

BIBLIOTECA WILSON POPENO
ESCUELA AGRICOLA PANAMERICANA
APARTADO 03
TEGUIGALPA HONDURAS

Uso de lisímetros para evaluar el movimiento de nitrógeno y potasio en suelos bananeros de Coyoles, Honduras, con potencial de lixiviación

Norman Francisco Alpizar Vargas

MICROISIS:	_____
FECHA:	_____
ENCARGADO:	_____

EL ZAMORANO
Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria
Diciembre, 2000

651/159

Uso de lisímetros para evaluar el movimiento de nitrógeno y potasio en suelos bananeros de Coyoles, Honduras, con potencial de lixiviación

Proyecto especial presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado Académico de Licenciatura.

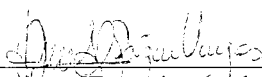
Presentado por

Norman Francisco Alpízar Vargas

El Zamorano-Honduras

Diciembre, 2000

El autor concede a El Zamorano permiso
para reproducir y distribuir copias de este
trabajo para fines educativos. Para otras personas
físicas o jurídicas se reservan los derechos del autor.


Norman Francisco Alpizar Vargas

El Zamorano-Honduras
Diciembre, 2000

DEDICATORIA

a Virgen de los Angeles y el Niño Jesús en quienes puse en sus manos este trabajo. grupo de personas más importantes en mi vida: Mi Familia, Edgar Alpizar, Nury Vargas, Edgardo, Daniel, María Eduviges y María Auxiliadora Alpizar Vargas, a Herman y Sara Vargas, Rosario, Mey y Rodrigo Vargas, José Angel Bogantes y Herman Vargas, por el apoyo y el amor tan grande que me han mostrado, por darme la esperanza en los momentos más difíciles, por los sacrificios desinteresados y los principios que han inculcado en mi para ser quien soy y seguir con orgullo hacia adelante. Y a mi abuelo Francisco Alpizar, el ejemplo de humildad más grande en una persona.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser luz y guía en mi vida, por ser mi compañía en los buenos y malos momentos. A la Virgen de los Angeles, El Niño Jesús, El Espíritu Santo y San Francisco de Asís por iluminarme y estar conmigo a través de estos cuatro años.

A mis Padres por su amor y los sacrificios que han hecho para acabar con esta etapa de mi vida. A quienes en verdad les pertenece este título.

A mis hermanos por ser mi inspiración, creer en mi y darme confianza durante el tiempo que he estado lejos de casa.

A mis abuelos, tíos y primos por el apoyo y el ejemplo que han sido para mi durante toda mi vida, y por estar siempre pendientes de mis estudios

A la Dra. Andrews por su apoyo desde inicios del presente trabajo.

A la Ing. Ligia de Ramos y el Dr. Onésimo Medina por la ayuda y los consejos tan valiosos durante la realización de este estudio.

Al Dr. Espinal por la ayuda en la parte más importante de mi tesis.

A la gente de la Standard Fruit Company que colaboraron en la realización del estudio, sin ustedes no lo hubiera logrado.

A Valeria por estar a mi lado cada día y cuando más lo necesitaba.

A la familia Flores Fukuda por su cariño e interés en mis estudios y mi trabajo.

A mi compañero de cuarto Pablo Chang por su amistad, entender mis problemas y confiar en mi como nadie lo ha hecho en esta Escuela.

A mi amigo Diego Vila por escucharme cuando lo necesitaba y acompañarme para finalizar este último año juntos.

A mi amigo Claro Blacio y por sus consejos, colaboración incondicional y compartir conmigo este “divertido” cuarto año.

A mis amigas Nilda Chávez y Rosa Martínez, por ser mis “cómplices”, por toda su ayuda, los ratos que compartimos y guardar mis secretos.

A mis amigas Nilda Chávez y Rosa Martínez, por ser mis “cómplices”, por toda su ayuda, los ratos que compartimos y guardar mis secretos.

A mis amigos Alejandra Barahona, Mauricio Ruiz, Danny Rueda, Oscar Yáñez, Karla Medina, Mario Alvarez, Pietro Albani, Andrés García, Erick Miranda, Angel Paz, Edwin Westreicher, Xochilt Preza, Héctor Ferreira, y demás compañeros del PIA, por su camaradería, amistad y haberme regalado los más bonitos recuerdos de este año.

A mis amigos en Costa Rica: Melissa, Marcela, Wendy, Laura, Sebastián, Adrián, Braulio, Alonso, Gerardo, Mauricio y demás compañeros por no dejar que el tiempo ni la distancia hicieran olvidar nuestra amistad.

A mis amigos Olinto Pérez, Angel Bu, Mario Fernández, Alvaro de la Roca, Ignacio Vega y Cristóbal Williams, que desde lejos tomaron como propios mis logros alcanzados.

A mis paisanos Tomás Fernández, Pedro Argüello y Diego Espinoza, porque compartimos la misma esperanza: volver con triunfos a nuestro hogar.

A mi orgullo más grande: Mi Tierra Costa Rica.

Al Zamorano por enseñarme lo mejor en mi carrera y afrontar la vida.

A mi mismo por lo que he logrado.

AGRADECIMIENTO A PATROCINADORES

A mis padres por el sacrificio hecho para la realización y conclusión de mis estudios en El Zamorano.

A la Standard Fruit Company por apoyarme en la realización de mi tesis.

RESUMEN

Alpizar Vargas, Norman F. 2000. Uso de lisímetros para evaluar el movimiento de nitrógeno y potasio en suelos bananeros de Coyoles, Honduras, con potencial de lixiviación. Proyecto Especial del Programa de Ingeniero Agrónomo, Zamorano, Honduras. 54 p.

El movimiento del agua a través del perfil del suelo es el factor que causa mayor lixiviación de N-NO_3^- y K^+ . El manejo adecuado del riego y la fertilización son consideraciones necesarias para minimizar este problema. Los nutrientes concentrados a profundidades mayores de 40 cm no son aprovechados por las raíces del banano (*Musa sativa*) y se consideran como pérdida y, o incremento en el riesgo de contaminación de aguas subterráneas. El estudio se llevó a cabo en plantaciones bananeras de la Standard Fruit Company, en la zona de Coyoles, Yoro, en donde se evaluó con lisímetros el movimiento de nitrógeno y potasio aplicados como fertilizantes en las formas de NO_3^- y K^+ . Se usaron lisímetros de succión y lisímetros de drenaje para colectar solución del suelo y analizar las concentraciones de ambos nutrientes. Con los de succión se trató de extraer, sin éxito, solución del suelo a tres profundidades (20, 40 y 60 cm) después de aplicarlos por fertirrigación en forma convencional. Con los lisímetros de drenaje se evaluó el fraccionamiento de la aplicación comercial de fertilizantes en forma manual y por fertirrigación, con dos réplicas por tratamiento, excepto para el testigo. Los muestreos se hicieron semanalmente para determinar el tratamiento con menor cantidad de nutrientes lixiviados y evaluar su movimiento en el perfil del suelo. Los resultados del estudio con los lisímetros de drenaje mostraron que la concentración en los lixiviados no es diferente significativamente ($P < 0.05$) cuando la fertilización se fracciona. La aplicación trimestral tuvo los valores mayores de concentración de nitratos.

Palabras claves: Contaminación, drenaje, fertirrigación, solución del suelo, succión.



Abelino Pitty, Ph.D.

Nota de prensa

PÉRDIDA DE FERTILIZANTES Y CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BANANO

El movimiento del agua a través del perfil del suelo es el factor que causa mayores pérdidas de nitrógeno en forma de nitratos (NO_3^-) y potasio (K^+), fertilizantes básicos en la producción de banano. Este problema puede reducirse al manejar adecuadamente el riego y la fertilización del suelo.

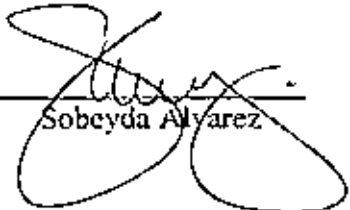
Los nutrientes a profundidades mayores de 40 centímetros (cm) no son aprovechados por las raíces del banano, y se consideran como pérdida o aumento en el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

De mayo a septiembre de 2000 se realizó un estudio en plantaciones bananeras de la Standard Fruit Company, en la zona de Coyoles, Yoro, Honduras. En donde se evaluó el movimiento de nitratos y potasio utilizando lisímetros, que son instrumentos para muestrear elementos presentes o en movimiento a través del perfil del suelo.

Se usaron lisímetros de succión y de drenaje para coleccionar solución del suelo y analizar las concentraciones de ambos nutrientes. Con los de succión se trató de extraer, sin éxito, solución del suelo a tres profundidades (20, 40 y 60 cm) después de aplicar los fertilizantes junto con el agua de riego (fertirrigación).

Con los lisímetros de drenaje se evaluó el fraccionamiento de la aplicación comercial de fertilizantes en forma manual y fertirrigación, con dos réplicas por tratamiento excepto para el testigo. Se muestrearon semanalmente para determinar el tratamiento con menores pérdidas de nutrientes y evaluar su movimiento en el perfil del suelo.

Los resultados con los lisímetros de drenaje mostraron que al fraccionar los fertilizantes, las pérdidas son iguales. Y que la aplicación trimestral resultó con los mayores valores de nitratos. Para obtener resultados de los lisímetros de succión es necesario una correcta instalación dentro del suelo, para lograr absorber la solución del suelo.



Sobeyda Alvarez

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Autoría.....	ii
Página de firmas.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Agradecimiento a patrocinadores.....	vii
Resumen.....	viii
Nota de prensa.....	ix
Contenido.....	x
Índice de Cuadros.....	xii
Índice de Figuras.....	xiii
Índice de Anexos.....	xiv
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo general.....	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Solución del suelo.....	3
2.1.1 Nitrógeno (N) en la solución del suelo.....	5
2.1.2 Potasio (K) en la solución del suelo.....	5
2.2 Movimiento del agua en el suelo.....	7
2.2.1 Movimiento de solutos en el suelo.....	8
2.2.2 Movimiento de N en el suelo.....	9
2.2.3 Movimiento de K en el suelo.....	10
2.3 Evapotranspiración.....	10
2.4 Pérdidas de nutrientes en el suelo.....	11
2.4.1 Pérdidas de N en el suelo por lixiviación.....	12
2.4.2 Pérdidas de K en el suelo por lixiviación.....	12
2.5 Contaminación de aguas subterráneas.....	13
2.5.1 Contaminación por nitratos de aguas subterráneas.....	14
2.6 Métodos de muestreo de la solución del suelo.....	15
2.6.1 Lisímetros.....	16
2.6.1.1 Lisímetros de drenaje.....	16
2.6.1.2 Lisímetros de succión.....	18
2.7 Fertirrigación.....	19
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 Localización.....	21
3.2 Materiales y métodos.....	21

3.2.1	Lisímetros de succión.....	21
3.2.1.1	Instalación.....	22
3.2.1.2	Toma de muestras.....	23
3.2.2	Bomba de succión.....	23
3.2.3	Tubos de polietileno.....	24
3.2.4	Frascos de recolección.....	24
3.2.5	Lisímetros de drenaje.....	24
3.2.5.1	Instalación.....	25
3.2.5.2	Toman de muestras.....	26
3.2.6	Análisis de las muestras.....	28
3.3	Diseño experimental.....	28
3.3.1	Unidad experimental.....	28
3.3.2	Variables medidas.....	29
3.3.2.1	Movimiento de elementos en el suelo.....	29
3.3.2.2	Contaminación de aguas subterráneas.....	29
3.4	Análisis de los datos.....	29
4	RESULTADOS Y DISCUSION.....	30
4.1	Lisímetros de succión.....	30
4.2	Lisímetros de drenaje.....	30
4.2.1	Evaluación de los tratamientos.....	30
4.2.1.1	Evaluación del NO_3^- final según los tratamientos.....	31
4.2.1.2	Evaluación del K^+ final según los tratmientos.....	32
4.2.2	Evaluación de los tiempos de muestreo.....	33
4.2.2.1	Evaluación del NO_3^- final según los tiempos de muestreo....	33
4.2.2.2	Evaluación del K^+ final según los tiempos de muestreo.....	35
4.2.3	Evaluación de las repeticiones por tratamiento.....	36
4.2.3.1	Evaluación del NO_3^- final según las repeticiones por tratamiento.....	36
4.2.3.2	Evaluación del K^+ final según las repeticiones por tratamiento.....	37
4.2.4	Evaluación del tiempo por tratamiento.....	37
4.2.4.1	Evaluación del NO_3^- final según el tiempo por tratamiento.....	38
4.2.4.2	Evaluación del K^+ final según las repeticiones por tratamiento.....	38
5	CONCLUSIONES.....	39
6	RECOMENDACIONES.....	40
7	BIBLIOGRAFIA.....	41
8	ANEXOS.....	43

