

CAMBIOS EN LA FERTILIDAD DEL SUELO CON PLANTACIONES DE CAFÉ Y SOMBRÍO DE ESPECIES FORESTALES

Fernando Farfán-Valencia*

RESUMEN

FARFÁN V., F. Cambios en la fertilidad del suelo con plantaciones de café y sombrío de especies forestales. Cenicafé 61(1):7-27.2010

En la Estación Experimental Paraguaicito se evaluó el efecto de las especies *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa* y *Eucalyptus grandis* empleadas como sombrío en café, sobre algunas características del suelo. El café se estableció a 1,5 x 1,5 m y el sombrío a 6,0 x 6,0 m. Los resultados indican que el tiempo de permanencia de los sistemas de cultivo (café solo o con sombrío) tienen influencia sobre las concentraciones de nutrientes del suelo. El pH disminuye en cualquier sistema de cultivo del café, pero no llegó a ser limitante para su productividad. Los valores de materia orgánica y fósforo iniciales fueron menores a los rangos óptimos establecidos para el café, condición que no es debida los sistemas, si no a las propiedades químicas naturales de los suelos. Las concentraciones de potasio disminuyeron en las parcelas establecidas con especies forestales, con pino disminuyó por debajo de los niveles establecidos para el café. El calcio y magnesio disminuyeron en el periodo de evaluación (10 años), tanto en los suelos establecidos solamente con café y café con sombrío, pero al final las concentraciones registradas no se constituyen en limitaciones aparentes para el desarrollo del café. Las concentraciones de aluminio aumentaron, pero en ningún caso estuvieron por encima de los niveles máximos tolerables.

Palabras clave: Sistema agroforestal, *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa*, *Eucalyptus grandis*.

ABSTRACT

At the Paraguaicito Experimental Substation the effect of *Cordia Alliodora*, *Pinus oocarpa* and *Eucalyptus grandis* species used as shade for coffee plants was evaluated on some soil characteristics. The coffee was set at 1.5 x 1.5 m and the shade at 6.0 x 6.0 m. The results indicate that the permanence time of the cropping system (only coffee or with shade) influences the concentrations of soil nutrients. The pH decreased in any coffee cultivation system, but it did not become restrictive for its productivity. The initial organic matter and phosphorus values were lower than the optimal ranges established for coffee, a condition that is not due to the systems, but to the natural chemical properties of soils. Potassium concentrations decreased in the plots established with forest species; they also decreased with pine under the levels set for coffee. Calcium and magnesium decreased in the evaluation period (10 years) in both only coffee soils and shade coffee soils, but ultimately the registered concentrations do not become apparent limitations for coffee development. The aluminum concentrations increased, but in no case were they above the maximum tolerance levels.

Keywords: Agroforestry Systems, *Coffea arabica*, *Cordia alliodora*, *Pinus oocarpa*, *Eucalyptus grandis*.

* Asistente de Investigación. Fitotecnia. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

En diversas partes del mundo es evidente una gran variedad de modalidades del cultivo del café, las cuales están determinadas por las condiciones agroecológicas prevalecientes; en este sentido, existen fundamentalmente dos sistemas de cultivo, monocultivo y sistemas agroforestales o café con sombrío. La agroforestería se refiere a sistemas y tecnologías de uso del suelo, en los cuales las especies arbóreas se utilizan en el mismo sistema de manejo que cultivos agrícolas, en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal (13, 25). En los sistemas agroforestales existen interacciones tanto ecológicas como económicas entre los diferentes componentes (37), con el propósito de lograr un sinergismo entre éstos, que conduzca a mejoras netas en uno o más rangos de características, tales como productividad y sostenibilidad (17, 31, 36), así como diversos beneficios ambientales y no comerciales.

En Colombia, el café es un cultivo que puede establecerse a plena exposición solar, pero es común observar plantaciones establecidas con varios tipos y cantidades de sombra, dadas las diversas condiciones climáticas y de suelo de nuestras zonas cafeteras. El establecimiento de cafetales con árboles de sombrío permite ejercer un control sobre la economía del agua, lo que mitiga los efectos que los períodos de déficit hídrico imponen sobre la producción; los árboles contribuyen a mantener la fertilidad del suelo y ayudan a reducir la erosión, reciclan nutrientes y aportan gran cantidad de materia orgánica (3, 29, 36), entre otros. Las especies comúnmente empleadas como componente arbóreo de los sistemas agroforestales con café corresponden a la familia Leguminosae, especialmente *Inga* sp., *Albizia* sp., *Erythrina* sp. y *Leucaena* sp.

Existen diversos estudios que confirman las bondades de muchas especies como deseables para el sombrío del café, pero existe un

conocimiento limitado sobre las interacciones biofísicas de sistemas agroforestales, los cuales involucran a especies forestales como componente arbóreo, que pueden tener potencial biológico y económico para ser empleadas con los mismos propósitos; las principales razones expresadas, se relacionan con la creencia que estas especies forestales secan el suelo, reducen la biodiversidad, son inhóspitas para la fauna, afectan el clima, pero las de mayor peso son aquellas relacionadas con su capacidad de esterilizar y acidificar el suelo.

Con el propósito de estudiar cómo interactúan los componentes de un sistema agroforestal, café-especies forestales, y su efecto en los cambios presentados en el suelo, se estableció un estudio que permitiera analizar estos cambios al establecer el café bajo sombrío de tres especies de valor comercial. Las especies empleadas fueron nogal cafetero (*Cordia alliodora*) especie de amplio uso y aceptación como sombrío en café, eucalipto (*Eucalyptus grandis*) y pino (*Pinus oocarpa*), estas dos últimas especies introducidas y de amplio uso en programas de reforestación comercial.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se estableció en la Estación Experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío). Las características geográficas, climáticas (9) y el nivel de fertilidad natural de los suelos (14), se presentan en la Tabla 1.

Componentes de los sistemas agroforestales.

El componente agrícola de los sistemas fue café (*Coffea arabica*) L. cv. Colombia, y como componentes forestales se emplearon las especies nogal cafetero (*Cordia alliodora*), eucalipto (*Eucalyptus grandis*) y pino (*Pinus oocarpa*).

Tabla 1. Características climáticas y nivel de la fertilidad natural de los suelos de la Estación Experimental Paraguaicito (Buenavista, Quindío).

Localización geográfica		Características climáticas	
Latitud Norte	4° 2'	Temperatura (°C)	22,2
Longitud Oeste	75° 44'	Precipitación (mm)	2243,7
Altitud (m)	1250	Brillo solar (horas año)	1757
		Humedad relativa (%)	74

Características químicas del suelo	Rangos óptimos	Valores registrados*	
		0-30 cm	>30 cm
pH	5,0 – 5,5	5,7	6,1
Materia Orgánica (%)	8,0 – 14,0	6,8	1,9
Nitrógeno (%)		0,3	0,1
Fósforo (ppm)	6,0 – 14,0	2,0	4,6
Potasio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,38 – 0,40	0,8	0,9
Calcio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,8 – 2,4	6,9	2,9
Magnesio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,6 – 0,8	1,1	0,3
Aluminio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,0 – 1,1	0,1	0,3

Características físicas del suelo	Horizonte Ap	Horizonte AB
Profundidad (cm)	0 - 54	54 – 80
Textura horizonte	Franco Arenosa (FA)	Arenosa Franca (AF)
Densidad aparente (g.cm-3)	0,75	0,97
Ecotopo	211A	
Unidad cartográfica	Consociación Montenegro (MN)	
Grupo taxonómico	Typic Hapludands	
Material parental	Cenizas volcánicas	

* Valor medio registrado en las profundidades entre 0-30 y >30 cm, al iniciar el estudio (1995).

Tratamientos y diseño experimental. El estudio se llevó a cabo en un lote experimental previamente establecido, donde se evaluó el efecto de las especies forestales sobre la producción del café, cuyos tratamientos fueron: (I) Café a libre exposición solar, (II) Café con sombrío de nogal (*Cordia alliodora*), (III) Café con sombrío de pino (*Pinus oocarpa*) y (IV) Café con sombrío de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), y empleó un modelo de análisis para el diseño de bloques al azar y cuatro replicaciones, donde el factor de bloqueo fue la pendiente del

terreno. Las características de las parcelas se presentan en la Tabla 2. El área total del campo experimental fue de 2,0 ha.

Establecimiento. El estudio se inició en 1994 con el establecimiento de las especies forestales y un año después (octubre de 1995), se estableció el café.

