

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

LIXIVIACION DE NUTRIMENTOS PRINCIPALES EN CUATRO SISTEMAS
AGROFORESTALES CON CULTIVOS PERENNES DE TURRIALBA, COSTA RICA

Tesis sometida a consideración de la Comisión del Programa
Conjunto de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y
Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica y
del Centro Agronómico Tropical de Investigación
y Enseñanza, para optar el grado de

MAGISTER SCIENTIAE

por

ALEJANDRO CARLOS IMBACH HERMIDA

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
Departamento de Recursos Naturales Renovables
Turrialba, Costa Rica
1987

DEDICATORIA

A la memoria de mi abuelo, Alejandro R. Hermida y de mis padres, Carlos S. Imbach y Maria E. H. de Imbach, quienes me pusieron en el camino de la vida.

A mi esposa, Patricia, con quien estamos transitando ese camino.

A mis hijos, Pablo, Alejandro, Miguel y Luis, a quienes hemos puesto en dicho camino.

AGRADECIMIENTOS

A mi Profesor Consejero, Rolain Borel, y a los integrantes del Comité Asesor, Hans Fassbender, Assefaw Tewolde, John Beer y Oscar Lücke, por su guía, colaboración, respeto y amistad.

Al personal del Proyecto CATIE/GTZ en general, y en particular a Jorge Alvarez, con quien compartimos largas jornadas de trabajo de campo y laboratorio, y a Lilliam Ugalde de Brenes, quien fue de gran ayuda en la presentación final de este trabajo.

Al personal técnico, administrativo y de campo del CATIE por las múltiples oportunidades en que prestaron su apoyo.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza y al Sistema de Estudios de Posgrado UCR-CATIE, por darme la oportunidad de realizar estos estudios.

Al Gobierno de Holanda por el apoyo financiero que me permitió acceder a estos estudios.

Al Proyecto Agroforestal CATIE-GTZ por el apoyo material y financiero que hizo posible la realización del trabajo de tesis.

A mis compañeros de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones, Argentina, quienes, con su trabajo, cubrieron mi ausencia durante este periodo.

A la comunidad turrialbeña que nos recibió generosamente y nos brindó su amistad.

RESEÑA BIOGRAFICA

El autor nació en 1949 en Banfield, provincia de Buenos Aires, Argentina. Obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo en la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, en 1973.

Entre 1974 y 1979 se desempeñó como extensionista agrícola en dos cooperativas agrícolas de Misiones, en el noreste argentino.

Durante 1980 y 1981 fue Director de la Escuela Agrotécnica Eldorado, dependiente de la Universidad Nacional de Misiones, Argentina.

Desde 1969 se dedicó al trabajo docente. Primero, entre 1969 y 1973, siendo aún estudiante, como ayudante de las Cátedras de Mecánica Aplicada y Maquinaria Agrícola de la Facultad de Agronomía. Luego fue Profesor Adjunto (1977-1981) y Profesor Titular (1981-1984) en el Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Misiones, habiendo dictado cursos de Química, Fisiología Vegetal y Edafología.

En 1984, con el advenimiento de la democracia en Argentina, fue Decano Normalizador de la Facultad de Ciencias Forestales. Al fin de su término en esta función se incorporó, en 1985, al Programa de Posgrado UCR-CATIE en Turrialba, Costa Rica, donde obtuvo el grado de Magister Scientiae en 1987.

Esta Tesis ha sido aceptada, en su presente forma, por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, bajo el Convenio UCR-CATIE, como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

COMITE ASESOR



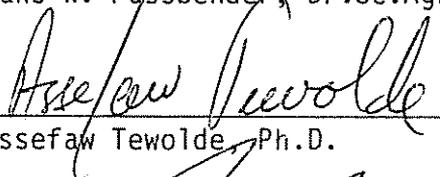
Rolain Borel, Dr.Sc.Tech.

Profesor Consejero



Hans W. Fassbender, Dr.Sc.Agr.

Miembro del Comité



Assefaw Tewelde, Ph.D.