INDICE DE CUADROS

Cuadro		
1	Concentraciones típicas de los mayores componentes disueltos en la solución del suelo (Sumner, 2000).....	4
2	Componentes principales encontrados en la solución del suelo (Sumner, 2000).....	5
3	Medidas del lisímetro de succión modelo SW-074.....	21
4	Descripción de los tratamientos aplicados en los lisímetros de drenaje, Coyoles, Honduras, 2000.....	27
5	Resultados de NO_3^- y K^+ lixiviados de los lisímetros de drenaje, Coyoles, Honduras, 2000.....	31
6	Efecto de los tratamientos sobre las concentraciones promedio finales de NO_3^- , Coyoles, Honduras, 2000.....	32
7	Efecto del tiempo sobre las concentraciones promedio finales de NO_3^- , Coyoles, Honduras, 2000.....	35
8	Efecto del tiempo sobre las concentraciones promedio finales de K^+ , Coyoles, Honduras, 2000.....	36

INDICE DE FIGURAS

Figura		
1	Indice de infiltración e infiltración acumulada en función del tiempo (Sumner, 2000).....	8
2	Pérdidas de K en el suelo (Sumner, 2000).....	13
3	Posición del lisímetro de succión en el suelo (no a escala).....	22
4	Distribución de los lisímetros de drenaje dentro de la plantación, Coyoles, Honduras, 2000.....	25
5	Composición del suelo de los lisímetros de drenaje, Coyoles, Honduras, 2000.....	26
6	Fechas de muestreo del NO_3^- , Coyoles, Honduras, 2000.....	34
7	Fechas de muestreo del K^+ , Coyoles, Honduras, 2000.....	35

INDICE DE ANEXOS

Anexo		
1	Análisis del agua del riego.....	44
2	Análisis de lixiviados.....	46
3	DCA con Medidas Repetidas en Tiempo.....	47
4	Análisis de Covarianza.....	50
5	Medidas de precipitación, Coyoles, 2000.....	52
6	Correlación precipitación - nitrato y potasio final.....	53
7	Normalidad de los datos de la Correlación.....	55
8	Interior de los lisímetros de drenaje.....	57
9	Lisímetros de drenaje sellados con plástico.....	57
10	Tanques con tuberías de recolección.....	57
11	Instalación de los lisímetros de drenaje en el suelo.....	58
12	Aplicación de los tratamientos.....	58

1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los suelos utilizados para la producción de banano tienen características físicas, químicas y biológicas que los vuelven vulnerables a las pérdidas de los fertilizantes aplicados, lixiviados a mayores profundidades que el sistema radicular.

El monitoreo del movimiento de los elementos a través del perfil del suelo, es una práctica que debidamente aplicada incrementa la eficiencia del uso de fertilizantes, especialmente del nitrógeno.

Debido a que el movimiento del agua a través del perfil del suelo juega el papel más importante en la lixiviación de nitratos y potasio en el suelo, el manejo adecuado del riego y la fertilización son consideraciones necesarias para minimizar este problema.

El sistema radicular del banano es relativamente somero, y la mayor parte de las raíces activas se localizan a 40 cm de profundidad, nutrientes por debajo de ésta, no pueden ser aprovechados por la planta, ni transformados por la población microbial debido a la limitación de alcanzar tales profundidades.

El análisis de la composición y concentración de la solución del suelo a diferentes profundidades es utilizado para monitorear el movimiento de fertilizantes solubles aplicados manualmente y a través del riego. Para esto, es que están diseñados los lisímetros, para extraer la solución del suelo que se analiza en un laboratorio de física y química del suelo.

Los nutrientes presentes en la solución del suelo a profundidades mayores de metro y medio bajo la superficie del suelo, se consideran pérdidas y a la vez potenciales contaminantes de las aguas subterráneas.

El uso adecuado del riego y los fertilizantes aplicados al suelo, reducen las pérdidas y la contaminación de aguas subterráneas, aparte que aumentan la eficiencia y disponibilidad de los nutrientes en el suelo.

En el presente estudio se monitoreo el movimiento del N y K aplicados a través del fertirriego en una plantación comercial de banano, empleando lisímetros de succión, y el movimiento y riesgo potencial de contaminación de NO_3^- a las aguas subterráneas, fraccionando de cuatro formas la aplicación de una dosis comercial de fertilizantes, utilizando lisímetros de drenaje.

La extracción de la solución del suelo es una práctica que no se realiza en El Zamorano, porque no se cuenta con los instrumentos de campo para analizarla. Por lo que este trabajo es una base para futuras investigaciones del uso apropiado de fertilizantes aplicados al suelo en cualquier área de la agronomía.

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Para realizar el presente estudio, se propusieron los objetivos siguientes:

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el movimiento y las pérdidas del nitrógeno y potasio aplicados al suelo en plantaciones bananeras con potencial de lixiviación.

1.1.2 Objetivos específicos

- Evaluar la posibilidad del riesgo de contaminación de aguas subterráneas por exceso de nitratos.
- Determinar la frecuencia y el balance apropiado entre el riego y la fertilización de nitrógeno y potasio en plantaciones bananeras.
- Dar a conocer las bases para la implantación de esta técnica en el Zamorano.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 SOLUCION DEL SUELO

La solución del suelo representa la fase acuosa del suelo a capacidad de campo. Es diferenciado del agua del suelo, la cual es la humedad que llena los poros entre las partículas del suelo. La solución del suelo es considerada el medio donde ocurren las reacciones químicas y biológicas en el suelo (Sumner, 2000).

La solución del suelo se refiere a la fase líquida del suelo, donde se llevan a cabo las reacciones químicas. Es el medio natural para el crecimiento de las plantas y representa la fracción química disponible en el ambiente.

Según Sumner (2000) la definición más simple de la solución del suelo es la fase líquida asociada con el suelo. Aunque técnicamente sea correcta, no es significativa para muchas perspectivas físicas, químicas y biológicas, debido a que una fracción significativa de la solución del suelo aparentemente no participa en varios fenómenos importantes, por lo que depende de la aplicación y, en algunas instancias, de la metodología usada para obtener dicha solución.

Desde el punto de vista químico, la solución del suelo puede definirse como la “fase líquida en el suelo en la cual la composición es influenciada por flujos de materia y energía” (Sposito, 1994). Según esta definición, la solución del suelo es un sistema abierto que intercambia energía y otros constituyentes con el agua alrededor, aire, y entidades biológicas. Además, definida como fase, implica que la solución del suelo tiene un volumen uniforme de propiedades (como composición y temperatura) y puede ser aislada del suelo.

Wolt (1994), menciona que la variación en la humedad del suelo dentro del rango del contenido de humedad, resulta en efectos sustanciales diferentes en la composición de la solución del suelo. Esto depende en gran parte del suelo en particular y de la química investigada, y talvez en segundo lugar, de la elección del desplazamiento o la técnica de extracción. Sugiere además que cambios en el contenido de agua efectiva puede tener menor efecto en la concentración química de la solución del suelo que en el transporte de químicos de la fase absorbida para el volumen de solución del suelo.

Cuadro 1. Concentraciones típicas de los mayores componentes disueltos en la solución del suelo (Sumner 2000).

Suelo	pH	mM										
		Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺	Ca ⁺	NH ₄ ⁺	Al ⁺	Si ⁺	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁼
Alfisol	6.2	0.79	0.67	0.25	0.75	0.24	0.062	0.36	1.34	0.14	0.23	0.5
Oxisol												
0-10 cm	5	0.86	0.79	0.73	0.4	5.22	--	--	0.53	1.62	3.06	1.53
20-30 cm	5.8	0.3	0.18	0.09	0.01	5.22	--	--	0.53	0.12	0.45	0.23
90-120 cm	4.8	0.28	0.01	0.02	<0.01	0.03	--	--	<.01	<.01	0.25	0.05
Inceptisol												
0-10 cm	7.9	0.07	0.3	0.44	0.64	0.03	--	--	0.01	2.12	0.22	0.11
60-90 cm	6.6	0.14	0.05	0.05	0.05	0.01	--	--	0.01	0.14	0.04	0.02
Ultisol												
15-30 cm	4.7	0.17	0.12	0.07	0.11	--	<0.004	0.14	0.31	--	0.28	0.11
45-60 cm	4.9	0.04	0.12	0.06	0.15	--	0.004	0.08	0.3	--	0.66	0.05
75-90 cm	4.6	0.21	0.64	0.07	0.11	--	0.011	0.1	0.3	--	0.54	0.09
Espodosol	4.3	0.13	0.21	0.08	0.35	--	0.025	0.142	0.02	--	0.82	0.31
Molisol												
Saturación 10 kPa de Humedad	7.65	1.4	0.3	0.85	3.2	0.4	--	--	4.4	3.4	1.9	0.85
	7.52	2.3	0.3	1.1	5.55	0.2	--	--	8.8	3.8	2.3	1.4

Sólo cinco cationes (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ y NH₄⁺) y cuatro aniones (NO₃⁻, HCO₃⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻) son dominantes en casi todas las soluciones, los cuales comúnmente ocurren en milimoles (mM) o mayores concentraciones en la mayoría de suelos (Cuadro 1). El resto de elementos en concentraciones de mM o menores (Sumner, 2000). El mismo autor menciona que la solubilidad de la mayoría de los nutrientes es afectada por el pH del suelo y el contenido de materia orgánica. Y que la composición de la solución del suelo varía con la humedad contenida y por el método de colección de la muestra.

La composición de los compuestos orgánicos solubles en la solución del suelo refleja el componente orgánico de la fase sólida, aunque no es tan compleja. Además se originan de organismos en el suelo, incluyendo exudados de las raíces de las plantas y microbios del suelo, por lo que sus concentraciones en la solución del suelo pueden ser más dinámicas y variables que las de los constituyentes inorgánicos.

Debido a que la solución del suelo es altamente variable en tiempo y espacio, su composición puede ser discutida sólo en términos generales (Cuadro 2). Tiende en concentraciones relativas de constituyentes solubles orgánicos e inorgánicos a ser similar en la mayoría de suelos, pero factores naturales y antropogénicos pueden influenciarla radicalmente en algunos o todos los componentes.

Cuadro 2. Componentes principales encontrados en la solución del suelo (Sumner 2000).

Categoría	Componentes primarios	Componentes secundarios	Otros
Concentración	(10^{-4} a 10^{-2} mol L $^{-1}$)	(10^{-6} a 10^{-4} mol L $^{-1}$)	(< 10^{-6} mol L $^{-1}$)
Cationes	Ca $^{2+}$, Mg $^{2+}$, Na $^{+}$, K $^{+}$	Fe $^{2+}$, Mn $^{2+}$, Zn $^{2+}$, NH 4^{+} , Cr $^{3+}$, Ni $^{2+}$, Cd $^{2+}$, Pb $^{2+}$ Cu $^{2+}$, Al $^{3+}$	
Aniones	HCO 3^{-} , Cl $^{-}$, SO 4^{2-}	H 2 PO 4^{-} , F $^{-}$, HS $^{-}$	CrO 4^{2-} , HMoO 4^{+}
Neutros	Si(OH) 4^0	B(OH) 3^0	

La concentración resultante en la solución del suelo en medios ambientes contaminados depende de la concentración total dentro del suelo, la solubilidad del agua, fuerza de absorción, volatilidad y degradación de los compuestos en cuestión.