Fertilización de las especies forestales. Al momento de la siembra se aplicaron 70 g de N, P, K en formulación 15-38-10 al fondo del hoyo. No se realizaron posteriores fertilizaciones.

Tabla 2. Características de las parcelas.

Característica	Sistema de cultivo del café	
	Libre exposición	Bajo sombrío
Área de la parcela (m ²)	900	900
Distancia de siembra del café (m)	1,5 x 1,5	1,5 x 1,5
Densidad de siembra del café (plantas/ha)	4.500	4.500
Plantas efectivas de café por parcela	273	273
Distancia de siembra de la especie forestal (m)		6,0 x 6,0
Densidad de siembra del sombrío (plantas/ha)		278
Plantas efectivas de especies forestales por parcela		16

Fertilización del café. Tres meses después de establecido el café se aplicaron 20 g de Urea por planta, 6 meses después se hizo una segunda aplicación de 30 g de Urea por planta. El plan anual de fertilización fue el recomendado en el análisis de suelos: 700 kg.ha⁻¹ de un fertilizante completo (17-6-18-2). Las fertilizaciones se realizaron fraccionando las dosis recomendadas en dos aplicaciones; mitad de la dosis en el primer semestre y la otra, en el segundo semestre del año. El fertilizante se aplicó dentro de la zona gotera de la planta y al sitio de siembra.

Muestreo de suelos. Se seleccionaron cinco puntos de muestreos en cada parcela efectiva; cada punto fue ubicado en el centro formado por cuatro árboles forestales y cuatro plantas de café (Figura 1). En cada punto de muestreo y empleando un barreno tipo “Holandés”, se tomaron muestras de suelo a profundidades variables a 0-30 cm y más de 30 cm.

Para la profundidad 0-30 cm. Se tomaron tres muestras por cada punto de muestreo, una entre 0 y 10 cm, otra entre 10 y 20 cm y la tercera entre 20 y 30 cm de profundidad; con éstas se formó una muestra compuesta. Este procedimiento se realizó a fin de verificar que no se presentaran cambios en el perfil.

Para la profundidad >30 cm. Se tomaron tres muestras por cada punto de muestreo, una entre 30 y 40 cm, otra entre 40 y 50 cm y la tercera entre 50 y 60 cm; con éstas se conformó una muestra compuesta para esta profundidad.

Variables evaluadas. Las variables evaluadas y que indican cambios en el suelo como efecto del establecimiento de las tres especies forestales, fueron: pH, materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg, Al, CIC y contenidos de arena, limo y arcilla. Se hicieron cuatro evaluaciones en los años 1995, 1998, 2002 y 2005, cuando los árboles tenían 1, 4, 8 y 11 años, respectivamente; los muestreos se hicieron en puntos adyacentes al punto seleccionado para la primera evaluación.

Análisis de caracterización de suelos. Los métodos de determinación de las características del suelo fueron: pH (potenciométrico, suelo:agua relación 1:1); N (Semimicro Kjeldahl), M.O. (Walkley Black); K, Ca, Mg y Na (acetato de amonio 1N, pH 7,0 EAA); Al (KCl IM-EAA); Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (acetato de amonio 1 N, pH 7,0 o colorimetría Nessler); P (Bray II, colorimetría Bray Kurtz); granulometría (Boyoucos con pirofosfato de sodio); clasificación diagrama triangular USDA. Las concentraciones de N y M.O. se expresaron en porcentaje (%), las de

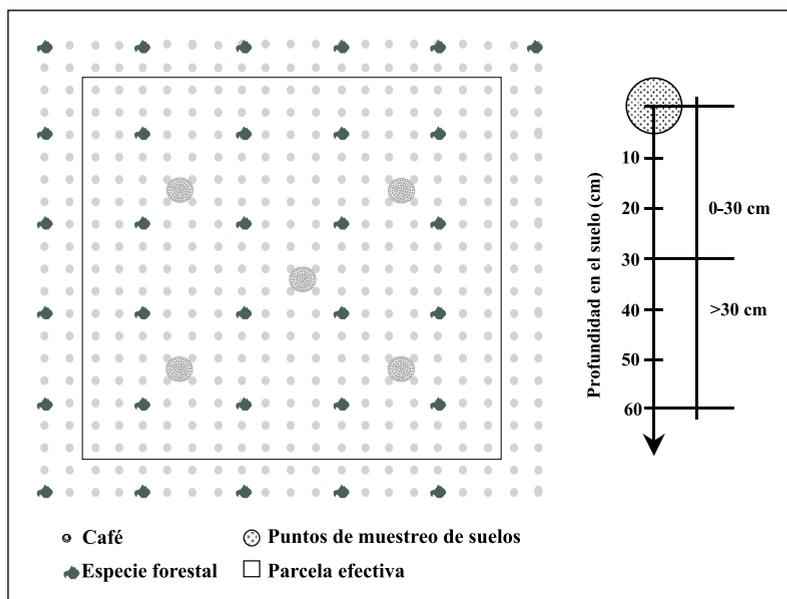


Figura 1.
Puntos de muestreo en cada parcela efectiva

K, Ca, Mg, Al y CIC en $\text{cmol}_{(+)}\cdot\text{kg}^{-1}$, las de P, Fe, Mn, Zn y Cu en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y las variables arcilla, limo y arena en porcentaje (%).

Análisis estadístico. Se hizo un análisis descriptivo y pruebas de comparación (Tukey al 5,0%) entre los registros obtenidos en las cuatro épocas de evaluación de los tratamientos. Se realizaron análisis de correlación entre concentraciones de nutrientes vs. tiempo, CIC vs. materia orgánica y CIC vs. pH del suelo, método estadístico sugerido por Lesschen *et al.* (21).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis de pH, las concentraciones de nutrientes y los porcentajes de arenas, limos y arcillas, registrados en cada sistema de cultivo, se presentan en la Tabla 3. A pesar de haberse realizado análisis para microelementos (Fe, Mn, Zn y Cu), para efectos de la presentación y discusión de los resultados, sólo se hará referencia a macroelementos (N, P, K, Ca y Mg), Al, CIC y materia orgánica del suelo.

pH. Los valores de pH del suelo entre los 0-30 cm y >30 cm de profundidad, no fueron diferentes estadísticamente entre los sistemas de cultivo; es decir, el nogal, el pino o el eucalipto no alteran el pH, si se comparan cuando se cultiva café solo. Hubo diferencias estadísticas entre épocas de evaluación (1, 4, 8 y 11 años después de establecidas las especies forestales) dentro de cada sistema de cultivo, es así como los coeficientes de correlación entre el pH del suelo y el número de años transcurridos, indican relaciones lineales negativas entre las dos variables, en cada uno de los sistemas estudiados, así: entre los 0-30 cm fue de -0,86 para café en monocultivo, de -0,70 en suelos plantados con café y *C. alliodora*, de -0,60 en suelos plantados con café y *P. oocarpa* y de -0,86 en los suelos establecidos con café y *E. grandis*, y >30 cm de -0,67, de -0,65, de -0,75 y de -0,71 para los mismos sistemas de cultivo, lo que permite inferir que con café a libre exposición o con sombrío de nogal, pino u eucalipto, se presenta una disminución del pH del suelo a través del tiempo, hasta los 60 cm de profundidad.

Tabla 3. Concentración de nutrientes en el suelo, registrados en cuatro épocas diferentes (1995, 1998, 2002 y 2005) y cuatro sistemas de cultivo. Estación Experimental Paraguaicito (Quindío).

