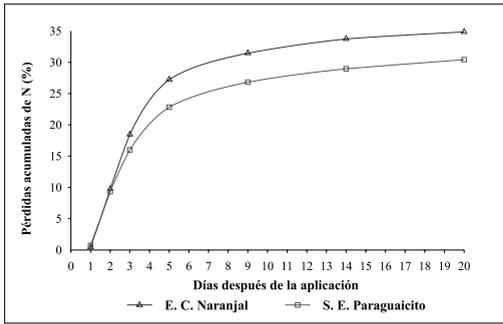


Figura 3. Promedio de pérdidas acumuladas de N en las Estaciones Experimentales Naranjal y Paraguaicito.

Para los dos sitios de estudio, el modelo matemático que mejor explicó el comportamiento de las pérdidas acumuladas de N en función de los días de evaluación, fue el modelo exponente simple de tres parámetros, representado por la siguiente expresión:

$$Y = Y_o + a(1 - b^x)$$

Donde:

Y = Porcentaje de pérdidas acumuladas de N

Y_o = Intercepto en Y

a = Valor absoluto de la pérdida total acumulada para el modelo

b = Tasa media de volatilización diaria

x = Días después de la aplicación (dda)

Así mismo, para los dos sitios se encontró una alta significancia ($P < 0,001$) tanto del modelo como de los parámetros individuales y valores aceptados por las pruebas Durbin-

Watson, test de normalidad y test de varianza constantes.

Una vez seleccionado el modelo, se estimaron las pérdidas diarias acumuladas para cada localidad durante todo el período de evaluación (Figura 4). El comportamiento de las pérdidas diarias de N para las dos localidades, presentó una tendencia de tipo sigmoideal con coeficientes de determinación significativos (Tabla 4).

A partir del modelo descrito para cada localidad (Tabla 4) y de la suposición que en el día 20 las pérdidas de N llegaron a su máximo nivel (100%), se puede predecir que diez días después de aplicado el fertilizante se

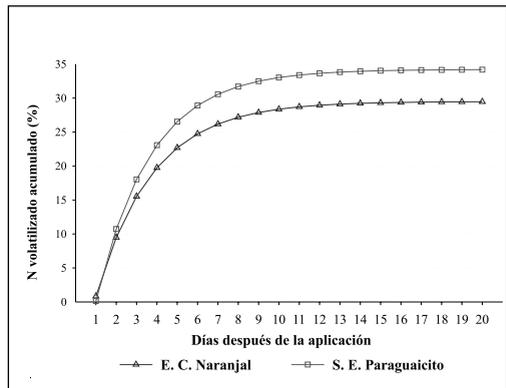


Figura 4. Pérdidas diarias acumuladas de N a través del tiempo, a partir del modelo exponente simple, en las Estaciones Experimentales Naranjal y Paraguaicito.

Tabla 4. Modelos de pérdida de N obtenidos para las Estaciones Experimentales Naranjal y Paraguaicito.

Localidad	Modelo	R ²
E.C. Naranjal	(%) N Volatilizado = -11,56 + (41,05 (1 - 0,698 ^{dda}))	0,9968
S. E. Paraguaicito	(%) N Volatilizado = -15,24 + (49,45 (1 - 0,689 ^{dda}))	0,9969

pierde aproximadamente un 96% del N total volatilizado, para los dos sitios de estudio. Por lo anterior, se establece este tiempo como el período mínimo en el cual se deben evaluar las pérdidas de N por volatilización, a partir de la aplicación superficial de urea en el campo.

La magnitud y el comportamiento de las pérdidas de N por volatilización dentro de cada localidad y la diferencia del 5% encontrada entre los dos sitios de estudio, se asociaron con algunas de las características de clima y suelo referidas en las Tablas 1 y 2, como se presenta a continuación:

El suelo es uno de los factores más influyentes en el proceso de volatilización, debido a que características como el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH y la textura, pueden aumentar o disminuir la magnitud de la pérdida de N (15, 25).