2.1.1 Nitrógeno (N) en la solución del suelo

Las cantidades de N en el suelo, en forma disponible para la planta son pequeñas, y principalmente se encuentran en las rocas y minerales de los cuales se formaron los suelos (aproximadamente el 80% el N del suelo proviene de la atmósfera). El N en el suelo se presenta principalmente en tres formas:

- Orgánico: parte de la materia orgánica del suelo. No está disponible para las plantas, y comprende entre 97-98% del total de N en el suelo.
- Inorgánico: forma del N que usan las plantas, iones de NO 3^{-} y NH 4^{+} , que comprende entre 2-3% del N total del suelo (Potash & Phosphate Institute, 1997). El NH 3 libre, rara vez se presenta en suelos con bajo pH (<8.0). Bajo esta condición, el NH 3 existe en forma de NH 4^{+} , la cual tiene gran afinidad con las arcillas de carga negativa y las partículas de materia orgánica; por lo que es menos móvil que el NO 3^{-} (Sumner, 2000). Las variaciones en el contenido de nitrato del suelo son atribuibles a la mineralización, desnitrificación, y otros términos del ciclo del N (Ramos y Kücke, 1991). Según Sumner (2000), el nitrato se mantiene en la solución del suelo, y por lo tanto es relativamente libre de moverse con el fluido del agua; y es frecuentemente la forma dominante de N en el agua percolada y los acuíferos. Amonio es la forma inorgánica más común de N en el suelo. A menudo se encuentra fijado en minerales arcillosos del suelo y disponible lentamente para las plantas. El menciona que en la solución del suelo es extraído por las raíces, y está en equilibrio con el NH 4^{+} intercambiable, que a menudo se equilibra con el no intercambiable. Menciona que las concentraciones de NH 4^{+} en la solución del suelo usualmente son tan bajas que relativamente cortos movimientos ocurren con el flujo del agua.

2.1.2 Potasio en la solución del suelo

Este elemento alcanza en la litosfera una concentración media de 1.58%. El K es absorbido del suelo por las plantas en forma iónica (K $^{+}$). A diferencia del N, el K no

forma compuestos orgánicos en la planta; y juega un papel esencial en la economía del agua y la turgencia de las células (Domínguez, 1997). La capacidad de absorción del K en el suelo depende de la cantidad de arcilla presente (micas).

El K es usualmente el más abundante de los elementos primarios en el suelo. Los suelos minerales contienen K entre 0.04 y 3%, y que el total contenido en los suelos anda entre 3,000 y 100,000 kg/ha dentro de los primeros 20 cm de del perfil del suelo; este total, el 98% se encuentra en forma mineral, y el 2% restante en la solución del suelo y en la fase intercambiable (Sumner, 2000).

El K en la solución del suelo es la forma directamente absorbida por las plantas y microorganismos, y también es la forma que sufre mayor lixiviación en el suelo. Los niveles de K^+ en la solución del suelo son generalmente bajos, a menos que se hayan aplicado enmiendas recientes de este elemento al suelo. La cantidad de K^+ en la solución del suelo varía de 2 a 5 mg/l para suelos agrícolas y regiones húmedas (Sumner, 2000).

El K se presenta en el suelo de tres formas:

- Potasio no disponible: es el K no intercambiable o fijo, que difiere del de K mineral en que no está adherido a las estructuras cristalinas de las partículas del suelo mineral (Sumner, 2000). Es retenido en la estructura de los minerales primarios del suelo (rocas) o fijo entre las capas de las arcillas (ilitas, micas y vermiculitas). Y es liberado muy lentamente a medida que se meteorizan o descomponen por acción de agentes como temperatura y humedad, por lo que no está disponible para la planta en un ciclo de crecimiento en particular. Sólo iones de tamaño similar al K^+ , como NH_4^+ y H_3O^+ , pueden intercambiar el K^+ de estas zonas.
- Potasio lentamente disponible: queda atrapado o fijo entre las capas y la superficie del complejo arcillo húmico, que se contraen y expanden cuando el suelo se seca y humedece; así atrapan los iones de K haciéndolos lentamente disponibles.
- Potasio disponible: porción del K del suelo limitado electrostáticamente como un complejo fuera de la superficie de las arcillas minerales y sustancias húmicas (Sumner, 2000). Es absorbido por las raíces de las plantas y se encuentra en la solución del suelo en equilibrio con el K absorbido y con el de la solución del suelo. Está retenido en forma intercambiable por la materia orgánica y las arcillas del suelo, por lo que hay mucho más K en el suelo que el disponible en la solución del suelo. Este tipo de K representa menos del 2% del total en el suelo.

Los niveles de K intercambiable y no intercambiable comprenden una pequeña porción del total de K. La mayoría del K total del suelo está en la fracción mineral, aunque existe un equilibrio entre las formas de K en el suelo, que afectan su nivel en cualquier tiempo, por lo que esta listo para ser aprovechado por las plantas.

Las formas de K en el suelo en el orden de disponibilidad para las plantas y microorganismos son solución > intercambiable > fijo (no intercambiable) > mineral (Sumner, 2000).

2.2 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

El movimiento del agua ocurre bajo condiciones saturadas e insaturadas. Sumner (2000) menciona que condiciones saturadas ocurren bajo el manto freático donde el movimiento del agua es principalmente horizontal, con menos componentes de flujo en dirección vertical. Mientras que en condiciones no saturadas generalmente predominan sobre la capa de agua (zona "vadose", que es la región aireada del suelo sobre la línea de agua permanente). Las zonas de saturación localizadas existen siguiendo la precipitación o irrigación. Como regla general, el movimiento del agua en la zona no saturada es vertical, pero puede tener componentes laterales.

Suelos saturados ocurren cuando los poros del suelo están completamente llenos de agua. También son llamados saturados aquellos que mantienen aire residual cerca de la superficie del suelo. Radulovich y Baveye (1992) dicen que la mayor cantidad de agua que fluye a través de los suelos bien agregados se mueve rápidamente a través de los poros no capilares, evitando que el perfil del suelo haya interactuado con la solución. A los fertilizantes disueltos y los que son transportados por esta agua les sucede lo mismo. El flujo del agua puede ser transitorio o estacionario. En condiciones de saturación, el flujo de agua es abundante, mientras que en la zona no saturada es casi estacionario.

El gradiente hidráulico, que es la fuerza de empuje detrás del flujo de agua, es el vector que describe la curva de la distribución de energía dentro del suelo. El parámetro principal requerido para predecir el flujo saturado es la conductividad hidráulica saturada (K_s). Predecir el flujo no saturado requiere de la conductividad hidráulica no saturada $\{K(h)\}$ y la función de retención del agua $\{\theta(h)\}$. La (K_s), $\{K(h)\}$ y $\{\theta(h)\}$ son afectadas por la estructura y textura del suelo (Sumner, 2000).

El movimiento del agua en el suelo ocurre por:

- **Infiltración:** es clave en el proceso porque determina cuánta agua de lluvia, irrigación o derrame de contaminación entra al suelo y cuánto se convierte en escorrentía (Figura 1). Durante la infiltración un frente húmedo de alto contenido de agua se mueve hacia abajo a través del suelo sobre el tiempo. El movimiento del frente húmedo depende de la distribución del tamaño de los poros y de la línea de la función de retención de agua. Para suelos de textura granular con escasa distribución de poros, el frente húmedo será más abrupto y en suelos de textura fina, será más difuso. El frente húmedo es una combinación del agua adherida por la lluvia y el agua desplazada a poca profundidad.
- **Redistribución:** el agua continúa su movimiento en el suelo un tiempo después de una lluvia o evento de irrigación. Es el proceso por el cual el agua drena de regiones cerca de la superficie hacia mayores profundidades. Al igual que en infiltración, ocurre más rápido en suelos de textura gruesa por la velocidad de la función de retención de agua, comparado con suelos de textura fina. Una vez que parte de esta agua drena, el contenido de agua decrece y la conductividad hidráulica saturada pasa a ser menor, y efectivamente la redistribución se detiene. En suelos de textura fina, el drenaje inicial es lento y cerca de saturación, pero la redistribución continúa por más

tiempo porque la conductividad hidráulica saturada en la región drenada no es insignificante.

En ausencia de evapotranspiración (ET) o irrigación, el agua se distribuye por igual en todas las profundidades y la cabeza principal avanza linealmente con la profundidad (± 1 cm/cm de profundidad).

El contenido de agua del suelo cerca de la superficie una vez que la redistribución se vuelve insignificante se llama capacidad de campo.

- Flujo preferencial: es el término que describe la rapidez inusual o el movimiento profundo del agua o solutos a través de una fracción de la sección transversal disponible para el flujo. Incluye el flujo a través de los macroporos, grietas y flujo sectorial.

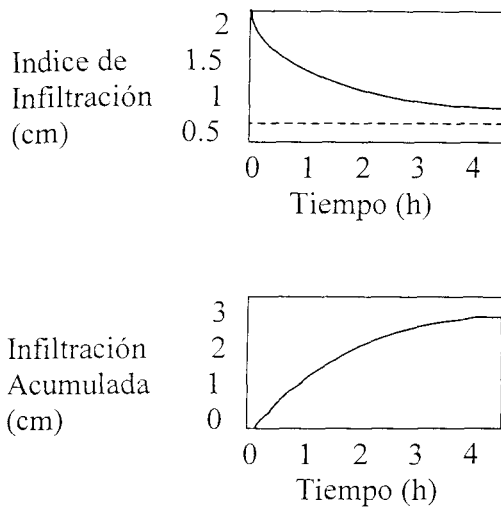


Figura 1. Índice de infiltración e infiltración acumulada en función del tiempo (Sumner, 2000).

2.2.1 Movimiento de solutos en el suelo

Sumner (2000) lo describe como el transporte de una sustancia disuelta (solute) que depende de la magnitud y dirección de fluido del solvente (agua).

El movimiento y destino de los solutos bajo la superficie del suelo son afectados por un gran número de procesos físicos, químicos y microbiológicos que requieren una amplia utilización de procesos matemáticas y físicos, además de amplia experimentación para estudiar, describir y cuantificar el transporte de solutos en el suelo.

Debido a la diferencia en velocidad existente entre el flujo del agua en los poros capilares y no capilares, sólo un desplazamiento parcial del agua residente y los solutos, aplicando agua y solutos, ocurre (Radulovich y Baveye, 1992). Este comportamiento se describe como canalización, corto circuito, flujo preferencial o desplazamiento parcial, que se

refiere al flujo a través de los poros no capilares. La ocurrencia de este flujo implica que una porción significativa de agua aplicada, junto con los solutos y la materia suspendida que esta contiene, se mueve más rápido y profundo en el perfil del suelo que en el modelo convencional uniforme.

Los principales mecanismos de transporte son:

- Difusión: la difusión molecular o iónica es un importante mecanismo de transporte de solutos en el suelo, en dirección donde hay poca o nada de fluido de agua. Y la transferencia de moléculas de los solutos usualmente ocurre de regiones de alta a baja concentración. La fuerza que realiza ese movimiento es llamada potencial de gradiente químico.
- Dispersión: las variaciones locales en el flujo de agua en el medio poroso dirigen la dispersión mecánica, que ocurre debido a:
 1. El desarrollo de una velocidad dentro del perfil de un poro individual, tanto que la mayor velocidad ocurre en el centro del poro, y menor cantidad o nada de flujo en las paredes del poro.
 2. Diferencia de velocidad de flujo en poros de diferente tamaño.
 3. La dirección del flujo principal del agua en poros medianos siendo diferente al actual dentro de los poros individuales, el cual difiere en forma, tamaño y orientación.
 4. La convergencia o divergencia de partículas del soluto del mismo poro. Estos procesos contribuyen a incrementar la dispersión, en la cual la velocidad inicial del frente de concentración se vuelve lenta durante el movimiento a lo largo de la dirección del flujo principal.
- Adsorción: sustancias disueltas en la fase líquida pueden interactuar con muchos constituyentes del suelo como los minerales primarios, óxidos y coloides orgánicos e inorgánicos. Los iones disueltos en la solución del suelo contrarrestan las partículas del suelo cargadas en la superficie causado por la sustitución isomórfica de un elemento a otro en el claro enrejado de los minerales arcillosos, por la presencia de iones de hidróxido en la superficie de los sólidos u otros mecanismos. La superficie cargada de un grupo de partículas del suelo produce un campo eléctrico que afecta la distribución de cationes y aniones junto con la película de agua a su alrededor.