Miembro del Comité



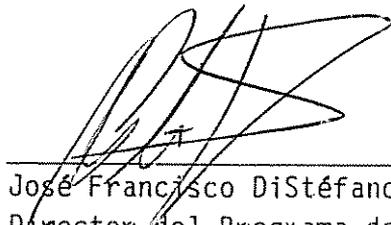
John W. Beer, M.S.

Miembro del Comité



Oscar Lücke, M.S.

Miembro del Comité



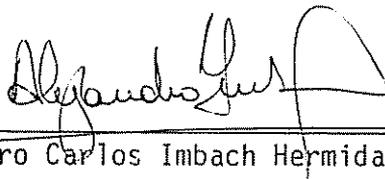
José Francisco DiStéfano, Ph.D.

Director del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales UCR-CATIE



Luis Estrada Navas, Ph.D.

Decano del Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad de Costa Rica



Alejandro Carlos Imbach Hermida
Candidato

INDICE DE CONTENIDO

	Página
1 INTRODUCCION.....	1
2 REVISION DE BIBLIOGRAFIA.....	5
2.1 Los sistemas agroforestales.....	5
2.2 El ciclo de nutrimentos en los ecosistemas..	6
2.3 El proceso de lixiviación de nutrimentos....	9
2.3.1 Aspectos generales.....	9
2.3.2 Presencia de iones en la solución del suelo.....	10
2.3.2.1 Nitrógeno.....	14
2.3.2.2 Fósforo.....	16
2.3.2.3 Potasio.....	19
2.3.2.4 Calcio y magnesio.....	21
2.3.3 Movimiento del agua en el perfil del suelo.....	23
2.4 Lixiviación en sistemas agroforestales.....	28
2.5 Aspectos metodológicos.....	41
2.5.1 Método de los lisímetros de tanque...	42
2.5.2 Método de los lisímetros monolíticos.	43
2.5.3 Método de los lisímetros de tensión cero.....	44
2.5.4 Método de los lisímetros de porcelana	45
2.5.5 Método del muestreo con cápsulas lisimétricas y estimación de la percolación mediante modelos.....	45
3 MATERIALES Y METODOS.....	49
3.1 Localización del experimento.....	49
3.1.1 Características climáticas.....	49
3.1.2 Características edáficas.....	53

3.2	Descripción del experimento	56
3.2.1	Tratamiento	56
3.2.2	Diseño experimental.....	56
3.2.3	Manejo agronómico de las parcelas experi- mentales	58
3.3	Variables consideradas en el análisis.....	60
3.3.1	Variables de respuesta.....	60
3.3.2	Variables de efectos.....	62
3.3.3	Covariables.....	62
3.4	Metodología para la toma de datos	64
3.4.1	Determinación de la concentración de nutrimentos en la solución lixiviada.	64
3.4.2	Determinación del volumen de agua que egresa del perfil por percolación ...	68
3.4.3	Determinación de la intercepción	77
3.4.4	Determinación de la masa de nutrimen- tos lixiviada	80
3.5	Procedimientos analíticos.....	81
3.5.1	Balance hidrico.....	81
3.5.2	Concentración de nutrimentos en los lixiviados.....	82
3.5.3	Lixiviación total anual.....	83
4	RESULTADOS.....	84
4.1	Balance hidrico.....	84
4.1.1	Intercepción.....	84
4.1.2	Ajuste del modelo de balance hidrico. Estimación de los valores de kc.....	86
4.2	Concentración de nutrimentos en la solución del suelo.....	93
4.2.1	Nitrógeno.....	95
4.2.2	Fósforo.....	100
4.2.3	Potasio.....	101
4.2.4	Calcio.....	103
4.2.5	Magnesio.....	104

4.3	Masa de nutrientes lixiviados.....	106
5	DISCUSION.....	110
5.1	Balance hidrico.....	110
5.2	Concentración de nutrimentos en la solución del suelo.....	114
5.2.1	Efectos de las covariables consideradas.....	114
5.2.2	Efectos de las especies vegetales componentes de los sistemas.....	117
5.3	Pérdidas por lixiviación.....	121
5.4	Extensión de la metodología y los resultados a otros lugares	126
6	CONCLUSIONES.....	129
7	BIBLIOGRAFIA.....	133
	ANEXO DE CUADROS.....	142
	ANEXO DE FIGURAS.....	155