Fenn y Kissel (12) y Fleisher *et al.* (14) reportan que suelos con altos valores de CIC y alto contenido de materia orgánica poseen una mayor capacidad de retención del amonio (NH_4^+) liberado de la hidrólisis de la urea en los sitios de intercambio, lo cual disminuye la volatilización. Algo similar pudo ocurrir en Naranjal, donde las pérdidas fueron menores.

Con relación al pH, Ferguson *et al.* (13) y Hargrove (15) encontraron que en suelos con valores de pH altos, las pérdidas de N por volatilización son mayores en comparación con aquellos suelos con pH bajos, debido a que esta propiedad determina el equilibrio químico entre NH_4^+ y NH_3 en el suelo. Al relacionar los valores de pH con las pérdidas de N para las dos localidades, las mayores pérdidas registradas en Paraguaicito pudieron estar relacionadas en algún grado con el mayor valor de pH en este suelo (5,2) en

comparación con Naranjal (4,8), pues según Ahmed *et al.* (1), posterior a la hidrólisis de la urea, un menor pH favorece más la formación de NH_4^+ que NH_3 .

Al relacionar la textura del suelo con la volatilización, Ordóñez *et al.* (23) reportan que suelos de textura arcillosa y franco-arcillosa presentaron niveles más bajos de pérdida de NH_3 , con valores entre 6,28 y 6,98% en comparación con aquellos suelos de textura franco-arcillo-arenosa, donde se registraron pérdidas de NH_3 entre 21,03 y 18,26%. Al comparar la textura entre los sitios de estudio, la diferencia en el contenido de arena en Paraguaicito (54%) y Naranjal (49%), podría también explicar en parte las mayores pérdidas ocurridas en la primera localidad.

Con respecto al efecto que pudo ejercer el clima sobre las pérdidas de N durante el período de medición, a continuación se describe el comportamiento de la temperatura del aire y la precipitación, y su posible relación con la proporción de N perdido en cada localidad. Jaramillo (17) encontró que la temperatura del aire a 2m de altura está altamente correlacionada con la temperatura del suelo en los primeros 10cm de profundidad, la cual a su vez está influenciada por otros elementos meteorológicos (radiación solar, viento, evaporación, condensación, lluvia) y varios factores del suelo (textura, materia orgánica, labranza y humedad). Según Bonilla (3), la temperatura del suelo a 2cm en un cafetal bajo sombrío, presenta poca variación a través del tiempo y su promedio es menor, aproximadamente 4°C, en comparación con la temperatura del aire.

Como se presenta en la Figura 5, el comportamiento de la temperatura media registrada durante los 20 días de evaluación fue diferente entre las dos localidades. En general, la menor temperatura media en

Naranjal durante todo el período de estudio podría asociarse con la menor magnitud en las pérdidas de N por volatilización. Al respecto, Ernst y Masset (10) afirman que las pérdidas de N por volatilización son mayores a medida que aumenta la temperatura, debido a su acción sobre la actividad microbial del suelo, más exactamente sobre la actividad de la enzima ureasa (15).

De manera similar, en la Figura 6 se presenta el comportamiento de la precipitación diaria para ambas localidades. La precipitación total durante los 20 días de evaluación en Naranjal alcanzó los 252mm, mientras que en Paraguaicito solo llegó a 128mm; así mismo, la menor cantidad de N volatilizado en Naranjal puede relacionarse con la mayor cantidad de lluvia acumulada durante los primeros 5 días, período en el cual ocurrió la mayor pérdida en los dos sitios. Según Lara *et al.* (19) la lluvia disminuye las pérdidas de N por volatilización porque diluye, alrededor del gránulo del fertilizante, la concentración de hidroxilos (OH⁻) producidos durante la hidrólisis de la urea y además, incorpora el fertilizante en el suelo.