2.2.2 Movimiento de N en el suelo

Las plantas absorben la mayoría del N en forma de nitrato (NO_3^-) o iones amonio (NH_4^+), el primero en mayores cantidades que el NH_4^+ (Tisdale *et al.*, 1993). El NO_3^- (lixiviable) es reducido a NH_4^+ (retenido) que luego se convierte en aminoácidos dentro de la planta (Potash & Phosphate Institute, 1997).

El NO_3^- es altamente soluble y no tiene fuerte afinidad por las partículas del suelo; por lo tanto está en disposición de ser transportado por escorrentía o percolación (Sumner, 2000). El NO_3^- es completamente móvil en el suelo y se desplaza libremente en el agua del suelo. Cuando llueve abundantemente se mueve hacia abajo en el perfil del suelo por

el exceso de agua, y en épocas de sequía extrema sube con el agua capilar, produciendo acumulaciones de NO_3^- en la superficie.

El N puede ser temporalmente inmovilizado durante la descomposición de la materia orgánica por los microorganismos del suelo si se encuentra en bajas cantidades.

Existe un alto flujo de NH_4^+ en la mayoría de suelos, en las pérdidas por mineralización o inmovilización, pero la mayoría de este NH_4^+ nunca deja el horizonte superficial del suelo, en contraste con el NO_3^- , que a menudo es encontrado en el agua del suelo (Sumner, 2000).

2.2.3 Movimiento de K en el suelo

Es vital mantener niveles adecuados de K en el suelo, debido a su baja movilidad, excepto en suelos arenosos u orgánicos. A diferencia del N, tiende a mantenerse en el sitio donde se coloca cuando se aplica como fertilizante. Cuando se mueve, lo hace por medio de difusión, en desplazamientos lentos y de corto recorrido por las películas de agua que rodean las partículas del suelo.

Los factores que influyen en el movimiento del K aplicado al suelo incluyen la CIC, el pH del suelo, el encajado, los métodos y niveles de aplicación, y la absorción por las plantas (Sumner, 2000). Condiciones secas hacen más lento el movimiento, pero altos niveles de K en el suelo lo aceleran.

2.3 EVAPOTRANSPIRACION

La mayor parte del agua consumida por las plantas es evaporada a la atmósfera a partir de la superficie foliar en un proceso denominado transpiración, y de la evaporación a partir del suelo. Al proceso conjunto de ambos se le denomina ET.

La evaporación del agua del suelo por la atmósfera, tiene gran importancia en la agronomía para aprovechar o predecir el comportamiento del agua en el suelo (Giráldez *et al.*, 1990), quienes establecen que el agua del suelo se evapora siguiendo tres etapas: una controlada por las condiciones externas, atmosféricas; otra por las características propias de transmisión de agua del suelo, edafológicas; y la otra por los gradientes térmicos, cuando el suelo está seco y el flujo de agua transcurre preferentemente en forma de vapor.

La medida de la humedad en el suelo es un parámetro que no se puede controlar adecuadamente, lo que obliga a realizar balances entre periodos en los que no haya variación de la humedad del suelo. Aunque la ET calculada de este modo no difiere mucho de la que se obtiene considerando las variaciones de humedad.

Según Tuñón *et al.* (1990) el valor medio de la ET es del orden del 92%, lo que implica que la infiltración eficaz es sólo del 8%, inferior a la que habitualmente se considera en los balances empíricos. Esto implica que la única recarga de los acuíferos es la producida por las lluvias de los meses invernales, y que el retorno del riego es prácticamente inapreciable.

En los métodos que utilizan el balance de agua, la medida de la ET es fundamental; sin embargo, la medición resulta difícil, por lo que se emplean métodos semi-empíricos para su estimación (Ramos y Kücke, 1991).

La recarga es uno de los parámetros hidrogeológicos más complejos de determinar, ya que suele ser necesario utilizar métodos empíricos para la determinación de algunos de los parámetros que intervienen en su cálculo, como la ET (Tuñón *et al.*, 1990). Sólo la cantidad de lluvia se puede cuantificar directamente, aunque pueden esperarse grandes variaciones locales, en valores absolutos e intensidad de lluvia.

Por esto es necesario recurrir a los llamados métodos indirectos de determinación de recarga, y con esta, la tasa de ET. Estos métodos son los que utilizan las parcelas experimentales y, particularmente, los lisímetros. La ausencia o valores cercanos a cero de ET, significan que se produjo un mayor volumen de agua lixiviada que el valor de su ingreso, lo que se justifica por una variación en el agua almacenada en el suelo.

El método de estimación utilizado corrientemente es el del Evaporímetro de cubeta de clase A, en el que la ET_0 viene dada por la siguiente ecuación:

$$ET_0 = K_p \times E_0$$

ET_0 = evapotranspiración de referencia en mm/día.

K_p = coeficiente de tanque que depende de las condiciones de cobertura del suelo donde se ubica el tanque, velocidad del viento y humedad relativa.

E_0 = evaporación; en tanque Clase A en mm/día.

Ramos y Kücke (1991) mencionan que en la estimación de la ET, conviene considerar dos casos: la ET no está limitada por un déficit de agua en el suelo u otro factor, y la ET está limitada por la falta de agua o nutrientes, o algún factor no climático que afecta el crecimiento normal de las plantas (enfermedades o plagas).

2.4 PÉRDIDAS DE NUTRIENTES EN EL SUELO

La migración de nutrientes desde la superficie hasta la base de los acuíferos tiende a ser un proceso lento y puede demorar muchos años, incluso varias décadas, antes de que se haga notorio en los abastecimientos de aguas subterráneas (Foster *et al.*, 1991).

La gran cantidad de pérdidas por lixiviación ha sido reconocida como uno de los problemas serios limitando la efectividad de los fertilizantes en los trópicos (Radulovich y Baveye, 1992).

Lixiviación se refiere al movimiento en forma descendente de nutrientes en el agua a través del perfil del suelo y fuera de la zona radicular (Sumner, 2000). Según Mabbett (1998) es el proceso de remoción de los materiales más solubles del suelo por acción de las aguas que percolan a través de su perfil y, en consecuencia, relacionado con el desarrollo de la acidez de los suelos.

2.4.1 Pérdidas de N en el suelo por lixiviación

Sumner (2000) menciona que el nitrato es la forma preferida del N para ser perdida porque usualmente es la más abundante que se mueve en el agua del suelo, agrega que la importancia de pérdidas de N por lixiviación varía con factores que determinan cuánto y cuándo el agua fluye en forma descendente a través del suelo. Y que estas pueden ser sustanciales en sistemas donde la mineralización o fertilización resultan en altas concentraciones de NO_3^- durante la lixiviación. Menciona también que en la mayoría de sistemas suelo-planta en que ocurren pérdidas por lixiviación, son asociadas con eventos climatológicos de corto periodo que no pueden ser controlados ni predecidos.

Aragón (1997) define la lixiviación o lavado del nitrato como el arrastre del mismo por el agua del suelo que percola más abajo de la zona radicular. Este proceso es el que produce la contaminación de las aguas subterráneas por nitrato, ya que, en general, una vez que éste deja de estar al alcance de las raíces, continúa su movimiento descendente hacia los acuíferos sin apenas ninguna transformación química o biológica.

Klocke *et al.* (1999) anotan que la lixiviación de los nitratos del N de la zona radicular en tierras de intensiva producción de maíz, es el mayor contaminante del agua del suelo en algunas regiones con riego intensivo del oeste de la franja maicera de los Estados Unidos.

En el suelo el N está sujeto a un conjunto de transformaciones y procesos de transporte que se denomina ciclo del N. Debido a las interacciones que existen entre todas las partes de este sistema, para poder reducir la lixiviación de nitrato, sin disminuir apreciablemente la producción de los cultivos, es necesario conocer como influyen las prácticas agrícolas y los factores ambientales en los diversos procesos del ciclo (Aragón, 1997).

2.4.2 Pérdidas de K en el suelo por lixiviación

El K en solución del suelo puede ser tanto lixiviada como absorbida por las plantas o el suelo (Figura 2). Varios factores influyen el movimiento de K en el suelo, incluyendo la CIC, el pH del suelo, el encalado, métodos e índice de aplicación de K, y la absorción por las plantas.

La habilidad de un suelo para retener el K aplicado depende de la CIC del suelo, por lo que la cantidad de arcilla y la materia orgánica en el suelo influyen fuertemente en el grado de lixiviación del K. Los suelos con alta CIC tienen gran habilidad de retener el K

aplicado, mientras que la lixiviación del K es a menudo un problema en suelo salinos (Sumner, 2000).

El K puede ser atraído a la superficie de las arcillas y los coloides orgánicos del suelo y ser mantenido en forma intercambiable hasta que reemplace en la solución del suelo al K absorbido por la raíz de la planta, o sea remplazado en el sitio de intercambio por otro catión. Por lo que parte del K se mantiene en la solución del suelo.

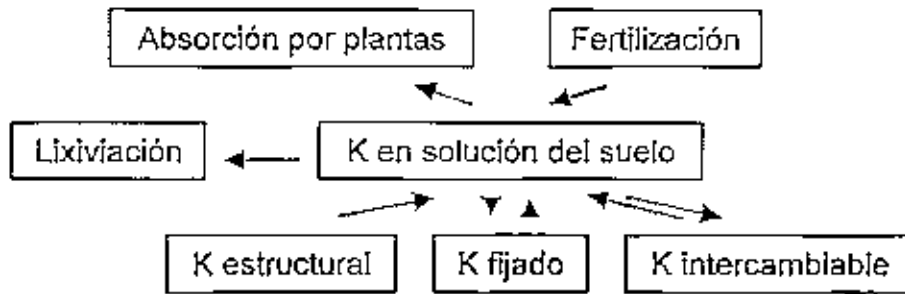


Figura 2. Pérdidas de K en el suelo (Sumner, 2000).

Cierta cantidad puede lixivarse en suelos arenosos u orgánicos, debido a la baja capacidad de retención de cationes de este tipo de suelos y a que la materia orgánica sólo atrae débilmente al K^+ en los sitios de intercambio. El resto es fijada (atrapada en forma lentamente o no disponible) en suelos dominados por arcillas laminares de tipo 2:1 (vermiculita, illita) (Potash & Phosphate Institute, 1997).

Andriulo *et al.* (1997) aseguran que aparte del N, los otros dos principales nutrientes, fósforo y potasio, no son lixiviados de tierras cultivadas en cantidades significativas, debido a su fuerte retención fisicoquímica en el suelo.

2.5 CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La contaminación, la define Sagardoy (1992) como la introducción de compuestos de origen agrario al medio acuático, directa o indirectamente, que trae consecuencias que podrían poner en peligro la salud humana, perjudicar los recursos vivos y el ecosistema acuático, causar daños a los lugares de recreo u ocasionar molestias para otras utilidades legítimas de las aguas.

Aragón (1997) define las aguas subterráneas como todas las aguas que estén bajo la superficie del suelo en la zona de saturación y en contacto directo con el suelo o el subsuelo.

Sagardoy (1992) define un contaminante del agua como cualquier organismo vivo, mineral o compuesto químico cuya concentración limita o impide los usos benéficos del

agua. Esta noción de contaminante entraña el hecho de que pueda aceptarse un cierto nivel de contaminación, siempre que no obstaculice los usos benéficos del agua. Y menciona con esto, que la contaminación de las aguas subterráneas normalmente es una consecuencia de las actividades del hombre en la superficie del suelo.

La contaminación del agua subterránea puede ser considerada permanente. Y la recuperación de los acuíferos contaminados casi siempre resultará en una operación costosa y lenta, con frecuencia impracticable, conduciendo al abandono de los escasos recursos de aguas subterráneas con un considerable costo económico (Sagardoy, 1992).