LIXIVIACION DE NUTRIMENTOS PRINCIPALES EN CUATRO SISTEMAS AGROFORESTALES CON CULTIVOS PERENNES DE TURRIALBA, COSTA RICA

RESUMEN

Un estudio sobre lixiviación de nutrientes principales (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio) fue conducido entre marzo de 1986 y marzo de 1987 en el Experimento Central La Montaña, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

El estudio comprendió a cuatro sistemas agroforestales: café (Coffea arabica) asociado con poró (Erythrina poeppigiana); café con laurel (Cordia alliodora); cacao (Theobroma cacao) con poró y cacao con laurel. Estas asociaciones tenían una edad de nueve años al comienzo del trabajo, siendo la densidad del café de 5.000 plantas/ha y la del cacao de 1.111 plantas /ha. La densidad del laurel era de 139 árboles/ha en la combinación con café y 278 árboles/ha con cacao. La densidad del poró fue de 585 árboles/ha con el café y 278 árboles/ha con el cacao.

El método de trabajo empleado fue el de muestreo de la solución de suelos a un metro de profundidad mediante lisímetros de cápsula de porcelana y estimación del volumen de agua percolada mediante un modelo de balance hídrico.

La distribución de las parcelas experimentales fue asimilada a un diseño en bloques al azar con parcelas divididas, sin repeticiones a nivel de parcelas. Cada parcela midió 18 m por 36 m, y en cada una de ellas se colocaron 4 ó 5 lisímetros distribuidos en forma estratificada para evitar el efecto de las zanjas de drenaje; los aparatos fueron ubicados al azar dentro de cada estrato. Las muestras se extrajeron en forma semanal, para luego ser compuestas en muestras quincenales. Estas fueron analizadas en el laboratorio para determinar su contenido de nutrientes.

Los tratamientos fueron el tipo de árboles, el tipo de cultivos, la interacción árboles por cultivos y las épocas de muestreo. Como covariables se incluyeron el ingreso de nitrógeno al mantillo a través de la hojarasca, las precipitaciones en el periodo anterior al considerado, la época de poda y/o fertilización y la distancia del punto de muestreo a los árboles más cercanos.

El balance hídrico fue resuelto, para cada día, mediante un modelo que requirió de información sobre intercepción de las precipitaciones. Se realizó un ensayo especial para la estimación de la misma. El modelo fue ajustado empleando información de humedad de suelos y evapotranspiración como variable de ajuste. Este enfoque permitió obtener una estimación de los valores del coeficiente de cultivo (kc) propios de los sistemas agroforestales estudiados.

La masa de nutrimentos lixiviados se obtuvo para cada día en que se produjo percolación, resolviendo el producto entre el volumen de agua percolado y la concentración de nutrimentos determinada para el período quincenal en que se produjo la citada percolación.

A través del balance hídrico se estimaron valores de kc de 0,8 para el sistema café-poró y de 0,7 para los restantes sistemas.

La intercepción estimada para las distintas asociaciones fue 0,3 mm para café-poró; 2,4 mm para café-laurel; 3,1 mm para cacao-poró y 3,4 mm para cacao-laurel.

La percolación anual resultó ser de 1.044 mm en café-poró; 961 mm en café-laurel; 940 mm en cacao-poró y 914 mm en cacao-laurel, representando alrededor del 50% de la lluvia caída.

La estimación del total de nitrógeno lixiviado estuvo entre 5,2 y 5,8 kg/ha/año según los sistemas, mientras que

para fósforo osciló entre 0,5 y 0,7 kg/ha/año y para potasio entre 1,2 y 2,0 kg/ha/año. En el caso del calcio los sistemas con poró presentaron pérdidas entre 26,9 y 28,0 kg/ha/año, mientras que en sus similares con laurel sólo fueron entre 6,5 y 7,9 kg/ha/año. Un fenómeno similar al anterior se presentó con el magnesio, cuyas pérdidas en los sistemas con poró se encontraron entre 17,8 y 19,7 kg/ha/año mientras que con laurel sólo estuvieron entre 5,7 y 7,2 kg/ha/año.