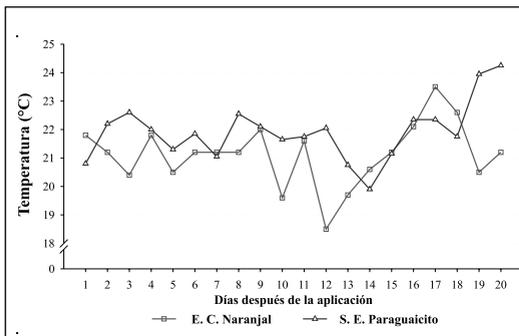


Figura 5. Temperatura media del aire diaria registrada en las Estaciones Experimentales Naranjal (marzo 14- abril 02, 2006) y Paraguaicito (abril 27-mayo 16, 2006).

Finalmente, y teniendo en cuenta que la magnitud de dichas pérdidas para cafetales en etapa productiva es considerable, es necesario seguir investigando en estos aspectos, con el fin de mejorar tanto la eficiencia del N para el cultivo de café como la aplicación misma de los fertilizantes nitrogenados.

AGRADECIMIENTOS

A Cenicafé y a todas aquellas personas que contribuyeron para la realización de este trabajo, especialmente a los investigadores Esther C. Montoya, Beatriz Mejía, Celso Arboleda (q.e.p.d.), Juan C. García, Álvaro Jaramillo. Al personal del Taller de Ingeniería Agrícola, de la Estación Central Naranjal, de la Subestación Experimental Paraguaicito y de la Disciplina de Suelos.

LITERATURA CITADA

1. AHMED, O.H.; AMINUDDIN, H.; HUSNI, M.H.A. Reducing ammonia loss from urea and improving soil exchangeable ammonium retention through mixing triple superphosphate, humic acid and zeolite. *Soil Use and Management* 22: 315-319. 2006.

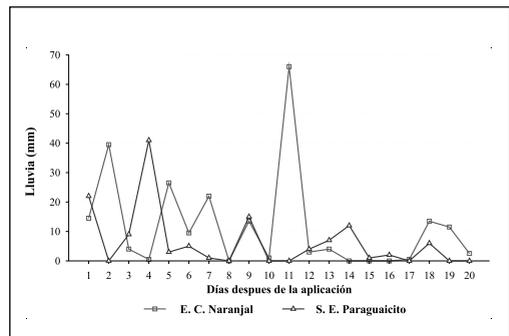


Figura 6. Precipitación diaria registrada en las Estaciones Experimentales Naranjal (marzo 14-abril 02, 2006) y Paraguaicito (abril 27- mayo 16, 2006).