Además de los requisitos cuantitativos de agua, bien definidos en la agricultura, existe también un importante aspecto cualitativo (Mabbett, 1998). Quien menciona que hay básicamente tres niveles de calidad de agua, según su grado de contaminación:

- Contaminación física causada por arena, limo, partículas y materia orgánica.
- Contaminación biológica causada por bacterias, virus, protozoos, algas y animales superiores.
- Contaminación química en la forma de diversos iones, incluyendo sodio, nitrato, calcio, magnesio, hierro, y boro. Los desequilibrios en el contenido iónico del agua pueden afectar directamente a los cultivos o a los animales por la acción de un ión específico, o indirectamente, haciendo que el agua sea demasiado ácida o alcalina, o fomentando el crecimiento de microorganismos, por eflorescencia de algas y ferrobacterias.

La actividad agrícola puede contribuir con los tres tipos de contaminantes: sólidos en suspensión, organismos vivos y componentes químicos (Sagardoy, 1992). Los sólidos en suspensión provienen de los procesos de erosión de suelos producto de malas prácticas agrícolas. Los elementos químicos son aportados principalmente por la fertilización, la aplicación de plaguicidas y el agua de riego. Algunos de estos elementos se fijan en el suelo y no se sabe mucho de su efecto a largo plazo, pero partes de ellos llegan hasta las masas de aguas y, dependiendo de su concentración, pueden constituir un problema serio para el uso posterior del recurso (Andriulo *et al.*, 1997).

2.5.1 Contaminación por nitratos de aguas subterráneas

El aumento de la preocupación del público sobre la contaminación de nitratos en el agua del suelo ha causado que los agricultores centren su atención en reconsideraciones sobre la aplicación de nitrógeno y estrategias de manejo (Martin *et al.*, 1993).

Aunque el N es extremadamente valioso y un importante nutriente dentro del agua en casi todos los ecosistemas del globo, este se vuelve un contaminante una vez que deja un ecosistema y se mueve dentro de otro (Sumner, 2000).

Aragón (1997) define la contaminación difusa de las aguas por nitrato de origen agrario como la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas debido al nitrato de origen agrario. El término difuso se refiere a que esta contaminación no ocurre en un

punto específico de un cauce, sino que se produce espacialmente en una o dos dimensiones y es por tanto difícil de cuantificar.

El nitrato es conocido como contaminante del agua y es el principal agente de eutroficación en esteros y sistemas costeros. Este ión es añadido directamente a los ecosistemas en algunos tipos de fertilizantes y es producido por la mineralización y nitrificación de otros fertilizantes y materiales orgánicos.

2.6 MÉTODOS DE MUESTREO DE LA SOLUCIÓN DEL SUELO

Los métodos de muestreo de la solución del suelo se basan en la profundidad a la que se quiere efectuar la medición, la determinación de la concentración de iones como el nitrato y la medida del drenaje (Ramos y Kücke, 1991).

Los métodos comunes de muestreo de la solución del suelo son el desplazamiento por un fluido con agua y extracción de la solución directa por vacío, presión aplicada o centrifugación (Tuñón *et al.*, 1990).

Una de las dificultades de los métodos basados en el muestreo de la solución del suelo por muestreo del suelo o por succión, es que no se conoce con certeza la concentración de la solución del suelo que fluye: en el muestreo de suelo, la concentración que se mide es la concentración media (agua móvil e inmóvil), mientras que en el muestreo por succión se supone que la solución obtenida es representativa de dicha solución, y esto no se puede asegurar totalmente, ya que la solución que fluye puede no haberse equilibrado, en cuanto a su concentración de nitrato con la solución menos móvil de los poros más pequeños.

Tuñón *et al.* (1990) afirman que aunque la lixiviación de nitrato es de gran importancia en la contaminación de las aguas subterráneas, su medición no resulta fácil.

Básicamente, la lixiviación de nitrato se puede medir directamente conociendo para cada período corto de tiempo el flujo de solución del suelo, a través de un determinado plano, y su concentración media de nitrato. La exactitud de estas dos mediciones determina la lixiviación de nitrato (Ramos y Kücke, 1991).

Los principales problemas de estos métodos son: el carácter puntual de la medida; y la modificación del suelo debida a la instalación del equipo de medida. Razones por las que estos métodos directos no son muy empleados.

Los métodos indirectos de medida son más frecuentes. Entre los más utilizados están:

- Los basados en medidas de gradiente hidráulico y conductividad hidráulica.
- Los basados en el balance de agua.
- Modelos de simulación (combinan los dos métodos anteriores con algún método de estimación de la ET).

2.6.1 Lisímetros

Lisímetro se refiere a cualquier método ideado para muestrear solutos presentes o en movimiento a través del perfil del suelo (Wolt, 1994). Israelsen *et al.* (1990) lo definen como un aparato en el cual un volumen de suelo es colocado en un contenedor para aislarlo hidrológicamente del suelo a su alrededor, del cual debe ser representativo.

El lisímetro se utiliza para medir las pérdidas por lixiviación de la fertilización, muestrea la solución del suelo y evalúa del potencial de lixiviación de pesticidas, entre otros. Según Israelsen *et al.* (1990) el lisímetro tiene gran importancia, no sólo para la recolección de información de ET, sino también como un chequeo independiente en la conveniencia de métodos micrometeorológicos y para la calidad de fórmulas empíricas usadas para estimar la ET.

La interpretación de la composición de la solución del suelo tomada por el lisímetro depende del grado de difusión y movilidad del agua del suelo. Las diferencias de velocidad de flujo del agua, a través de los poros inter-agregados, ayuda a diferenciar la composición química de la solución obtenida de diferentes horizontes del suelo.

Wolt (1994) menciona cuatro tipos de lisímetros existentes:

Monolítico: para bloques o columnas de suelo inalterados.

de Llenado: para suelos donde la estructura natural ha sido perturbada.

de Tensión: también llamado de inyección, succión, de punto o mini-lisímetros.

de Drenaje: cualquier instalación donde una cuneta, cacerola, embudo, o plato es colocado bajo un suelo inalterado.

En la determinación de la lixiviación de nitrato los errores en la medida del drenaje se combinan con los cometidos en la obtención de la concentración de nitrato de la solución drenante (Ramos y Kütcke, 1991). No existe un método estándar con el que comparar los diferentes métodos, ya que los lisímetros, considerados como los más exactos, pueden presentar problemas derivados de la dificultad para reproducir las condiciones en el campo.

2.6.1.1 Lisímetros de drenaje. Tienen como objetivo conocer aspectos como el cálculo de la ET, recarga y tránsito de contaminantes agrícolas (Tuñón *et al.*, 1990).

Los lisímetros de drenaje son usados para medir el drenaje del agua del suelo para determinar el movimiento descendiente de químicos a través del perfil del suelo (Martín *et al.*, 1993). Son tuberías de concreto enterrados en el suelo colocados en una base de cemento con paredes cubiertas internamente con capas de plástico para evitar la infiltración del agua y prevenir el contacto con el suelo externo.

Los lisímetros se diseñan de forma que se anula la escorrentía, de modo que todo el agua que entra en el sistema queda para contribuir al relleno de los poros del suelo permitiendo la infiltración una vez superada la capacidad de campo (Tuñón *et al.*, 1990). De forma

que, se puede medir la infiltración aforando el volumen de agua que ha percolado por el lisímetro, el resto de agua o ha quedado retenida en el suelo o se ha evaporado.

Según Martín *et al.* (1993) llenar el lisímetro con perfil de suelo disturbado involucra remover el suelo del sitio, capa por capa, y colocarlo luego dentro del lisímetro de nuevo capa por capa, así lograr la mejor representación del suelo en su estado original.

Ramos y Kücke (1991) mencionan en su trabajo que los lisímetros permiten obtener muestras de la solución que drena y del volumen de drenaje. Sin embargo, este método que podría considerarse como el método estándar de medida de la lixiviación de nitrato presenta también algunos inconvenientes:

- Los lisímetros en los que se puede recoger los lixiviados suelen ser caros.
- Las condiciones del suelo en el lisímetro, rara vez son representativas de las del suelo en la parcela experimental en la que se quiere obtener las medidas, tanto en movimiento del agua como algunos componentes del ciclo del N en el suelo, principalmente la mineralización y la desnitrificación.
- Pueden presentar problemas de poca profundidad para el desarrollo de las raíces.
- Pueden haber problemas de flujo preferencial en la zona de contacto del suelo con las paredes del lisímetro.

Sumner (2000) anota que el flujo del agua a través de los grandes lisímetros afecta directamente la composición química de los lixiviados. En lisímetros rellenos, la estructura original es destruida, y en la ausencia de plantas, el flujo preferencial dentro del suelo es eliminado.

Tuñón *et al.* (1990) documentan un experimento práctico con lisímetros de drenaje llevado a cabo en la región sur-este de España, donde se instalaron dieciséis lisímetros de 1 m³ de capacidad y uno de 3.8 m³, todos de pared rugosa impermeabilizada sintéticamente, con fondo de grava silícea para facilitar el drenaje. En la pared interna instalaron un tubo de PVC para reducir las pérdidas por flujos preferenciales.

Los lisímetros fueron rellenos con material arcilloso-limoso extraído de la misma parcela, compactando el suelo lo más homogéneamente a las condiciones naturales. Las densidades aparentes en cada uno mostraban dispersión, siendo la media 1.64 g/cm³.

Controlaban las entradas de agua y aplicaban 50 l/m², y para controlar las lluvias instalaron una estación meteorológica automatizada, con la que calcularon el valor de la ET en los lisímetros. De igual forma las salidas, aforando el volumen que salía de cada uno.

Algunos lisímetros mostraron un comportamiento distinto, aunque no se desvían apreciablemente de la media. El lisímetro 5 presentó flujos rápidos debido a flujos preferenciales; en el número 7, los flujos rápidos están relacionados al bajo valor de la densidad aparente; el lisímetro 9 fue el de mayor superficie; y el número 15, que sólo recibió agua de lluvia, también presentó infiltración efectiva al acuífero, lo que confirma que el retorno de riego es poco eficaz como mecanismo de recarga.

Martín *et al.* (1993) también mencionan un experimento realizado con este tipo de lisímetros, donde estudiaron el impacto de la agricultura con irrigación sobre el potencial de lixiviación de nitratos, para ésto se instalaron dos lisímetros de drenaje en un campo de crecimiento cerca de Mendon, Michigan, de suelo franco arcilloso; de 1.52 m de diámetro, 1.22 m de largo y 1.83 m de profundidad, con contenido de perfil de suelo disturbado.

Los lisímetros se colocaron 26 cm bajo la superficie para permitir el laboreo. Se comparó la fertilización convencional y las estrategias de riego, con estrategias que utilizan menor cantidad de fertilizante nitrogenado y agua para riego manteniendo el rendimiento.

Las parcelas de investigación mostraron mejor drenaje que las convencionales, debido a la menor cantidad de agua de riego aplicada. La lixiviación de nitratos en las primeras fue menor, debido a la excesiva aplicación de N en pre-siembra.

2.6.1.2 Lisímetros de succión. Absorben una porción de la solución de los suelos con humedad mayor a capacidad de campo, pero no es conveniente su uso en suelos saturados. Es recomendado para muestreos a profundidades menores de 1.5 m.

Éstos lisímetros son cápsulas porosas que se emplean para la extracción de la solución del suelo en condiciones de campo. Son relativamente baratos, se instalan fácilmente y permiten el muestreo de solución del suelo con cierta frecuencia (Klocke *et al.*, 1999).

La proporción en área del volumen del suelo muestreado es menor que para los otros tipos de lisímetros, y una limitación de su uso es la poca habilidad para determinar la zona de influencia. El volumen de suelo muestreado no es muy grande y depende de la humedad del suelo (Ramos y Kücke, 1991).

Este tipo de lisímetros utiliza un inyector (bomba de succión) para mantener la tensión aplicada, la cual es operada tanto interrumpida como constantemente, y el tiempo de muestreo varía desde menos de una hora en suelos húmedos hasta más de un día en suelos secos. Se recomienda que la succión que se aplica a los tubos que llevan las cápsulas sea sólo ligeramente superior a la tensión del agua en la zona del suelo donde se muestrea.

Para este tipo de lisímetros, el coeficiente de muestreo y la zona de influencia son menos variables en el tiempo, por lo tanto, la comparación relativa entre soluciones es mejor, sobre la llevada a cabo por lisímetros con tensión interrumpida.