Ho.	Trat	pH						
		1995	1998	2002	2005	<i>r</i>	Med	C.V.
0-30 cm	Café	5,73	5,55	5,55	5,5	-0,86	5,6 a	7,8
	Nogal	5,8	5,4	5,53	5,4	-0,7	5,5 a	6,2
	Pino	5,7	5,33	5,43	5,4	-0,6	5,5 a	3,7
	Eucal.	5,7	5,43	5,48	5,3	-0,86	5,5 a	6,4
>30 cm	Café	6,1	5,88	5,93	5,9	-0,67	6,0 a	3,2
	Nogal	6,13	5,78	5,9	5,8	-0,65	5,9 a	5,0
	Pino	6,05	5,6	5,65	5,6	-0,75	5,7 b	2,3
	Eucal.	6,23	5,73	5,9	5,7	-0,71	5,9 a	4,1
Ho.	Trat	Fósforo (mg.kg ⁻¹)						
		1995	1998	2002	2005	<i>r</i>	Med	C.V.
0-30 cm	Café	1,25	3,25	5,50	10	0,97	5,00 a	30,1
	Nogal	2,50	4,25	6,75	6	0,90	4,88 a	59,0
	Pino	1,25	3,25	4,00	5	0,97	3,38 b	36,5
	Eucal.	3,00	4,75	6,75	5	0,69	4,88 a	68,9
>30 cm	Café	0,25	2,50	4,25	7	0,99	3,50 b	84,2
	Nogal	12,00	6,00	6,00	5	-0,83	7,25 a	76,3
	Pino	1,75	2,75	4,25	3	0,68	2,94 b	72,2
	Eucal.	4,50	3,25	4,00	5	0,41	4,19 ab	84,0
Ho.	Trat	Magnesio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)						
		1995	1998	2002	2005	<i>r</i>	Med	C.V.
0-30 cm	Café	1,20	1,25	1,10	1,00	-0,89	1,14 a	72,9
	Nogal	1,28	1,05	0,95	1,00	-0,83	1,07 a	40,0
	Pino	0,90	0,90	0,58	0,60	-0,90	0,75 a	54,8
	Eucal.	1,18	0,95	1,10	0,90	-0,64	1,03 a	61,7
>30 cm	Café	0,28	0,63	0,88	0,50	0,49	0,57 a	48,7
	Nogal	0,25	0,53	0,48	0,30	0,09	0,39 b	53,0
	Pino	0,25	0,48	0,53	0,20	-0,07	0,37 b	58,1
	Eucal.	0,28	0,55	0,60	0,40	0,37	0,46 ab	50,8
Ho.	Trat	Arcilla (%)						
		1995	1998	2002	2005	<i>r</i>	Med	C.V.
0-30 cm	Café	19,8	21,3	19,0	16	-0,80	19,0 a	36,8
	Nogal	18,3	17,0	12,0	14	-0,83	15,3 a	33,0
	Pino	17,3	18,8	12,5	12	-0,87	15,2 a	14,7
	Eucal.	16,3	18,0	15,0	14	-0,76	15,8 a	56,0
>30 cm	Café	16,8	21,8	18,0	12	-0,59	17,2 a	62,6
	Nogal	6,0	12,5	11,0	8	0,18	9,4 b	43,8
	Pino	13,8	11,3	10,0	8	-0,98	10,8 ab	51,4
	Eucal.	16,8	17,5	16,0	12	-0,83	15,6 a	79,2

Continúa...

...continuación

Ho.	Trat	Materia orgánica (%)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	6,48	6,33	6,18	6,1	-0,99	6,3 a	19,2
	Nogal	6,53	6,45	6,15	6,8	0,22	6,5 a	12,5
	Pino	6,65	7,58	6,33	7,3	0,10	7,0 a	26,6
	Eucal.	7,50	6,43	6,53	6,0	-0,87	6,6 a	13,5
>30 cm	Café	2,35	3,10	3,00	1,9	-0,33	2,6 ab	38,7
	Nogal	1,50	2,48	2,73	1,5	0,06	2,1 b	35,4
	Pino	1,73	3,13	3,78	2,3	0,35	2,7 a	31,1
	Eucal.	2,08	3,40	3,55	2,4	0,20	2,9 a	30,3
Ho.	Trat	Potasio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	0,54	0,22	0,32	0,58	0,18	0,42 a	61,5
	Nogal	1,07	0,47	0,31	0,46	-0,76	0,58 a	42,6
	Pino	0,45	0,56	0,26	0,26	-0,80	0,38 a	36,8
	Eucal.	1,04	0,43	0,26	0,43	-0,75	0,54 a	56,4
>30 cm	Café	0,80	0,37	0,32	0,22	-0,89	0,43 ab	123,1
	Nogal	2,01	0,60	0,47	0,51	-0,79	0,90 a	73,2
	Pino	0,19	0,39	0,23	0,24	-0,06	0,26 b	58,0
	Eucal.	0,42	0,47	0,40	0,24	-0,79	0,38 ab	73,9
Ho.	Trat	Aluminio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	0,10	0,10	0,20	0,2	0,92	0,15 a	65,7
	Nogal	0,05	0,18	0,25	0,3	0,98	0,20 a	132,8
	Pino	0,08	0,20	0,28	0,3	0,96	0,22 a	76,9
	Eucal.	0,05	0,13	0,30	0,3	0,96	0,20 a	139,4
>30 cm	Café	0,03	0,10	0,05	0,4	0,77	0,15 a	105,2
	Nogal	0,05	0,08	0,10	0,4	0,83	0,16 a	87,9
	Pino	0,05	0,13	0,13	0,3	0,89	0,15 a	93,3
	Eucal.	0,03	0,10	0,08	0,3	0,83	0,13 a	116,1
Ho.	Trat	Limo (%)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	15,5	26,8	20,5	18	0,00	20,2 a	41,8
	Nogal	15,0	15,5	22,3	20	0,83	18,2 a	13,2
	Pino	15,5	17,0	23,0	20	0,79	18,9 a	21,8
	Eucal.	17,0	16,0	22,3	18	0,48	18,3 a	17,7
>30 cm	Café	20,3	19,8	20,3	20	-0,08	20,1 a	35,4
	Nogal	15,8	23,5	24,3	18	0,23	20,4 a	21,8
	Pino	19,3	25,0	24,5	16	-0,30	21,2 a	26,1
	Eucal.	18,5	23,0	22,3	18	-0,12	20,5 a	17,1

Continúa...

...continuación

Ho.	Trat	Nitrógeno (%)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	0,24	0,28	0,27	0,27	0,66	0,27 a	28,3
	Nogal	0,27	0,23	0,27	0,29	0,61	0,27 a	23,0
	Pino	0,28	0,32	0,28	0,31	0,29	0,30 a	35,1
	Eucal.	0,30	0,21	0,29	0,26	-0,13	0,27 a	29,3
>30 cm	Café	0,07	0,15	0,15	0,10	0,32	0,12 bc	31,6
	Nogal	0,07	0,12	0,14	0,09	0,36	0,11 c	15,4
	Pino	0,08	0,15	0,18	0,12	0,46	0,13 ab	27,9
	Eucal.	0,09	0,16	0,17	0,12	0,33	0,14 a	18,6
Ho.	Trat	Calcio(cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	7,95	7,43	5,93	5,4	-0,99	6,68 a	59,7
	Nogal	7,68	4,38	4,25	4,8	-0,69	5,28 ab	43,3
	Pino	5,98	4,28	3,23	4,2	-0,73	4,42 b	33,3
	Eucal.	6,10	4,60	5,00	4,3	-0,79	5,00 ab	46,7
>30 cm	Café	4,23	5,50	4,95	3,5	-0,41	4,55 a	31,3
	Nogal	2,80	2,63	3,00	2,3	-0,45	2,68 b	67,2
	Pino	2,35	2,38	3,03	1,5	-0,36	2,32 b	35,7
	Eucal.	2,40	3,63	3,33	2,7	0,12	3,02 b	45,4
Ho.	Trat	C.I.C(cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	18,0	15,8	17,0	17	-0,21	17,0 a	21,9
	Nogal	16,5	14,3	16,5	17	0,43	16,1 a	17,4
	Pino	18,3	16,0	17,0	15	-0,78	16,6 a	16,6
	Eucal.	18,3	14,5	17,3	19	0,36	17,3 a	25,0
>30 cm	Café	13,0	13,8	14,3	13	0,12	13,5 a	32,2
	Nogal	12,0	11,3	12,3	12	0,35	11,9 a	39,8
	Pino	11,8	12,0	12,8	12	0,48	12,2 a	27,4
	Eucal.	11,3	13,3	12,5	15	0,83	13,0 a	28,1
Ho.	Trat	Arena (%)						
		1995	1998	2002	2005	r	Med	C.V.
0-30 cm	Café	64,8	52,0	60,5	66	0,28	60,8 b	19,9
	Nogal	66,8	67,5	65,8	66	-0,70	66,5 a	7,1
	Pino	67,3	64,3	64,5	68	0,17	66,0 ab	6,0
	Eucal.	66,8	66,0	62,8	68	-0,01	65,9 ab	12,4
>30 cm	Café	63,0	58,5	61,8	68	0,61	62,8 a	17,4
	Nogal	78,3	64,0	64,8	74	-0,21	70,3 a	5,6
	Pino	67,0	63,8	65,5	76	0,67	68,1 a	15,7
	Eucal.	64,8	59,5	61,8	70	0,51	64,0 a	24,6

*Valores con diferente letra en las columnas, denotan diferencia estadística (Tukey 0,05). r: Coeficiente de correlación

Villeda (42), obtuvo resultados similares en café con sombrío de pino después de cuatro años, León *et al.* (20) tuvo este tipo de registros en suelos con pastos y suelos con *P. patula* a los 15 años de edad y con *E. grandis* de 2 y 5 años, y Moreno (23) en potreros y plantaciones de *P. patula* a los de 10 años de edad. Bewket y Stroosnijder (4) encontraron que los valores de pH eran iguales en los primeros 30 cm en suelos cultivados con pastos y con eucaliptos a los pH de suelos con bosques naturales, y Alfaro *et al.* (1) encontraron que en la capa superficial del suelo plantado con bosque de 17 años de edad, la cobertura vegetal no afectó el pH del suelo.