Las diferencias resultaron estadísticamente significativas en los casos del fósforo, potasio calcio y magnesio, siendo a la vez poco relevantes desde el punto de vista del manejo agronómico y en relación con las reservas totales de los sistemas.

Asimismo el análisis de las covariables mostró que no existen efectos atribuibles al nitrógeno incorporado al mantillo con la hojarasca sobre la lixiviación de nutrientes, lo cual resulta de interés en el análisis de la función de las leguminosas en estos sistemas.

Se concluyó, además, que la circulación de nutrientes en los sistemas agroforestales estudiados es muy eficiente, lo que constituye un aspecto muy favorable para la sostenibilidad productiva y ecológica de los mismos.

Palabras clave: agroforestería, lixiviación, intercepción, evapotranspiración, balance hídrico, Coffea arabica, Theobroma cacao, Erythrina poeppigiana, Cordia alliodora, Costa Rica

MAIN NUTRIENTS LIXIVIATION IN FOUR AGROFORESTRY SYSTEMS WITH PERENNIAL CROPS IN TURRIALBA, COSTA RICA

SUMMARY

A study on nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium lixiviation in agroforestry systems was conducted from March, 1986 to March, 1987 at the Experimento Central La Montaña, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

The agroforestry systems included were coffee (Coffea arabica) associated with poró (Erythrina poeppigiana); coffee with laurel (Cordia alliodora); cacao (Theobroma cacao) with poró and cacao with laurel. The associations were nine years old at the beginning of the studies, having a coffee plant density of 5,000 plants/ha and a cacao density of 1,111 plants/ha. Laurel density was 139 trees/ha in the combination with coffee and 278 trees/ha with cacao. Poró density with coffee was 585 trees/ha and 278 trees/ha with cacao.

The selected methodology included soil solution sampling at one meter depth with porcelane lysimeters, and percolation volume estimation by means of an hydric balance model.

The experimental layout was assimilated to a random block with split-plot design, without replications at the plot level. The plots were 18 m by 36 m in size, and each one was stratified to avoid drainage trenches effects. One lysimeter was randomly established in each stratum, resulting four to five lysimeters per plot.

Soil solution was sampled weekly; the samples were fortnightly composed and analyzed for nutrient content.

The treatments were tree and crop species, tree by crop interaction and periods. As covariables, nitrogen input to litter by litterfall, rainfall of the previous period, tree

pruning or fertilization time and distance to the nearest trees, were included.

The hydric balance was solved daily for the whole period with a model. As this model required an estimation of rainfall interception, a specific experiment was set to make that estimation. The model was adjusted by means of soil moisture data, using evapotranspiration as the adjusting variable. This approach allowed for an estimation of the crop coefficient (kc) values of each system.

The daily leached nutrients were estimated when percolation happened, solving the product between percolation volume and soil solution nutrient concentration of the period.

By means of the hydric balance, a kc value of 0.8 was estimated for the coffee-poro system, and a 0,7 value for the other systems.

Rainfall interception were 0,7 mm in coffee-poro; 2,4 mm in coffee-laurel; 3,0 mm in cacao-poro and 3,4 mm in cacao-laurel.

Annual percolation was 1,044 mm in coffee-poro; 961 mm in coffee-laurel; 940 mm in cacao-poro and 914 mm in cacao-laurel. These values represents about 50% of total rainfall.

Nitrogen leaching losses were in the range of 5.2-5.8 kg/ha/year for the different systems. Phosphorus losses were 0.5-0.7 kg/ha/year and potassium ones were 1.2-2.0 kg/ha/year. Calcium losses in the systems with poró were between 26.9-28.0 kg/ha/year, and with laurel 6.5-7.9 kg/ha/year only. Something similar happened with magnesium, whose losses were 17.8-19.7 kg/ha/year in the poro systems and just 5.7-7.2 kg/ha/year in the laurel systems.