Ramos y Kücke (1991) se refieren a los lisímetros de succión como muestreadores que constan de un tubo de PVC, en el que en un extremo se pega una cápsula cerámica porosa, y en el otro, que sobresale del suelo, un tapón que permite la aplicación de una determinada succión que se mantiene durante varios días. Éstos muestreadores se instalan en un agujero en el suelo, con un diámetro ligeramente superior al del tubo de la cápsula, introduciéndolos hasta que esta llega al fondo del agujero. Para facilitar el contacto hidráulico de la cápsula con el suelo de alrededor, se prepara antes de introducir

el muestreador en el agujero una pasta hecha con el mismo suelo que se introduce en el fondo del agujero.

Klocke *et al.* (1999) mencionan que las grietas que se forman en suelos arcillosos aumentan a medida que el suelo se seca, reducen la superficie de contacto de la cápsula con el suelo y la extracción de la solución del suelo. También es posible que se produzca flujo preferencial en la zona de contacto del tubo del muestreador con el suelo.

2.7 FERTIRRIGACION

Es la aplicación de fertilizantes disueltos en el agua de riego. En la práctica se asocia más con la aplicación de fertilizantes en los riegos localizados por goteo y exudación.

Los riegos localizados de bajo caudal y alta frecuencia, según Burt *et al.* (1995) aventajan a los convencionales de alto caudal y baja frecuencia, en la asimilación de los nutrientes por ubicarse en la zona de máximo desarrollo radicular; mantiene el suelo con humedad constante, reduce el volumen de suelo mojado sin disminuir el rendimiento del cultivo; ahorra agua; adecua la dosificación de elementos nutritivos a las necesidades del cultivo; evita la formación de capas de agua y costras superficiales de elementos del suelo.

Aragón (1997) menciona que el regadío puede facilitar la contaminación de las aguas por nitrato debido a percolación hacia capas más profundas, arrastrando nitrato y partículas en suspensión que pueden llevar adheridas otras formas del N como el amonio, a alcanzar los acuíferos subterráneos. Los riesgos de contaminación en los regadíos varían según las características del suelo como: permeabilidad, capacidad de retención de agua, profundidad del suelo, pendiente y nivel de la capa freática.

La fertirrigación debe utilizarse con sistemas de alta eficiencia distributiva del agua, para prevenir el riesgo de contaminación por nitrato. El fertilizante no debe ser puesto en el agua desde el comienzo del riego, sino después de haber aplicado el 20-25% del volumen de agua y debe terminar cuando se haya suministrado el 80-90% del volumen de agua (Sagardoy, 1992).

El riego moderno es un conjunto integrado que requiere altos niveles de energía y equipo técnicamente refinado, pero de fácil uso. Este equipo obtiene el agua de fuentes subterráneas o de superficie, la transporta a los campos y la suministra a los cultivos a un volumen e intensidad adecuados a los requisitos de las plantas, la conservación del agua y, la efectividad del costo. Los sistemas de irrigación se están usando cada vez más para aplicar los compuestos químicos necesarios para la nutrición y protección de los cultivos, así como también los fertilizantes sintéticos solubles (Mabbett, 1998).

Para una utilización racional del fertilizante es preciso suministrar abonos nitrogenados lo más próximo posible en el tiempo al momento de absorción por la planta; reduciendo el peligro de que sean lavados en el período entre el abonado y la asimilación por el cultivo.

Además la aplicación del abono ha de basarse en el principio de maximizar la eficiencia de utilización por parte del cultivo y minimizar las pérdidas por lavado.

El fertirriego presenta algunos inconvenientes como la obstrucción de los emisores por precipitación de los fertilizantes; requiere fertilizantes de gran pureza y solubles; y control de la salinidad y agua de buena calidad.

Radulovich y Baveye (1992) sostienen que aumentando la eficiencia en el uso de fertilizantes por medio de la proporción aplicada de fertilizante que se mantiene en el suelo para ser tomada por el cultivo, afecta positivamente tres componentes importantes de la agricultura desarrollada en los países tropicales:

- Eficiencia económica: producciones bajo sistemas de entrada de medio a alto se mantienen en el mismo nivel con un ahorro en el uso de fertilizantes, y los pequeños productores serán atraídos a usar la misma técnica debido a que el retorno será mayor por unidad aplicada.
- Sostenibilidad: lograda si menos fertilizante es requerido por unidad de rendimiento.
- Medio ambiente: reducidas las pérdidas de fertilizante con el agua percolada reduciría la oportunidad de que estos terminen contaminando el agua subterránea o superficial.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LOCALIZACION

El uso de lisímetros de succión y drenaje para evaluar la concentración de NO_3^- y K^+ en la solución del suelo fue evaluado de mayo a septiembre del 2000 en el área de "Los Mangos" y Palo Verde A, en la zona bananera de Coyoles, propiedad de la "Standard Fruit Company" localizada en el Municipio de Olanchito, Departamento de Yoro, Honduras. Esta zona está a una altura de 600 msnm, con temperatura y precipitación promedio anual de 26°C y 750 mm, respectivamente. El estudio se llevó a cabo en esta finca por encontrarse ahí ubicados los lisímetros de drenaje y la facilidad del terreno para trabajar con los de succión. La Standard Fruit Company es una compañía agrícola que cuenta con un alto nivel tecnológico y un reconocido departamento de investigación, quienes brindaron todo su apoyo para que este trabajo se llevara a cabo.

3.2 MATERIALES Y METODOS

3.2.1 Lisímetros de succión

Se trabajó con tres lisímetros modelo SW-074 de "Soil Measurement Systems". Son tubos sellados de acero inoxidable, con una pequeña cámara de aire interior, en forma de cono en el extremo inferior para facilitar su colocación en el suelo y plano en el superior con dos tuberías de salida de menor diámetro (Cuadro 3). Es recomendado para muestrear hasta 1.5 m de profundidad.

Cuadro 3. Medidas del lisímetro de succión modelo SW-074.

	cm
Longitud total	11.43
Longitud de la membrana de poros	9.40
Diámetro exterior	2.22
Diámetro de tuberías de salida	0.32
Longitud de tuberías de salida	6 y 11

Una bomba de succión produce un vacío constante (700 mbar) que colecta la solución del suelo presente en el lisímetro que ha entrado a través de los poros de la membrana de acero inoxidable, por lo que éste debe tener un buen contacto con el suelo. La solución

es así llevada hasta un frasco sellado de recolección en la superficie, colocado entre ambos. La duración del muestreo depende de la cantidad de solución requerida, el tipo de suelo y la humedad del suelo. El tiempo de muestreo varía desde menos de una hora en suelos húmedos, hasta más de un día en suelos secos.

3.2.1.1 Instalación. La correcta instalación de los lisímetros de succión requiere asegurar un buen contacto entre los poros de acero inoxidable y el suelo alrededor, y minimizar el potencial de migración vertical del flujo a lo largo del hueco (Figura 3).

Los pasos seguidos para la instalación de un lisímetro son los siguientes:

1. Lava cuidadosamente con detergente y agua destilada el exterior del lisímetro y sumerge en agua destilada por tres minutos.
2. Conecta y enciende la bomba de succión al lisímetro dentro del agua para remover el detergente adherido a la superficie, y asegura que las conexiones entre la tubería de salida y las uniones de la bomba queden herméticamente selladas. Repite en tres ocasiones.
3. En el campo, donde se instala hace un hueco del doble del diámetro del lisímetro, uno para cada profundidad que planea muestrear.
4. Hace una mezcla del suelo extraído con agua (barro) y rellena con ella nuevamente el hueco.
5. Conecta las tuberías de salida del lisímetro a tubos de polietileno de 0.44 cm de diámetro. Una de las tuberías va hasta el frasco de colección (erlenmeyer de 250 ml), la otra a la bomba de succión.
6. Coloca cuidadosamente el lisímetro dentro del hueco relleno a manera que exista buen contacto entre el suelo y el lisímetro.
7. Aplica vacío constante para extraer la succión con la bomba.
8. El segundo tubo de salida se cierra durante la aplicación del vacío, y luego se abre para remover la última cantidad de líquido dentro del sistema.

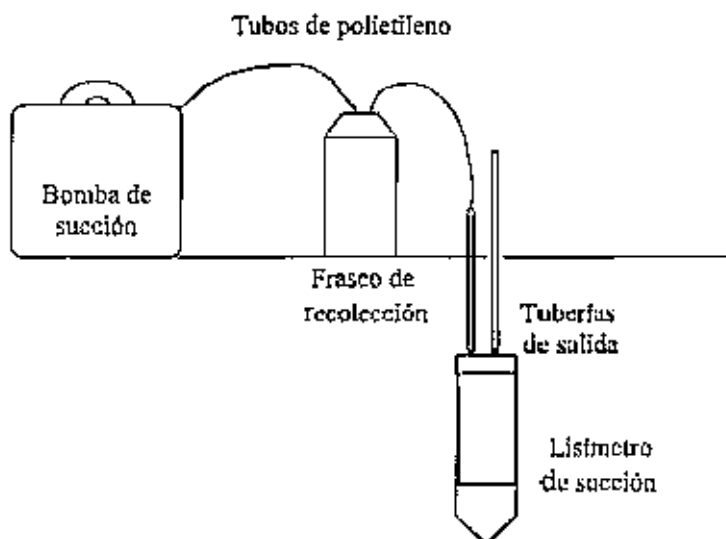


Figura 3. Posición del lisímetro de succión en el suelo (no a escala).

Tres lisímetros de este tipo se colocaron dentro de una plantación comercial de banano, en la zona de Palo Verde A, 6 m al sur de la estación meteorológica de dicha zona, en la finca antes mencionada.

Los lisímetros se colocaron a 20, 40 y 60 cm bajo la superficie del suelo, en forma de triángulo, uno en cada vértice, con una distancia de 15 cm entre cada uno, a manera que quedaran en buen contacto con el suelo, siendo las muestras representativas del mismo perfil de un suelo inalterado. Además, se colocaron suficientemente alejados de la base del pseudotallo de las plantas a su alrededor.

Fueron colocados en esas profundidades debido a que la mayor parte de las raíces de absorción del banano se encuentran a 40 cm de la superficie, y se pretendía evaluar el movimiento de los fertilizantes aplicados a través del riego.

El riego aplicado a la plantación (Anexo 1) donde se colocaron los lisímetros dependía del balance hídrico, basado en la densidad aparente del suelo, capacidad de campo y punto de marchitez, evaluados en el laboratorio utilizando platos de presión. El cálculo de aplicación es en base a la ET diaria por la pana de evaporación tipo A, y el déficit permisible para el banano, que es de 10% en verano y de 20-30% en invierno.

3.2.1.2 Toma de muestras. De la solución del suelo extraída semanalmente, se mediría la concentración de los elementos presentes aplicados por fertirriego en microaspersión en forma convencional, para evaluar su movimiento a través del perfil del suelo.

La solución del suelo colectada en el erlenmeyer serviría para analizar la concentración de los elementos. Dichas muestras deberían ser refrigeradas hasta ser trasladadas al laboratorio para mantener la concentración y composición de los elementos.

3.2.2 Bomba de succión

Se utilizó una bomba de 12 voltios, de batería recargable, que provee vacío constante. Está diseñada para usar y dejar por varios días en el campo. La batería y la bomba están dentro de una caja de metal con agarradera y a prueba de agua.

Tamaño de la unidad: 16.5 x 16.5 x 16.5 cm.

Peso de la bomba: 9 lb.

Procedimiento para el funcionamiento de la bomba de vacío:

1. Se conecta el cable de corriente eléctrica a la batería de la bomba, y se enciende para comprobar su funcionamiento.
2. Se apaga la bomba durante la recarga, toma de 12 a 24 horas.
3. Se coloca un bote de colección entre la bomba y el lisímetro antes de aplicar el vacío, para asegurar que no ingrese agua a la bomba.
4. Se enciende la bomba antes de instalar el sistema de vacío, y no se pone a trabajar nuevamente mientras haya vacío.