Carrasco *et al.* (7), en plantaciones de *Eucalyptus* sp., Neirynek *et al.* (26) en *P. nigra* y *P. sylvestris*, Rhoades y Binkley (32) y Binkley (6) en *Eucalyptus salign*, y Jonsson *et al.* (19) en plantaciones de *Picea abies* y *P. sylvestris*, encontraron que después de 12 años de establecidos y en los primeros 30 cm del suelo, el pH tenía una correlación inversa con el aumento en la edad de las plantas. Dijkstra (12) afirma que la distribución y la abundancia de la especie alteran el patrón espacial y temporal de la acidez del suelo; Jobbágy y Jackson (18) en plantaciones de eucalipto de 10 a 100 años de edad, y Parfitt *et al.* (28) en plantaciones de *Pinus radiata* de 1,5 años, encontraron a mayor profundidad del suelo valores más bajos de pH, comparado con el pH del suelo cultivado en pastos.

Materia orgánica. No hubo diferencias estadísticas entre los contenidos de materia orgánica en el suelo bajo cada sistema de cultivo, en los primeros 30 cm del perfil, es decir, que el empleo de nogal, pino o eucalipto como sombrío en café, no altera los contenidos de materia orgánica del suelo, si se compara cuando se cultiva café en monocultivo.

En cuanto a las épocas de evaluación, 1, 4, 8 y 11 años después de establecidas las especies forestales, se registraron diferencias estadísticas en un mismo sistema de cultivo; los coeficientes de correlación entre los contenidos de materia orgánica del suelo y el número de años transcurridos, muestran relaciones lineales negativas entre las dos variables, en los sistemas café en monocultivo (-0,99) y en la asociación café con eucalipto (-0,87), y lineales positivas en los sistemas café con nogal (0,22) y café con pino (0,10), es decir, en los dos primeros disminuyen los contenidos de materia orgánica a profundidades entre 0–30 cm, y en los otros dos aumentan los contenidos de MO, después de 11 años de establecidos los cultivos.

A profundidades del suelo mayores a 30 cm, los resultados de los análisis mostraron que los contenidos de materia orgánica fueron menores en el sistema café con pino, al compararse con el sistema café-nogal. Los coeficientes de correlación entre el porcentaje de materia orgánica del suelo y el incremento en el tiempo, indican relaciones lineales negativas entre las dos variables en el sistema café a libre exposición solar y que las especies arbóreas no tuvieron ninguna inferencia en estos contenidos y a estas profundidades del suelo.

En suelos con bosque, después de 17 años, el material vegetal depositado no afecta el contenido de materia orgánica (1). En plantaciones de acacia, entre 3 y 18 años de edad, Deans *et al.* (11), obtuvieron correlaciones directas entre el contenido de materia orgánica y la edad de las plantas, en los horizontes superficiales del suelo, y Villeda (42) en un sistema agroforestal de café bajo sombrío de pino, registró disminuciones graduales en los contenidos de materia orgánica después de cuatro años de establecido el sistema de producción.

Nitrógeno (N). Hasta los 30 cm de profundidad, las concentraciones de N no mostraron diferencias significativas entre los sistemas de cultivo del suelo, es decir, las especies forestales estudiadas no tuvieron efectos sobre las concentraciones de N, si se compara con las concentraciones registradas en el suelo sin árboles de sombrío. Sin embargo, se presentaron diferencias entre épocas de evaluación dentro de un mismo sistema de cultivo; los coeficientes de correlación entre los períodos de evaluación y las concentraciones de N, mostraron una relación lineal positiva en los sistemas café solo, café con nogal y café con pino (0,66; 0,61 y 0,29, respectivamente) y negativas en el sistema café con eucalipto (-0,13), lo que indica que en los tres primeros, las concentraciones de N aumentan y en el cuarto disminuyen, al incrementarse el tiempo de establecimiento de los árboles.

Stáhl *et al.* (35), encontraron que en un periodo de 22 meses, la concentración de N en el suelo era más alta en cultivos de *Sesbania* sp. que en cultivos de *Calliandra*, *Eucalyptus* y *Grevillea*; Amatya *et al.* (2) y Chang *et al.* (10), observaron que el N del suelo era más alto en suelos con pasto raygrass (*Lolium perenne*) que en suelos con *P. radiata*, en los primeros 20 cm del suelo; Alfaro *et al.* (1), encontraron que en la capa superficial del suelo plantado con bosque de 17 años, eran mayores los contenidos de N, que suelos establecidos con pastizales, y Bewket y Stroosnijder (4) concluyeron que en los suelos cultivados con pastos y eucalipto las concentraciones de N eran más bajas en los primeros 30 cm, que los suelos con bosques naturales.

Villeda *et al.* (42), en un sistema de cultivo de café con sombrío de pino, encontraron relaciones directas entre las concentraciones de N del suelo y el aumento en la edad de las plantas; resultados similares reportan

Deans *et al.* (11), quienes en plantaciones de acacia, entre 3 y 18 años de edad, encontraron correlaciones directas entre la concentración de N y el aumento en la edad de los árboles; no obstante, Moroni *et al.* (24) en *Eucalyptus nitens*, Neiryck *et al.* (26) en *P. nigra* y *P. sylvestris*, obtuvieron correlaciones inversas entre la concentración de N en las capas superficiales del suelo, por incremento en la edad de los árboles. Tornquist *et al.* (37), en una evaluación de los cambios químicos en el suelo en plantaciones de *Vochysia ferruginea*, *V. guatemalensis*, *Stryphnodendron microstachyum* y *Hieronyma alchorneoides*, comparados con pastos, observaron que las concentraciones de N en los primeros 15 cm del suelo, eran mayores en los bosques y que esta concentración tenía una correlación directa con la edad de los árboles (hasta 25 años).

A profundidades del suelo mayores a los 30 cm, son menores las concentraciones de N en el sistema café con nogal, si se compara con los sistemas café con pino y eucalipto. Se presentaron diferencias estadísticas en cuatro períodos de evaluación dentro de un mismo sistema, es así como las correlaciones entre concentración de N y tiempo, indican relaciones lineales positivas entre las dos variables dentro de cada sistema, así: 0,32 con café en monocultivo, 0,36 con café y nogal, 0,46 con café y pino, y 0,33 con café y eucalipto, lo que sugiere que a profundidades del suelo superiores a los 30 cm, las concentraciones de N aumentan al incrementarse el tiempo de establecimiento del café y las especies forestales.

Ulery *et al.* (38) en *Quercus dumosa*, *Adenostoma fasciculatum*, *Ceanothus crassifolia* y *Pinus coulteri*, a profundidades de 1,0 m del suelo, encontraron relaciones directas entre las concentraciones de N y el aumento en la edad de los árboles; sin embargo Carter *et al.* (8) en *Pinus taeda*, no observaron

efecto del establecimiento del pino sobre las concentraciones de N en los primeros 60 cm del suelo, después de dos años.

Fósforo (P). Las concentraciones de P del suelo a profundidades entre 0-30 cm, no evidenciaron diferencias en los sistemas de cultivo de café a libre exposición solar, café con nogal y café con eucalipto, es decir, que las concentraciones de P más bajas, se registraron en el suelo cultivado con café y pino. Los análisis de varianza indican diferencias estadísticas entre períodos de evaluación dentro de cada sistema de cultivo, y los coeficientes de correlación entre la concentración de P y los años, indican relaciones lineales directas entre las dos variables, en cada uno de los sistemas estudiados, así: 0,97 con café en monocultivo, 0,90 en suelos plantados con café y *C. alliodora*, 0,97 en suelos plantados con café y *P. oocarpa*, y 0,69 en los suelos establecidos con café y *E. grandis*; lo que permite inferir que bajo cualquier sistema de cultivo con café se presenta un aumento en las concentraciones de P del suelo a través del tiempo, a esta profundidad.