Differences were statistically significant for phosphorus, potassium, calcium and magnesium, but they had small relevance for the agronomic management of the systems and in relation with the nutrient reserves of the systems.

The covariables analysis showed that there was not effect of litter nitrogen input by litterfall on nutrient lixiviation; this result is very interesting when the leguminous plants function in the systems is considered.

It can be stated that, under the experimented conditions, nutrient circulation in agroforestry systems is very efficient, resulting in an important factor for the productive and ecological sustainability of these systems.

Keywords: agroforestry, leaching, rainfall interception, evapotranspiration, hydric balance, Coffea arabica, Theobroma cacao, Erythrina poeppigiana, Cordia alliodora, Costa Rica.

INDICE DE CUADROS

<u>En el texto</u>	Página
Cuadro 1 Productos de solubilidad de algunos ortofosfatos presentes en el suelo.....	18
Cuadro 2 Distribución de nutrimentos en los sistemas agroforestales de La Montaña. Sistema café-poró.....	32
Cuadro 3 Distribución de nutrimentos en los sistemas agroforestales de La Montaña. Sistema café-laurel.....	33
Cuadro 4 Distribución de nutrimentos en los sistemas agroforestales de La Montaña. Sistema cacao-poró.....	34
Cuadro 5 Distribución de nutrimentos en los sistemas agroforestales de La Montaña. Sistema cacao-laurel.....	35
Cuadro 6 Concentración de elementos nutritivos en la solución del suelo alrededor del tronco de árboles de poró y laurel asociados con cacao.....	37
Cuadro 7 Balance hídrico de los sistemas café-poró y café-laurel.....	39
Cuadro 8 Biomasa de raíces en los sistemas café con sombra y cacao-laurel.....	40
Cuadro 9 Biomasa de raíces en los sistemas agroforestales de La Montaña.....	41
Cuadro 10 Datos meteorológicos del periodo de estudio.....	51
Cuadro 11 Distribución de las precipitaciones según su intensidad diaria.....	52
Cuadro 12 Características físicas del suelo.....	54
Cuadro 13 Características químicas del suelo.....	55
Cuadro 14 Época y tipo de prácticas agronómicas realizadas en las parcelas experimentales.....	59

Cuadro 15	Cantidad de nutrimentos incorporados con la fertilización.....	59
Cuadro 16	Estadísticos descriptivos de las variables de respuesta.....	61
Cuadro 17	Coefficientes de las funciones de intercepción de la precipitación.....	85
Cuadro 18	Sensibilidad del modelo de balance hídrico a distintos valores de tensión de saturación del agua del suelo y kc. Sistema café-poró.....	90
Cuadro 19	Valores del coeficiente de cultivo (kc) de los sistemas agroforestales estudiados.....	91
Cuadro 20	Balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados (mm).....	92
Cuadro 21	Balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados (%).....	92
Cuadro 22	Concentración de nutrimentos en la solución del suelo en el sistema café-poró.....	96
Cuadro 23	Concentración de nutrimentos en la solución del suelo en el sistema café-laurel.....	97
Cuadro 24	Concentración de nutrimentos en la solución del suelo en el sistema cacao-poró.....	98
Cuadro 25	Concentración de nutrimentos en la solución del suelo en el sistema cacao-laurel.....	99
Cuadro 26	Promedios de concentración de nitrógeno en la solución del suelo (mg/l) para los distintos efectos estudiados.....	100
Cuadro 27	Promedios de concentración de fósforo en la solución del suelo (mg/l) para los distintos efectos estudiados.....	101
Cuadro 28	Promedios de concentración de potasio en la solución del suelo (mg/l) para los distintos efectos estudiados.....	102

	Página
Cuadro 29 Promedios de concentración de calcio en la solución del suelo (mg/l) para los distintos efectos estudiados.....	104
Cuadro 30 Promedios de concentración de magnesio en la solución del suelo (mg/l) para los distintos efectos estudiados.....	105
Cuadro 31 Lixiviación anual de nutrimentos en los sistemas estudiados.....	107
Cuadro 32 Lixiviación de nutrimentos en diferentes ecosistemas.....	125