5. Se regula el vacío, si es necesario, colocando una "T", con una grapa ajustable en la entrada, entre la línea de vacío que corre entre la bomba y el bote de colección.
6. Cuando se use en el campo, se tiene cuidado de que no entre polvo, que daña las membranas de la bomba y provoca que trabaje con menor eficiencia.
7. La batería recargable puede trabajar continuamente durante 2-3 días, antes que requiera volver a recargar, dependiendo del vacío que produzca.

3.2.3 Tubos de polietileno

Se utilizaron dos tuberías de polietileno por lisímetro, transparentes, semirígidos, sin olor, sabor y no tóxicos, a través de los cuales se apreciaría fácilmente el fluido que subía del lisímetro al bote de colección.

Diámetro externo del tubo: 6.9 mm.

Diámetro interno: 4.1 mm.

Longitud: 15, 35 y 58 cm para cada lisímetro a 20, 40 y 60 cm respectivamente.

3.2.4 Frascos de recolección

Se utilizó un erlenmeyer de vidrio por lisímetro de succión debidamente etiquetado y de volumen conocido (250 ml), cada erlenmeyer se conectó por tubos de polietileno con la bomba de succión, que crea el vacío, a una de las tuberías de salida por un lado, y al lisímetro por el otro, que extraería la solución colectada dentro de la cámara de aire del lisímetro y la almacenaría en el frasco.

Los frascos quedaban completamente sellados por un tapón de hule colocado en su orificio, al cual se le hicieron dos pequeños hoyos de modo que las tuberías quedaran ajustadas al colocarlas dentro del tapón, evitando la entrada de aire al sistema.

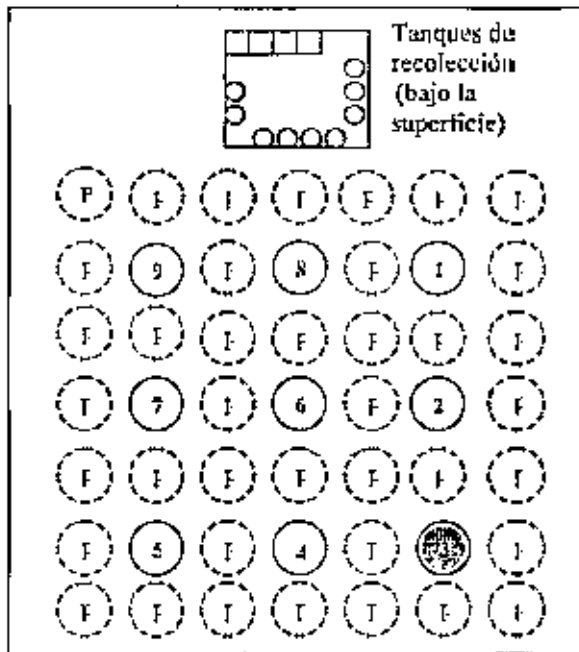
Se revisaría la cantidad de solución colectada al menos tres veces al día, para evitar que rebasara el volumen total del erlenmeyer e ingresara a la bomba, lo cual detendría la succión y la dañaría internamente.

En los lisímetros de drenaje, para coleccionar las muestras semanalmente, se emplearon frascos de vidrio de 150 ml de color ámbar, etiquetados con la fecha y el número de lisímetro.

3.2.5 Lisímetros de drenaje

Los lisímetros fueron instalados en 1992, en el área "Los Mangos", en Palo Verde, dentro de la finca de Coyoles, y comprende un área de 0.15 ha. Consisten en nueve tubos de concreto reforzado sobre bases de concreto (Anexo 8), con 3.94 m³ de volumen (1.83 m

de diámetro y 1.5 m de alto) se colocaron en tres filas de tres lisímetros dentro de una réplica de plantación comercial (Figura 4).



P: plantas de banano
1-9: lisímetros de drenaje con iguales características

Figura 4. Distribución de los lisímetros de drenaje dentro de la plantación, Coyoles, Honduras, 2000.

Los lisímetros se sellaron internamente con resina y dos capas de plástico para evitar la infiltración del agua a través de las paredes del cilindro y prevenir así el contacto del suelo con el lisímetro (Anexo 9).

Cada lisímetro se drena con un tubo de PVC de una pulgada de diámetro, colocado en su base, con salida a un tanque colector bajo el nivel de la base del lisímetro (0.64% de pendiente), fuera de la plantación para coleccionar el agua por gravedad.

Se removió la planta que había dentro de cada lisímetro, para evitar la absorción de los nutrientes aplicados y evaluar su movimiento a través del perfil del suelo, siendo representativo de plantaciones comerciales compitiendo de igual forma por la luz.

3.2.5.1 Instalación. Los lisímetros están enterrados verticalmente y sólo 10 cm sobresalen de la superficie (Anexo 11). En el fondo están llenos con capas de 15 cm de grava fina y arena respectivamente para proveer buen drenaje y 110 cm de suelo y arcilla arenosa en la parte superficial. El suelo se trajo y se colocó dentro del lisímetro en tres capas separadas, las dos primeras de 40 cm y la última de 30 cm (Figura 5), compactadas manualmente hasta lograr una densidad de 1.25 g/cm^3 en el perfil del suelo; densidad que

ha variado con el tiempo hasta 1.21 y 1.45 g/cm³ incrementando con la profundidad del suelo.

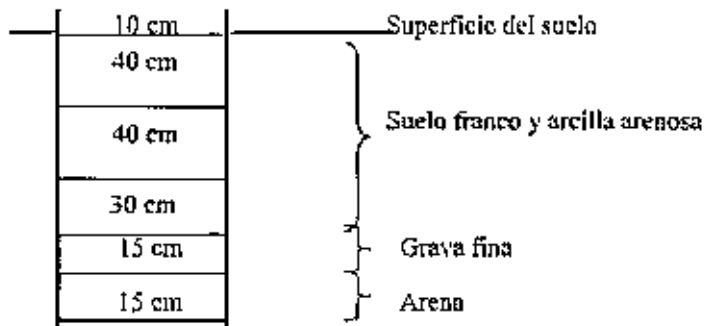


Figura 5. Composición del suelo de los lisímetros de drenaje, Coyoles, Honduras, 2000.

El riego para las plantas que están dentro del área de los lisímetros es por microaspersión, con un espaciado de 2.22 m entre microaspersores y 2.57 m entre laterales. El caudal por microaspersor a una presión de 10 psi, es de 5.68 gal/h lo que proporciona una lámina de aplicación de 3.75 mm/h. El riego aplicado en el estudio no se hizo con estos microaspersores, sino que manualmente con regadera para uniformar la cantidad de agua en cada lisímetro, debido a que la cobertura del riego por microaspersión instalado no cubriría uniformemente el área de cada lisímetro, porque no era ese su propósito.

La cantidad de agua aplicada en la superficie de cada lisímetro se calculó de igual manera que para los lisímetros de succión, más un porcentaje adicional (10%) para asegurar el lavado dentro de cada uno.

3.2.5.2 Toma de muestras. Antes de la primera aplicación de los tratamientos, se inundaron los lisímetros cerrando la llave de salida de cada tubería de drenaje. Luego se permitió que drenaran completamente para lavar cualquier residuo de aplicaciones anteriores, aprovechando para coleccionar una muestra inicial de cada uno, la que mostró las concentraciones de los elementos en cada lisímetro, y se utilizó de referencia (control) para antes de aplicar los tratamientos.

Al día siguiente de la inundación habiendo drenado completamente todos los lisímetros se realizó la primera aplicación de los tratamientos (Anexo 12), que consistió en un programa de fertilización convencional de 400 kg/ha/año de N (urea al 46%) y 600 kg/ha/año de K (KCl al 60%) evaluado en cuatro fraccionamientos (Cuadro 4) aplicados de dos formas:

1. Fertiliriego semanal: simulando el que utiliza la Compañía en época de verano, cuando por condiciones atmosféricas, alta evaporación y pocas lluvias, es necesario regar más frecuentemente. Es posible hacerlo por la eficiencia de aplicación a través del sistema de riego, ya que la aplicación de fertilizantes a través del riego aumenta la solubilidad de los iones en el suelo, lo que facilita su absorción.

2. Fertirriego quincenal: simulando el que emplea la Compañía en época de invierno, que debido a la alta humedad del suelo, no es posible realizarlo más frecuentemente.
3. Manual periodal: que es cada 28 días, porque se trabajan con semanas completas. Representa el que utilizan algunos productores independientes que no cuentan con un sistema de riego con la capacidad de aplicar el fertilizante junto con el agua.
4. Manual trimestral: es la forma de aplicación del fertilizante que emplean algunos productores independientes en sistemas pequeños de producción, que no tienen sistema de riego en sus plantaciones, y que debido a los altos costos de aplicación manual no pueden hacerlo más frecuente.

Al testigo sólo se le aplicó agua de riego (sin fertilizante), para evaluar las cantidades aportadas por el agua y nutrientes retenidos en el suelo que salen a la solución.

Cuadro 4. Descripción de los tratamientos aplicados en los lisímetros de drenaje, Coyoles, Honduras, 2000.

Trat.	Lisímetro	Descripción	Fuente	Dosis (g)	Frecuencia	Aplicación
1	2 y 9	Aplicación granular	Urea	37.4	Periodal ^a	Manual (3 veces)
			KCl	52.7		
2	3 y 6	Fertirrigación	Urea	19.2	Quincenal	Disuelto en 3 lt con regadera (6 veces)
			KCl	26.4		
3	5 y 8	Fertirrigación	Urea	9.6	Semanal	Disuelto en 3 lt con regadera (12 veces)
			KCl	13.2		
4	1 y 4	Aplicación granular	Urea	125.6	Trimestral	Manual (1 vez)
			KCl	171.3		
5	7	Control, no aplicación				

^a Periodal: cada 28 días.

La investigación duró tres periodos, que equivalen a 12 semanas. Durante ese tiempo se aplicaron los tratamientos en la frecuencia correspondiente: el trimestral una sola vez, el primer día de aplicación; el periodal tres veces, una cada periodo; el quincenal seis veces, cada 15 días; y el semanal 12 veces, una cada semana.

Se colectaron las muestras semanalmente, para lo que se abrió la tubería de drenaje de cada uno (Anexo 10), permitiendo el flujo del agua por unos segundos, se llenaba una

pana de tres litros de plástico, y en esta se sumergía el frasco, a manera que la muestra fuera representativa del contenido de elementos que, por lixiviación, hubiera en el fondo del lisímetro, luego se dejaba drenar completamente el resto de agua, y se cerraba la tubería hasta el muestreo de la siguiente semana.

El propósito era evaluar que tratamiento aplicado en cada lisímetro tenía mayor potencial para incrementar las pérdidas de nutrientes y el riesgo de contaminación a profundidades mayores de 1.50 m.

3.2.6 Análisis de las muestras

Las muestras de la solución del suelo colectadas semanalmente de cada lisímetro eran transportadas al "Western Hemisphere Analytical Laboratory" (WHAL) del Departamento de Investigación, para determinar la concentración de elementos presentes en las muestras de lixiviados (Anexo 2).

Las muestras obtenidas fueron analizadas para NO_3^- por el método Hach DR 2000, y para K^+ por "Inductive Coupled Plasma" (ICP) que es un sofisticado método de espectroscopía de emisión que analiza cualquier tipo de material en forma líquida, absorbiendo 20 ml de la muestra y por medio de combustión a altas temperatura, determina la presencia y concentración de los elementos, excepto de los metales pesados.

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

En la investigación con lisímetros de drenaje, los datos de los cuatro tratamientos con dos repeticiones por cada uno, y un testigo sin repetición, fueron analizados estadísticamente a través del tiempo, dado que las muestras fueron tomadas cada semana durante la duración del estudio.

Trabajos utilizando este tipo de lisímetros pueden tener pocas réplicas, debido al alto costo de cada unidad, por lo que las repeticiones en tiempo es una manera de reducir el error experimental.

3.3.1 Unidad experimental

Para los lisímetros de succión, la unidad experimental fueron los tres lisímetros colocados al azar dentro de una plantación comercial de banano, en tres profundidades del perfil del suelo, de las cuales se pretendía analizar la solución del suelo en cada una.

Para los lisímetros de drenaje, cada uno de los nueve lisímetros fue una unidad experimental, en los que se analizó por separado el contenido de elementos presentes en la solución del suelo a profundidades mayores de 1.50 m.