Velasco *et al.* (41), encontraron que las concentraciones de P en el suelo fueron mayores en pasturas con *Acacia mangium* que en la pastura en monocultivo y en altas densidades de *A. mangium*. Deans *et al.* (11) en plantaciones de acacia, entre 3 y 18 años de edad, Tornquist *et al.* (37) en cultivos de *Vochysia ferruginea*, *V. guatemalensis*, *Stryphnodendron microstachyum* y *Hieronyma alchorneoides*, Binkely *et al.* (5) en *Eucalyptus saligna*, y Villeda *et al.* (42) en cultivos de pino como sombrío en café, obtuvieron correlaciones directas entre la concentración de P y el aumento en la edad de las plantas, en los horizontes superficiales del suelo.

A profundidades del suelo mayores a 30 cm, las concentraciones de P son más altas en el suelo cultivado con café y nogal, en

comparación con los sistemas café libre exposición y café con pino. Estos resultados también mostraron diferencias entre períodos de evaluación dentro de un mismo sistema de cultivo, los cuales se confirmaron con las correlaciones entre concentración de P y tiempo de establecimiento de los árboles. Estos análisis indican relaciones lineales directas en los sistemas café en monocultivo (0,99), café con sombrío de pino (0,68) y café con sombrío de eucalipto (0,41), y correlaciones negativas en el sistema café con nogal (-0,83). Pavan y Androcioni (30) en suelos cultivados con café, y Paniagua *et al.* (27) en sistemas agroforestales, observaron que, a excepción del P residual, todas las otras fracciones de P decrecieron al incrementar la profundidad del suelo.

Potasio (K). Las concentraciones de K en el suelo hasta los 30 cm, no fueron diferentes entre los sistemas de cultivo. Los análisis de varianza indican diferencias entre épocas de evaluación; los coeficientes de correlación entre la concentración de K y el número de años transcurridos, indican relaciones lineales negativas entre las dos variables y los sistemas de cultivo café con especies forestales (-0,76 con nogal, -0,80 con pino y -0,75 con eucalipto) y correlaciones positivas en café en monocultivo (0,18), es decir, solamente con café se incrementa la concentración de potasio en el suelo y ésta se reduce al establecer café sombrío con nogal, pino o eucalipto.

Bewket y Stroosnijder (4), observaron en suelos cultivados con pastos y con eucaliptos, concentraciones más bajas de K en los primeros 30 cm, que en suelos con bosques naturales, y Alfaro *et al.* (1) concluyeron que la capa superficial del suelo plantado con bosque de 17 años, presentaba mayores contenidos de K que suelos establecidos con pastizales. En plantaciones comerciales de *Pinus nigra* y *P. sylvestris*, de

Quercus dumosa, *Adenostoma fasciculatum*, *Ceanothus crassifolia* y *Pinus coulteri*, de *Picea abies* y *P. sylvestris*, y en plantaciones de *Pinus patula* y *P. taeda*, se presentan relaciones inversas entre las concentraciones de K en los horizontes superficiales del suelo y el aumento en la edad de los árboles (19, 23, 26, 33, 38); contrario a los reportados por Deans *et al.* (11), quienes obtuvieron correlaciones directas entre la concentración de K y el aumento en la edad, de 3 y 18 años, de *Acacia* sp.

Las concentraciones de K a profundidades mayores de 30 cm, fueron diferentes estadísticamente entre las cuatro épocas de evaluaciones dentro de cada sistema. Los coeficientes de correlación entre la concentración de K y el incremento en el tiempo indican relaciones lineales negativas entre las dos variables y en los sistemas de cultivo café a libre exposición solar (-0,89), café con *C. alliodora* (-0,79) y café con *E. grandis* (-0,79); lo que indica que bajo cualquiera de estos tres sistemas de cultivo, se presenta una reducción en la concentración de K del suelo a través del tiempo. El K participa en procesos fotosintéticos (por ejemplo, mayor asimilación de CO₂); la formación de glucósidos, mejora la migración de éstos hacia los órganos de reserva, lo que influye sobre la calidad del grano; aumenta la elaboración de prótidos a partir del N mineral, permitiendo una mejor utilización del fertilizante nitrogenado; reduce la transpiración y contribuye a mantener la turgencia celular, dando a la planta cierta resistencia al marchitamiento (16, 40).

Calcio (Ca). Las concentraciones de Ca del suelo en los primeros 30 cm de profundidad, fueron diferentes en los sistemas de café a libre exposición solar y café con sombrero de pino. Los análisis de varianza indican diferencias estadísticas entre períodos de evaluación dentro de cada sistema de cultivo;

la correlación de la concentración de Ca en el suelo y el número de años transcurridos después del establecimiento de los árboles de sombrero, indica relaciones lineales inversas entre las dos variables, en todos los sistemas estudiados, así: -0,99 en monocultivo de café, -0,69 en suelos plantados con café y *C. alliodora*, -0,73 en suelos plantados con café y *P. oocarpa*, y -0,79 en los suelos establecidos con café y *E. grandis*; lo que permite inferir que bajo cualquier sistema de cultivo con café se presenta una disminución en las concentraciones de Ca del suelo a través del tiempo.

Alfaro *et al.* (1) observaron que la capa superficial del suelo plantado con bosque de 17 años presentaba mayores contenidos de Ca que suelos establecidos con pastizales, y suelos cultivados con pastos y eucaliptos presentaron concentraciones de Ca más bajas en los primeros 30 cm, que suelos con bosque natural (4). Neiryneck *et al.* (26) en plantaciones de *Pinus nigra* y *P. sylvestris*; Jonsson *et al.* (19) en cultivos de *Picea abies* y *P. sylvestris*, y Richter *et al.* (33) en plantaciones de *Pinus taeda*, encontraron que la concentración de Ca en los primeros 30 cm del suelo tiene una correlación inversa con el aumento en la edad de las plantas; sin embargo, Villeda *et al.* (42) obtuvieron correlaciones directas con las mismas variables pero en cultivos de café asociado con pino, utilizado como árbol de sombrero.

Los análisis de la concentración de Ca a profundidades del suelo mayores de 30 cm, mostraron que ésta es mayor en el suelo cultivado con café a libre exposición solar, es decir, que el asocio de cualquiera de las tres especies de árboles, reduce las concentraciones de Ca a profundidades del suelo superiores a 30 cm. Estos resultados también mostraron diferencias entre períodos de evaluación dentro de un mismo sistema de cultivo y confirmaron las correlaciones

entre concentración de Ca y tiempo de establecimiento de los árboles. Estos análisis también indicaron relaciones lineales inversas en los sistemas café en monocultivo (-0,41), café con sombrío de nogal (-0,45) y café con sombrío de pino (-0,36), y relaciones directas en el sistema café con eucalipto (0,12). La distribución y la densidad de especies de árboles, así como la calidad y cantidad de los residuos vegetales, determinan la concentración y contenido de Ca disponible para las plantas (12).

Magnesio (Mg). Las concentraciones de Mg del suelo entre sistemas de cultivo y en los primeros 30 cm, no mostraron diferencias significativas, por lo que se puede incluir que el nogal, el pino o el eucalipto no alteran las concentraciones de Mg, si se compara cuando se cultiva solamente con café. Los análisis de varianza indican diferencias entre épocas de evaluación dentro de cada sistema de cultivo; los coeficientes de correlación entre la concentración de Ca del suelo y el número de años transcurridos, indican relaciones lineales negativas entre las dos variables, en cada uno de los sistemas estudiados: -0,89 con café en monocultivo, -0,83 en suelos plantados con café y *C. alliodora*, -0,90 en suelos plantados con café y *P. oocarpa*, y -0,64 en los suelos establecidos con café y *E. grandis*; lo que permite concluir que bajo cualquier sistema de cultivo con café se presenta una disminución en la concentración de Mg del suelo a través del tiempo a profundidades entre 0 y 30 cm.

La concentración de Mg a profundidades del suelo superiores a 30 cm, fue mayor en el suelo cultivado con café a libre exposición solar, al compararse con las concentraciones de Mg del suelo cuando se establecen como sombrío nogal y pino. Se presentaron diferencias estadísticas entre períodos de evaluación dentro de un mismo sistema de cultivo y se confirmaron con las

correlaciones entre concentración de Mg y tiempo de establecimiento de los árboles. Estos análisis indican relaciones lineales directas en los sistemas café en monocultivo (0,49) y café con sombrío de eucalipto (0,37); el establecimiento de café con sombrío de nogal y pino parecen no tener ningún efecto sobre las concentraciones de Mg del suelo, a profundidades superiores a 30 cm ($r= 0,09$ y $-0,07$ respectivamente).