2. BARBIERI, P.A.; ECHEVERRÍA, H.E. Evolución de las pérdidas de amoníaco desde urea aplicada en otoño y primavera a una pastura de agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*). Revista de Investigaciones Agropecuarias 32: 17-27. 2003.
3. BONILLA, E. Estudio de la distribución vertical de la humedad relativa, de la temperatura del aire y del suelo, en una plantación de café. Cenicafé 3(34): 19-37. 1952.
4. BRITISH SULPHUR PUBLISHING. Urea prilada vs Urea granular. Fertilizantes América Latina 8: 11-15. 2003.
5. CARRILLO, I.F. Manual de laboratorio de análisis de suelos. Chinchiná, Cenicafé, 1985. 111 p.
6. CASTRO, H. Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas: Manual Técnico. Tunja, Produmedios, 1998. 360 p.
7. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ-Cenicafé. Archivo de información climática. Chinchiná, Cenicafé, Disciplina de Agroclimatología, 2005. 552p.
8. CORPORACIÓN COLOMBIA INTERNACIONAL. Precios Internacionales de algunos insumos agrícolas de gran demanda. Bogotá (Colombia), CCI, 2005. [On line Internet]. Disponible en: http://www.cci.org.co/cci/cci_x/Sim/Precios%20Internacionales/PreciosInt%2071.pdf (Consultado en mayo de 2006)
9. COSTA, G.; VITTI, C.; CANTARELLA, H.; Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. Revista Brasileira de Ciência do Solo 27: 631-637. 2003.
10. ERNST, J.W.; MASSEY, H.F. The effects of several factors on volatilization of ammonium formed from urea in soil. Soil Science Society of America Journal 24: 87-90. 1960.
11. FENILLI, T. A. B.; REICHARDT, K.; TRIVELIN, P. C. O.; FAVARIN, J. L. Volatilization of ammonia derived from fertilizer and its reabsorption by coffee plants. Communications in Soil Science and Plant Analysis 38(13): 1741 - 1751. 2007.
12. FENN, L.B.; KISSEL, D.E. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization ammonium compounds applied to calcareous soils. Soil Science Society of America Journal 40: 394-397. 1976.
13. FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E.; KOELLIKER, J.K.; BASEL, W. Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity. Soil Science Society of America Journal 48: 578-582. 1984.
14. FLEISHER, Z.; KENIG, A.; RAVINA, I.; HAGIN, J. Model of ammonia volatilization from calcareous soils. Plant and Soil 103: 205-212. 1987.
15. HARGROVE, W.L. Soil environmental and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. In: BOCK, B.; KISSEL, D. (Eds). Ammonia volatilization from urea fertilizers. Alabama, National Fertilizer Development Center, 1988. p. 17-37.
16. HAVLIN, J.L.; BEATON, D.J.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Soil Fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Upper Saddle, Prentice Hall, 1999. 499 p.
17. JARAMILLO, A. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná. Cenicafé, 2005. 192 p.
18. KIEHL, C.J. Distribuição e retenção da amônia no solo após aplicação de uréia. Revista Brasileira de Ciência do Solo 48: 75-80. 1989.
19. LARA, C., W.A.R.; KORNDÖRFER, G.H.; MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. Revista Brasileira de Ciência do Solo 21: 481-487. 1997.
20. LARA, C., W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicação ao solo. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 14: 345-352. 1990.
21. LARA, C., W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; SANTANA, D.G.; GASCHO, G.J. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. Communications in Soil Science and Plant Analysis 30: 389-406. 1999.
22. NÖMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. Plant and Soil 39: 309-318. 1973.
23. ORDOÑEZ, S.; QUINTERO, R.; LARRAHONDO, E.; JARAMILLO, A. Evaluación de dos métodos analíticos para cuantificar las pérdidas de nitrógeno por volatilización en suelos del valle del río Cauca. Carta Trimestral Cenicafé 27(2): 4-9. 2005.

24. OROZCO, F.H. La Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Medellín, Universidad Nacional de Colombia, 1999. 231 p.
25. RODRIGUES, B.M.; KIEHL, C.J. Volatilização de amonia apos de uréia em diferentes doses e modos de aplicação. Revista Brasileira de Ciência do Solo 10: 37-43. 1986.
26. SADEGHIAN KH., S. Determinación de los niveles críticos de los nutrimentos para el cultivo de café en suelos de la zona cafetera. In: Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé. Informe anual de actividades 2003-2004, Disciplina de suelos. Chinchiná, Cenicafé, 2004. 23 p.
27. SADEGHIAN KH., S.; DUQUE O., H. Análisis de suelos: importancia e implicaciones económicas en el cultivo de café. Avances Técnicos Cenicafé No. 308: 1-8. 2003.
28. SANGOI, L.; ERNANI, P.; LECH, V.; RAMPAZZO, C. Volatilization of N-NH₃ influenced by urea application forms, residue management and soil type in lab conditions. Ciência Rural 33: 687-692. 2003.
29. URIBE, H. A.; MESTRE, M.A. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. Cenicafé 27(4): 158-173. 1976.
30. VITTI, G.C.; TAVARES JUNIOR, J.E.; LUZ, P.H.; FAVARIN, J.L.; COSTA, M.C. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. Revista Brasileira de Ciência do Solo 26: 663-671. 2002.
31. WHITE, R. E. Principles and practice of soil science: The soil as a natural resource. Victoria, Blackwell publishing, 2006. 363 p.