En el Anexo

Página

Cuadro 1A	Cantidad de observaciones por variable y subclase.....	143
Cuadro 2A	Resultado de las transformaciones de las variables de respuesta.....	144
Cuadro 3A	Intercepción en el sistema café-poró....	145
Cuadro 4A	Intercepción en el sistema café-laurel..	146
Cuadro 5A	Intercepción en el sistema cacao-poró...	147
Cuadro 6A	Intercepción en el sistema cacao-laurel.	148
Cuadro 7A	Sensibilidad del modelo de balance hídrico a distintos valores de tensión de saturación del agua del suelo y kc. Sistema café-laurel.....	149
Cuadro 8A	Sensibilidad del modelo de balance hídrico a distintos valores de tensión de saturación del agua del suelo y kc. Sistema cacao-poró.....	149
Cuadro 9A	Sensibilidad del modelo de balance hídrico a distintos valores de tensión de saturación del agua del suelo y kc. Sistema cacao-laurel.....	150
Cuadro 10A	Análisis de variancia de la concentración de nitrógeno en la solución del suelo.....	150
Cuadro 11A	Análisis de variancia de la concentración de fósforo en la solución del suelo.....	151
Cuadro 12A	Análisis de variancia de la concentración de potasio en la solución del suelo.....	151
Cuadro 13A	Análisis de variancia de la concentración de calcio en la solución del suelo.....	152
Cuadro 14A	Análisis de variancia de la concentración de magnesio en la solución del suelo....	152
Cuadro 15A	Lixiviación diaria en el sistema café-poró.....	153
Cuadro 16A	Lixiviación diaria en el sistema café-laurel.....	155

Cuadro 17A	Lixiviación diaria en el sistema cacao-pord.....	157
Cuadro 18A	Lixiviación diaria en el sistema cacao-laurel.....	159

INDICE DE FIGURAS

<u>En el texto</u>	<u>Página</u>
Fig. 1 Circulación de nutrimentos en un sistema forestal sin manejo	7
Fig. 2 Tipos de ciclos de los minerales.....	7
Fig. 3 Relaciones entre las distintas formas de nutrimentos en el suelo.....	11
Fig. 4 Circulación del nitrógeno en un ecosistema terrestre.....	15
Fig. 5 Circulación del fósforo en un ecosistema terrestre.....	17
Fig. 6 Circulación del potasio en un ecosistema terrestre.....	20
Fig. 7 Circulación del calcio y del magnesio en un ecosistema terrestre.....	22
Fig. 8 Modelo de circulación de nutrimentos en sistemas agroforestales.....	31
Fig. 9 Climadiagrama del CATIE.....	50
Fig. 10 Ubicación de las parcelas de estudio en el Experimento Central.....	57
Fig. 11 Esquema del equipo empleado para el muestreo de la solución del suelo.....	65
Fig. 12 Ubicación de las subparcelas donde se instalaron los lisímetros.....	66
Fig. 13 Flujo de agua en sistemas agroforestales..	70
Fig. 14 Diagrama de flujo del modelo de cálculo del balance hidrico.....	74
Fig. 15 Esquema de los tubos colectores de precipitación bajo el dosel.....	78
Fig. 16 Intercepción en función de la precipitación Sistema café-laurel....	86

Fig. 17	Ajuste del modelo de balance hídrico. Sistema café-poró.....	88
Fig. 18	Precipitación total y percolación estimada por periodo para el sistema café-laurel...	94

Fig. 1A	Intercepción en función de la precipitación. Sistema café-poró.....	162
Fig. 2A	Intercepción en función de la precipitación. Sistema cacao-poró.....	163
Fig. 3A	Intercepción en función de la precipitación. Sistema cacao-laurel.....	164
Fig. 4A	Ajuste del modelo de balance hídrico. Sistema café-laurel.....	165
Fig. 5A	Ajuste del modelo de balance hídrico. Sistema cacao-poró.....	166
Fig. 6A	Ajuste del modelo de balance hídrico. Sistema cacao-laurel.....	167