La capa superficial del suelo plantado con bosque de 17 años presentó mayores contenidos de Mg que los suelos establecidos con pastizales (1), y en los primeros 30 cm del suelo las concentraciones de Mg son más bajas en suelos cultivados con pastos y eucaliptos y en pastos más *P. patula*, que en bosques naturales (4, 23). Estudios realizados por Neiryneck *et al.* (26) en cultivos de *Pinus nigra* y *P. sylvestris*, por Jonsson *et al.* (19) en plantaciones de *Picea abies* y *P. sylvestris*, por Villeda *et al.* (42) en *Pinus* sp., y por Richter *et al.* (33) en *P. taeda*, obtuvieron correlaciones inversas entre las concentraciones de Mg hasta los 60 cm de profundidad del suelo y el incremento de la edad de los árboles; Ulery *et al.* (38) en *Quercus dumosa*, *Adenostoma fasciculatum*, *Ceanothus crassifolia* y *Pinus coulteri*, a profundidades de 1,0 m del suelo, encontraron relaciones directas entre las concentraciones de Mg y el aumento en las edad de las plantas.

Aluminio (Al). Las concentraciones de Al en el suelo hasta 30 cm, no mostraron diferencias significativas entre los sistemas de cultivo; es decir, las especies forestales estudiadas no tuvieron efectos sobre las concentraciones de Al, si se compara con las concentraciones registradas en el suelo sin árboles de sombrío. Se presentaron diferencias estadísticas entre épocas de evaluación dentro de un mismo sistema de cultivo; los coeficientes de correlación entre los períodos de evaluación

(1, 4, 8 y 11 años después de establecidas las especies forestales) y las concentraciones de Al, mostraron relaciones lineales positivas en cada uno de los sistemas estudiados: 0,92 con café sin árboles de sombrío, 0,98 con café y nogal, y de 0,96 con café y pino y café con eucalipto, lo cual indica que bajo cualquier sistema de cultivo del suelo, con o sin especies forestales y café, se presentan incrementos en las concentraciones de Al, a medida que pasa el tiempo de establecimiento de las plantas.

A profundidades del suelo superiores a los 30 cm, no hubo diferencias significativas en las concentraciones de Al, como efecto de asociar especies forestales al café como sombrío o en sistema de monocultivo de café. Hubo diferencias estadísticas entre los cuatro periodos de evaluación dentro de un mismo sistema; las correlaciones entre concentración de Al y tiempo indicaron relaciones lineales directas entre las dos variables dentro de cada sistema: 0,77 con café en monocultivo, 0,83 con café y nogal, 0,89 con café y pino y 0,83 con café y eucalipto, lo que indica que a profundidades del suelo superiores a los 30 cm, las concentraciones de Al aumentan, al incrementarse el tiempo de establecimiento del café y las especies forestales.

En plantaciones de *Picea abies*, *P. sylvestris* y *Pinus* sp., después de 12 años de establecidas y en los primeros 30 cm del suelo, la concentración de Al mostró correlaciones directas con el aumento en la edad de las plantas (19, 42). En cultivos de *P. patula*, mayores de 10 años, Moreno (23) registró concentraciones de Al más bajas respecto a suelos cultivados con pastos.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). La CIC del suelo entre los 0-30 cm, no mostró diferencias significativas entre los sistemas de cultivo, es decir, las especies forestales estudiadas no tuvieron efectos sobre la CIC,

si se compara con los valores registrados en el suelo de un cafetal a libre exposición solar. Se presentaron diferencias entre épocas de evaluación dentro de un mismo sistema de cultivo; los coeficientes de correlación entre los periodos de evaluación y la CIC, mostraron relaciones lineales positivas en los sistemas de cultivo del café con nogal y eucalipto ($r= 0,43$ y $0,36$ respectivamente), y relaciones lineales negativas en los suelos establecidos con café a libre exposición solar ($r= -0,21$) y café con pino ($r= -0,78$); lo que indica que en los dos primeros sistemas la CIC aumenta al incrementarse el tiempo de establecimiento del café y las especies forestales, mientras que en los otros dos sistemas la CIC disminuye.

A profundidades del suelo superiores a los 30 cm, no hay diferencias significativas en la CIC del suelo, como efecto de asociar o no especies forestales al café como sombrío. Se presentaron diferencias estadísticas entre los cuatro periodos de evaluación dentro de un mismo sistema; las correlaciones entre la CIC y tiempo, indicaron relaciones lineales directas entre las dos variables dentro de cada sistema: 0,12 con café en monocultivo, 0,35 con café y nogal, 0,48 con café y pino y 0,83 con café y eucalipto, lo que indica que a profundidades del suelo superiores a los 30 cm, la CIC aumenta, al incrementarse el tiempo de establecimiento del café y las especies arbóreas.

Bewket y Stroosnijder (4) en suelos cultivados con pastos y eucaliptos, y Moreno (23) en plantaciones de *P. patula* con pastos, registraron valores de CIC más bajos con respecto a bosques naturales. Ludwig *et al.* (22) afirman que en suelos plantados con *Eucalyptus* sp., después de cuatro años de establecidos y a profundidades del suelo de 0-20 y 20-40 cm, la CIC muestra una correlación inversa con el aumento en la edad de los árboles, y Ulery *et al.* (38) en *Quercus*

dumosa, *Adenostoma fasciculatum*, *Ceanothus crassifolia* y *P. coulteri*, a profundidades de 1,0 m del suelo, encontraron relaciones directas entre la CIC y el aumento en la edad de las plantas.

CIC y materia orgánica del suelo. En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de correlación (*r*) entre la CIC y la materia orgánica del suelo (%), en cada sistema de cultivo estudiado en un período de 11 años.

Los coeficientes de correlación entre la CIC y los contenidos de materia orgánica del suelo en la profundidad 0-30, en cuatro épocas diferentes y en un período de 11 años, indicó relaciones directas entre las dos variables en los sistemas de cultivo café a libre exposición y café con nogal, e inversas en el sistema café con pino. La CIC del suelo cultivado con café solo disminuye al reducirse el contenido de materia orgánica y en el sistema café con nogal, la CIC aumentó al incrementar la cantidad de materia orgánica. En el suelo establecido con café y pino, la CIC disminuye al aumentar los contenidos de materia orgánica en el suelo.

CIC vs. pH. Los coeficientes de correlación (*r*) entre la CIC y el pH del suelo, en cada sistema de cultivo estudiado, en un período de 11 años, se presentan en la Tabla 5.

Los coeficientes de correlación entre la CIC y el pH del suelo a profundidades entre 0-30 cm, en cuatro épocas diferentes y en un período de 11 años, mostró relaciones lineales directas entre las dos variables en los sistemas de cultivo café a libre exposición y café con nogal. Los valores de CIC del suelo cultivado con café y con café y pino se reducen al disminuir el pH del suelo; en el sistema café con eucalipto no se registraron correlaciones entre las variables analizadas.

Salako y Tian (34), en bosques de *Alchornea cordifolia*, *Baphia pubescens*, *Calliandra calothyrsus*, *Dactyladenia barteri*, *Dialium guineense*, *Grewia pubescens*, *Inga edulis*, *Irvingia gabonensis*, *Nauclea diderrichii*, *Pterocarpus santalinoides* y *Treculia africana*, de siete años de edad, concluyeron que los cambios en las características químicas de los suelos, están más ligadas a las características intrínsecas de los suelos, que al mismo efecto de los árboles.

Arcilla, limo y arena en el suelo. No se presentaron diferencias estadísticas entre los cuatro sistemas de cultivo en cuanto a los porcentajes de limo y arcilla hasta los 30 cm de profundidad, es decir, que las especies estudiadas no afectan estas propiedades del suelo, si se compara con el suelo cultivado con solo café. Los coeficientes de correlación entre las variables arcilla y limo y tiempo

Tabla 4. Coeficientes de correlación (*r*) entre la CIC y los contenidos de materia orgánica del suelo, en cuatro sistemas de cultivo.

Profundidad	Café solo	Café-Nogal	Café-Pino	Café-Eucalipto
	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>
0-30 cm	0,31	0,24	-0,70	0,10
>30 cm	0,87	-0,12	0,86	0,07

Tabla 5. Coeficientes de correlación (r) entre la CIC y pH del suelo en cuatro sistemas de cultivo.

Profundidad	Café solo	Café-Nogal	Café-Pino	Café-Eucalipto
	r	r	r	r
0-30 cm	0,68	0,33	0,83	0,05
>30 cm	-0,45	0,42	-0,43	-0,89

de establecimiento de los árboles y el café, indicaron relaciones inversas en el primer caso y directas en el segundo, lo cual indica que en cualquier sistema de cultivo del café, libre exposición solar o con especies forestales, los porcentajes de arcillas disminuyen, mientras que los porcentajes de limo aumentan al incrementarse el tiempo de plantados los árboles. En cuanto a los contenidos de arena se presentaron relaciones lineales directas en los sistemas de cultivo café a libre exposición solar y café con pino, e inversas en el sistema café con nogal.

A profundidades superiores a 30 cm, se incrementaron los porcentajes de arcilla en el sistema café a libre exposición solar si se compara con el sistema café con nogal. Los sistemas de cultivo bajo sombrío con especies forestales no tuvieron ninguna influencia sobre los porcentajes de limo en el suelo. Los análisis de correlación indicaron relaciones lineales inversas entre el contenido de arcilla y tiempo de establecimiento en los sistemas café a libre exposición solar, café con pino y café con eucalipto, e inversas en el sistema café con nogal. Iguales correlaciones se presentaron entre los porcentajes de limo y tiempo de establecimiento de las plantas.

Gómez *et al.* (15), encontraron que las plantaciones de *Quercus* sp. y *Pinus* sp., no modificaban las características físicas del suelo. Resultados similares fueron registrados por Carrasco *et al.* (7), en praderas reforestadas

con *Eucalyptus* sp., y por Villeda *et al.* (42) en sistemas agroforestales de café con sombrío de *Pinus* sp. Bewket y Stroosnijder (4) observaron contenidos más altos de arena en los primeros 30 cm en suelos cultivados con pastos y con eucaliptos, que en suelos en bosques naturales.

Requerimiento del café vs. valores registrados en los sistemas evaluados. Los valores para cada variable evaluada al inicio del estudio (1995) y al final de éste (2005), así como los rangos óptimos reportados por Valencia y Carrillo (39) para el café, se comparan en las Tablas 6 y 7.

Al comparar los valores recomendados y los encontrados en la zona experimental, se observa que:

- El pH disminuye en cualquier sistema de cultivo del café. Al final del período, el pH no es limitante para la productividad del café y, por el contrario, se mantiene dentro de los rangos óptimos definidos para el cultivo.
- Los valores iniciales de materia orgánica y P, se encontraron por debajo de los rangos óptimos establecidos para el desarrollo del café, condición que no obedece al cultivo del café, solo o en asocio con las especies forestales, sino a las propiedades químicas naturales de los suelos donde se realizó el estudio.

Tabla 6. Condiciones químicas de suelos aptos para café, en los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

Característica	Condiciones químicas adecuadas para el cultivo		
	Condición de alerta	Condición apta	Problema aparente
pH	4,0 – 4,9	5,0 – 5,5	> 5,6
Materia orgánica (%)	9,0 – 11,4	> 11,5	—
Fósforo (mg.kg ⁻¹)	0,0 – 6,0	6,0 – 14,0	> 14,0
Potasio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,0 – 0,29	0,30 – 0,40	> 0,41
Calcio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,0 – 1,6	1,6 – 4,2	> 4,2
Magnesio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,0 – 0,5	0,0 – 1,4	> 1,4
Aluminio (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	—	0,0 – 1,0	> 1,1
C.I.C. (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	2,0 – 5,0	6,0 - 10	—

- Los niveles de K⁺ en el suelo, al final del periodo, disminuyeron significativamente (entre el 42% y 59%), en las parcelas establecidas con café y sombrío de especies forestales, siendo mas crítica esta disminución con sombrío de pino, donde los valores de K⁺ estuvieron por debajo del nivel mínimo establecido para café, condición de cuidado, dadas las funciones que este elemento cumple en la planta.

- Las concentraciones Ca²⁺ y Mg²⁺, disminuyeron en el período de evaluación, tanto en los suelos establecidos con solo café como en los que se establecieron con café y especies forestales; pero al final del período las concentraciones registradas no indicaron limitante aparente para el desarrollo del café.

- Si bien las concentraciones de Al³⁺ aumentan, éstas en ningún caso llegaron a estar por encima de los niveles máximos tolerables.

Consideraciones generales. Para los suelos donde se realizó el estudio, con una alta fertilidad natural, las concentraciones de nutrientes observados después de 10 años, a excepción de la parcela en asocio con pino, no afectan las necesidades nutritivas del café.

Basados en los cambios observados en las concentraciones de las bases cambiables (K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), al final del periodo, se pone de manifiesto que las especies forestales son grandes consumidoras de nutrientes, principalmente de K⁺.

La solución a esta situación de competencia impuesta por las especies forestales por el potasio, es mantener, con ayuda de los análisis de suelos, por lo menos cada dos años, el mantenimiento del potasio en el suelo, a unos niveles que no afecten los requerimientos nutricionales del café.

Tabla 7. Condiciones químicas registradas en suelos cultivados en sistemas agroforestales con café y café solo, después de 10 años, en los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

Característica	Café		Nogal		Pino		Eucalipto	
	1995	2005	1995	2005	1995	2005	1995	2005
	pH (unidades)	5,73±0,61	5,50±0,66	5,80±0,55	5,40±0,35	5,70±0,34	5,40±0,13	5,70±0,57
M.O. (%)	6,48±1,28	6,10±1,77	6,53±0,89	6,80±1,51	6,65±2,29	7,30±0,85	7,50±1,73	6,00±1,00
P (mg.kg ⁻¹)	1,25±0,80	10,0±0,28	2,50±3,05	6,0±3,45	1,25±0,80	5,0±2,23	3,00±4,31	5,00±2,88
K (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,54±0,81	0,58±0,03	1,07±0,93	0,46±0,02	0,45±0,23	0,26±0,14	1,04±1,09	0,43±0,09
Ca (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	7,95±8,55	5,40±2,74	7,68±8,20	4,80±1,16	5,98±4,85	4,20±0,35	6,10±5,59	4,30±1,75
Mg (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	1,20±1,68	1,00±0,81	1,28±1,31	1,00±0,44	0,90±1,28	0,60±0,27	1,18±1,78	0,90±0,42
Al (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	0,10±0,18	0,20±0,26	0,05±0,16	0,30±0,14	0,08±0,15	0,30±0,23	0,05±0,16	0,30±0,47
C.I.C. (cmol ₍₊₎ .kg ⁻¹)	18,0±5,81	17,0±7,57	16,5±6,56	17,0±2,53	18,3±6,14	15,0±1,40	18,3±9,40	19,0±6,44

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Santiago Gaona J. M.Sc. por sus valiosos aportes.

LITERATURA CITADA

1. ALFARO., E. A.; ALVARADO., A.; CHAVERRI, A. Cambios edáficos asociados a tres etapas sucesionales de Bosque tropical seco en Guanacaste, costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 25(1):7-20. 2001.
2. AMATYA G.; CHANG S. X.; BEARE M. H.; MEAD D. J. Soil properties under a *Pinus radiata* – ryegrass silvopastoral system in New Zealand. Part II. C and N of soil microbial biomass, and soil N dynamics. *Agroforestry Systems*, 54(2):149-160. 2002.
3. BEER, J. W. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems*, 5(1):3-13. 1987.
4. BEWKET W.; STROOSNIJDER L. Effects of agroecological land use succession on soil properties in Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia *Geoderma*, 111(1):85-98. 2003.
5. BINKLEY D.; GIARDINA C.; BASHKIN M. A. Soil phosphorus pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia facaltaria*. *Forest Ecology and Management*, 128(3):241-247. 2000.
6. BINKLEY D. Bioassays of the influence of *Eucalyptus saligna* and *Albizia falcataria* on soil nutrient supply and limitation *Forest Ecology and Management*, 91(2):229-235. 1997.
7. CARRASCO L. L.; EGURENB, G.; CASTIN, C.; PARRAA O.; PANARIOB D. Preliminary study of prairies forested with *Eucalyptus* sp. at the northwestern Uruguayan soils. *Environmental Pollution*, 127: 49-55. 2004.
8. CARTER M. C.; DEAN T. J.; ZHOU M.; MESSINA M. G.; WANG Z. Short-term changes in soil C, N, and biota following harvesting and regeneration of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Forest Ecology and Management*, 164(1):67-881. 2002.
9. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ-CENICAFÉ; Disciplina de Agroclimatología. Archivos de información climática hasta 2000. Chinchiná (Colombia).
10. CHANG S. X.; AMATYA G.; BEARE M. H.; MEAD D. J. Soil properties under a *Pinus radiata* – ryegrass silvopastoral system in New Zealand. Part I. Soil N and moisture availability, soil C, and tree growth. *Agroforestry Systems*, 54(2):137-147. 2002.
11. DEANS J. D.; DIAGNE O.; LINDLEY D. K.; DIONE M.; PARKINSON J. A. Nutrient and organic-matter accumulation in Acacia senegal fallows over 18 years *Forest Ecology and Management*, 124(2):153-1676. 1999.
12. DIJKSTRA F. Effects of tree species on soil properties in a forest of the northeastern United States Promotoren: N. van Breemen en G.E. Likens, Wageningen University, 120 p. 2001.
13. FASSBENDER, H. W. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza -CATIE-. Turrialba, Costa Rica. 1987. 45p. (Serie Materiales de enseñanza N° 29).
14. FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. BOGOTÁ. COLOMBIA. Caracterización edáfica del Ecotopo 211A. Santa Fé de Bogotá (Colombia), FEDERACAFÉ, 1998.
15. GÓMEZ A., L.; GÓMEZ, J. M.; ZAMORA, R.; BOETTINGER J. L. Canopy vs. soil effects of shrubs facilitating tree seedlings in Mediterranean montane ecosystems. *Journal of Vegetation Science*, 16 (2):191–198. 2005.
16. GRICNAC P. Papel del potasio en la planta. *Revista Fertilité. Informaciones sobre la fertilización tropical y subtropical*, 16:5. 1962.
17. HOFSTEDE, R.; LIPS, J.; JONGSMA, W.; SEVINK, J. Impactos ecológicos de plantaciones forestales. *Geografía, Ecología y Forestación de la Sierra Alta del Ecuador. Revisión de Literatura*. Editorial Abya Yala, Ecuador. 242 p. 1998.
18. JOBBÁGY E. G.; JACKSON R. B. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. *Biogeochemistry*, 64(2):205-229. 2003.

19. JONSSON U.; ROSENGREN U.; THELIN G.; NIHLGARD B. Acidification-induced chemical changes in coniferous forest soils in southern Sweden 1988-1999. *Environmental Pollution*, 123(1):75-83. 2003.
20. LEÓN S., T.; SUÁREZ C., A. Y CASTAÑEDA T., A. Efectos sobre el suelo de plantaciones comerciales de *Pinus patula* y *Eucalyptus grandis* en crecimiento. Informe preliminar del componente Suelo y Aguas del Proyecto de evaluación del Impacto Ambiental de las Plantaciones Forestales en Colombia. Santafé de Bogotá: CONIF. 1996. 51 p.
21. LESSCHEN, J. P.; VERBURG, P. H.; STAAL, S. J. Statistical methods for analysing the spatial dimension of changes in land use and farming systems. Lucc Report Series No. 7. The International Livestock Research Institute, Nairobi, Kenya & Lucc Focus 3 Office, Wageningen University, the Netherlands. 2005. 81 p.
22. LUDWIG B.; KHANNA P. K.; RAISON R. J.; JACOBSEN K. Modelling changes in cation composition of a soil after clearfelling a eucalypt forest in East Gippsland, Australia. *Geoderma*, 80(1):95-116. 1997.
23. MORENOH, F. H. Comparación de algunas propiedades de suelos volcanicos bajo bosques naturales, potreros y plantaciones forestales. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Seccional de Medellín, Facultad de Agronomía, Tesis de Grado. 186p. 1987.
24. MORONI M. T.; SMETHURST P. J.; HOLZ G. K.. Nitrogen fluxes in surface soils of young *Eucalyptus nitens* plantations in Tasmania. *Australian Journal of Soil Research*, 40(3):543-553. 2002
25. NAIR, P. K. R. An introduction to agroforestry. Dordrecht (Holanda), Kluwer Academic Publishers, 1993. 499 p.
26. NEIRYNCK J.; VANRANSTE.; ROSKAMSP.; LUSTN. Impact of decreasing throughfall depositions on soil solution chemistry at coniferous monitoring sites in northern Belgium. *Forest Ecology and Management*, 160(1):127-1421. 2002.
27. PANIAGUA, A.; KASS, D. L.; MAZZARINO, M. J.; SOTO, M. L.; SZOTT, L.; DÍAZ R., R.; FERNÁNDEZ, C.; JIMÉNEZ, M. Cambios en fracciones orgánicas e inorgánicas de fósforo en suelos con el uso de sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas (Costa Rica)*, 1(2):14-19. 1994.
28. PARFITT R. L.; ROSS D. J.; HILL L. F. Soil nitrogen mineralisation changes rapidly when pine is planted into herbicide-treated pasture the first two years of growth. *Australian Journal of Soil Research*, 41(3):459-469. 2003.
29. PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D. Influencia da densidade de plantio de cafeeiros sobre a fertilidade do solo. In: SIMPOSIO Internacional sobre Café Adensado. Londrina (Brasil), 28-31 marco, 1994. Anais. Londrina (Brasil), Instituto Agronomico do Paraná, 1994. p. 89-105.
30. PAVAN, M. A.; ANDROCIOFILILHO, A. Fracionamento de fósforo em um experimento de manejo da fertilidade do solo para producao de café no noroeste do Paraná. *Arquivos de Biologia e Tecnologia (Brasil)*, 38(1):157-165. 1995.
31. RAO M. R.; NAIR P. K. R.; ONG C. K. Biophysical interactions in tropical agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 38(1-3):3-50. 1997.
32. RHOADES C.; BINKLEY D. Factors influencing decline in soil pH in Hawaiian Eucalyptus and Albizia plantations. *Forest Ecology and Management*, 80(1):47-56. 1996.
33. RICHTER D. D.; MARKEWITZ, D.; WELLS, C.; ALLEN, G.; APRIL, H. L. R.; HEINE, P. R.; URREGO B. Soil Chemical Change during Three Decades in an Old-Field Loblolly Pine (*Pinus Taeda* L.) Ecosystem. *Ecology*. 75 (5):1463-1473. 1994
34. SALAKO F. K.; TIAN G. Litter Production and Soil Condition Under Agroforestry Trees in Two Agroecological Zones of Southern Africa. *Journal of Sustainable Agriculture*. 26 (2):5-21. 2005.
35. STÅHL L.; NYBERG G.; HÖGBERG P.; BURESH R. J. Effects of planted tree fallows on soil nitrogen dynamics, above-ground and root biomass, N₂-fixation and subsequent maize crop productivity in Kenya. *Plant and Soil*, 243(1):103-117. 2002.
36. SCHROTH G.; LEHMANN J.; RODRIGUES M. R. L.; BARROS E.; MACÊDO J. L. V. Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropic. *Agroforestry Systems*, 53(2):85-102. 2001.
37. TORNQUIST C. G.; M. HONS F.; FEAGLEY S. E.; HAGGAR J. Agroforestry system effects on soil characteristics of the Sarapiquí region of Costa Rica Agriculture. *Ecosystems and Environment*, 73(1):19-28. 1999.

38. ULERY A. L.; GRAHAM R. C.; CHADWICK O. A.; WOOD H. B. Decade-scale changes of soil carbon, nitrogen and exchangeable cations under chaparral and pine. *Geoderma*, 65(1):1211. 1995.
39. VALENCIA A., G.; CARRILLO P., I. F. Interpretación de análisis de suelos para café. *Avances Técnicos Cenicafé* (Colombia) No. 115:1-5. 1983.
40. VALENCIA A., G. Fisiología, Nutrición y Fertilización del cafeto, Chinchiná (Colombia); Agroinsumos del café S.A. – Cenicafé, 1999. 94 p.
41. VELASCO, A.; IBRAHIM, M.; KASS, D.; JIMÉNEZ, F.; RIVAS P, G. Concentraciones de fósforo en suelos bajo sistema silvopastoril de *Acacia mangium* con *Brachiaria humidicola*. *Revista Agroforestería en las Américas*, 6(23), 1999. (Avances de investigación)
42. VILLEDA C., L. Determinación de cambios químicos en el suelo, en un sistema agroforestal; café bajo sombra de pino. Tesis Ing. Forestal, ESNACIFOR, Siguatepeque, Honduras 70p. On Line Internet: <http://www.ihcafe.org/generacion/agroforesteria/Articulos/Articulo%20café%2Bpino.doc>. (Consultado en junio de 2002)