3.3.2 Variables medidas

Se midieron dos variables, seleccionadas por la importancia que tienen para la Compañía y la conservación del medio ambiente.

3.3.2.1 Movimiento de elementos en el suelo. Por la importancia económica relacionada con la aplicación de N y K en la producción comercial de banano, se midió su movimiento a través del perfil del suelo, y así determinar la concentración de cada uno, a profundidades donde el sistema radicular no puede absorberlos.

3.3.2.2 Contaminación de aguas subterráneas. Se analizaron los elementos lixiviados a profundidades mayores de 1.50 m, ya sea por haberse aplicado altos volúmenes de agua o cantidades y formas inapropiadas de fertilización, que representan un posible riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

3.4 ANALISIS DE LOS DATOS

Los datos se analizaron con el paquete estadístico SAS® 6.12 (Statistical Analysis System), empleando el Diseño Completamente al Azar de Medidas Repetidas en Tiempo y un Análisis de Varianza (ANDEVA) utilizando la prueba SNK, con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$, para determinar las diferencias entre los tratamientos; y una Correlación entre la precipitación caída durante el período y las concentraciones semanales de nitrato y potasio.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 LISIMETROS DE SUCCION

El objetivo de este estudio fue evaluar el movimiento de NO_3^- y K^+ en el suelo de una plantación comercial de banano, elementos que podrían lixiviarse, debido a que son aplicados continuamente por medio del sistema de riego.

En este estudio, se intentó extraer la solución del suelo en varias ocasiones, principalmente en los días después del fertirriego, pero en ninguna oportunidad se logró obtener solución de las tres profundidades para analizar su contenido.

Las pocas veces que el lisímetro extrajo solución del suelo fueron cuando se dejó la bomba encendida en el campo, hasta por un día entero, y sucedieron luego de varias horas de lluvia, lo cual demostró la poca cantidad de agua libre entre las partículas del suelo en que fueron instalados.

Una de las posibles causas para no poder extraer solución, es la pérdida de contacto entre el suelo y la copa de succión, cuando no se instala correctamente el equipo, o el suelo se reseca dando lugar a la formación de bolsas de aire.

4.2 LISIMETROS DE DRENAJE

Se analizó el movimiento del N y K en el suelo para determinar cuál tratamiento afectaría en mayor grado las pérdidas de NO_3^- y K^+ por lixiviación con un potencial más alto de riesgo de contaminar aguas subterráneas.

4.2.1 Evaluación de los tratamientos

Los cuatro fraccionamientos de urea y cloruro de potasio aplicados en un año por hectárea, y el testigo, muestreados semanalmente (Anexo 2), resultaron en diferentes cantidades de lixiviados (Cuadro 5), como era lo esperado debido a las frecuencias de aplicación. El NO_3^- mostró valores más altos en números absolutos y mayores diferencias entre tratamientos, aunque las cantidades aplicadas hayan sido menores con respecto al K^+ , esto debido a que la movilidad del N en el suelo es mayor. El K^+ lixivió menores cantidades pero sin diferencias numéricas importantes entre tratamientos, contrario al comportamiento esperado.

Cuadro 5. Resultados de NO_3^- y K^+ lixiviados de los lisímetros de drenaje, Coyoles, Honduras, 2000.

Trt	Frec	Lis	Elem	Resultados/fecha												p/lis	p/trt	Total
				P-T	1-7	8-7	22-7	29-7	5-8	12-8	19-8	26-8	2-9	9-9				
1	Periodal	2	NO_3	3.1	25.4	17.5	3	5	3	17	12.1	3.6	6.9	4.1	9.76	16.25	97.6	
			NO_3	25.1	2.2	18.1	26	9	26	27	25.7	25.3	18.5	49.5	22.73		227.3	
		9	K	7.11	4.85	2.99	3.51	4.36	3.22	4.11	3.68	4.05	3.89	3.46	3.81	3.64	38.12	
			K	6.51	6.5	4.17	3.28	2.91	3.25	3.43	2.51	3.12	2.8	2.73	3.47		34.7	
2	Quincenal	3	NO_3	14.3	3.1	10.9	16	21	17	21	22.3	17.4	21.3	23.4	17.34	14.23	173.4	
			NO_3	15.7		8.4	11	12	12	12	11.1	19	12.1	13.6	11.12		111.2	
		6	K	5.23	7.98	2.97	2.76	3.11	4.1	2.84	1.71	2.67	2.32	1.69	3.22	3.45	32.15	
			K	5.11		3.68	5.12	4.53	4.77	4.4	3.33	4	3.53	3.54	3.69		36.9	
3	Semanal	5	NO_3	4.4	11.5	8.3	12	14	13	12	14.1	13	12.7	24.3	13.49	16.79	134.9	
			NO_3	5.3		17.9	23	8	22	25	27.3	20.6	16.6	40.5	20.09		200.9	
		8	K	4.73	6.34	2.65	3.5	2.9	3.07	3.93	2.72	3.64	2.58	2.51	3.38	3.44	33.84	
			K	4.84		3.31	4.1	4.04	3.45	4.44	3.54	4.07	3.95	4.08	3.50		34.98	
4	Trimestral	1	NO_3	4.4	2.9	36.5	49	55	50	65	27	22.8	23	102.8	43.40	29.16	434	
			NO_3	2.2	7.2	12.1	14	17	16	16	16.7	16.3	16.4	17.4	14.91		149.1	
		4	K	7.11	4.73	7.52	3.58	2.88	4.78	3.68	3.26	3.07	3.27	3.94	4.07	3.57	40.71	
			K	3.52	4.17	2.83	3.33	3.43	3.65	2.53	2.43	3.03	2.64	2.65	3.07		72.69	
5	7	NO_3	3.4	2	8.5	26	4	22	22	15.7	10.2	18.3	18.6	14.73	14.73	117.3		
		K	3.84	6.53	3.16	3.61	2.44	3.68	2.84	2.05	1.87	2.11	1.9	3.02	3.02	30.19		

Trt: número de tratamiento

Frec: frecuencia de aplicación

Lis: número del lisímetro

Elem: elemento (ppm)

P-T: pre-tratamiento (inundación)

P/lis: promedio de resultados por lisímetro

P/trt: promedio de resultados por tratamiento

El testigo muestra que para el NO_3^- , el total de lixiviados no estuvo fuera de la media de los tratamientos, y para el K^+ , es menor que el resto, pero es una diferencia no significativa estadísticamente (Anexo 3).

4.2.1.1 Evaluación del NO_3^- final según los tratamientos. El modelo estadístico empleado (Anexo 3), se ajustó de modo aceptable en un 74%, ya que para experimentos de campo se acepta hasta un 60%, y el de covarianza en un 36% (Anexo 4), lo cual es bajo, pero se usó para asegurarse de los resultados de la separación de medias del primero, evaluando a los tratamientos en función de la concentración inicial de nitrato en cada lisímetro.

Para la concentración del NO_3^- final, en números reales, existieron diferencias, como era esperado debido a las frecuencias de aplicación, no así la relación que a mayor frecuencia de aplicación, menor cantidad de lixiviados en la solución del suelo, porque la lixiviación en la frecuencia semanal sólo fue superada por la trimestral, resultando en las otras dos frecuencias menores resultados. La prueba estadística comprueba que al menos uno de los tratamientos ($P < 0.013$) resultó ser diferente al resto.

Estadísticamente se observan diferencias, para la concentración del NO_3^- final, la frecuencia trimestral fue superior, pero no difiere de la semanal, que tampoco es diferente al resto, excepto al testigo que es menor en todas las frecuencias (Cuadro 6).

El análisis de covarianza confirma las diferencias de la separación de medias (Anexo 4).

La posible explicación de por qué la frecuencia semanal resultó en mayores lixiviados que la periodal, es que como se aplicó en forma de fertirriego, la acumulación entre las partículas del suelo fuera muy poca y se moviera con el agua a través del perfil del suelo.

Cuadro 6. Efecto de los tratamientos sobre las concentraciones promedio finales de NO_3^- , Coyoles, Honduras, 2000.

Frecuencias	Promedio final (ppm)
Trimestral	291.55a
Semanal	167.90ab
Periodal	162.45ab
Quincenal	147.30ab
Testigo	142.30 b

Valores seguidos por letras iguales no son diferentes significativamente (SNK, $P < 0.05$)

4.2.1.2 Evaluación del K^+ final según los tratamientos. Se utilizó el mismo modelo estadístico (Anexo 3), con un ajuste del 87%, y el de covarianza en 16% (Anexo 4), que igual es bajo, pero se usó con el mismo propósito, evaluando a los tratamientos en función de la concentración inicial de potasio en cada lisímetro.

Los números absolutos muestran para la concentración del potasio final no existieron diferencias importantes, del cual también se esperaban diferencias. Para el K^+ , si se cumple la relación mayor frecuencia de aplicación, menor cantidad de lixiviados, por mínimas diferencias. La prueba estadística ($P < 0.089$) muestra que ninguno de los tratamientos resultó diferente al resto.

Estadísticamente se observa que no existen diferencias significativas en las concentraciones del K^+ final empleando cualquiera de los cuatro fraccionamientos, ni al testigo, que no resultó significativamente diferente a ninguna frecuencia.

El análisis de covarianza comprueba que no existen diferencias en la separación de medias (Anexo 4).

El que no hayan diferencias de lixiviados entre los tratamientos, significa que no influye la frecuencia, ni forma de aplicación del KCl, el suelo retiene al K^+ entre sus partículas de la misma manera, comprobando que la movilidad de este elemento en el suelo es reducida.

Comparando el efecto de los tratamientos sobre las concentraciones finales de los elementos, se observa que la frecuencia periodal mantiene los lixiviados más altos y el testigo los más bajos en ambos. El resto de frecuencias no muestran diferencias estadísticas de lixiviación para ninguno de los elementos.

4.2.2 Evaluación de los tiempos de muestreo

En los resultados de los doce tiempos o fechas muestreadas de lixiviados se observa un comportamiento numérico irregular, para todos los tratamientos. Hay diferencias entre cada tiempo, en algunos casos muy marcadas, por lo que no hay un comportamiento aditivo a medida que avanza el tiempo (Cuadro 5), lo que no era esperado por el efecto residual y acumulativo de los elementos en el suelo luego de cada aplicación de fertilizantes.

El NO_3^- resultó con valores más altos en casi todas las fechas, y con mayores diferencias entre cada una, aunque las cantidades aplicadas fueron menores, ya que es más móvil en el suelo. Las diferencias entre fechas pueden darse en función de diferentes tasas de nitrificación afectadas por diversos factores. El K^+ muestra menores diferencias numéricas entre cada tiempo, pero hay que considerar que las transformaciones de K^+ en el suelo no están afectadas por la actividad de microorganismos en el suelo como en el caso del N.

El testigo para esta evaluación, no se comporta diferente a los tratamientos en el resto de lisímetros, del cual se esperaba que lixiviera cantidades mucho menores, ya que sólo se le aplicó agua del riego, lo que se debió seguramente a las cantidades presentes en el suelo por el manejo que recibió antes de este estudio, y a la concentración de nutrientes presentes en el agua de riego (Anexo 1).

Se hizo una correlación para evaluar si la precipitación caída en las semanas de muestreo (Anexo 5), tenía alguna influencia sobre las concentraciones finales de nitratos y potasio, resultando no significativa (Anexo 6) y para verificar este resultado se analizó la variación de los datos, ajustándose de buena manera en un 81% (Anexo 7).

4.2.2.1 Evaluación del NO_3^- final según los tiempos de muestreo. Se empleó el mismo modelo estadístico que para los tratamientos, pero no se midió la covarianza, porque la primera fecha de resultados, es la del muestreo de la inundación inicial en todos los lisímetros, es también un tiempo individual de muestreo.

En los resultados por tiempo de los lixiviados de NO_3^- , en números reales, existieron diferencias muy marcadas (Figura 6), lo cual no era esperado, debido a que las cantidades aplicadas por frecuencia a través del tiempo debían tener un efecto acumulativo por la residualidad de los elementos luego de cada aplicación, e ir lixivando cantidades más estables conforme pasaba el tiempo.

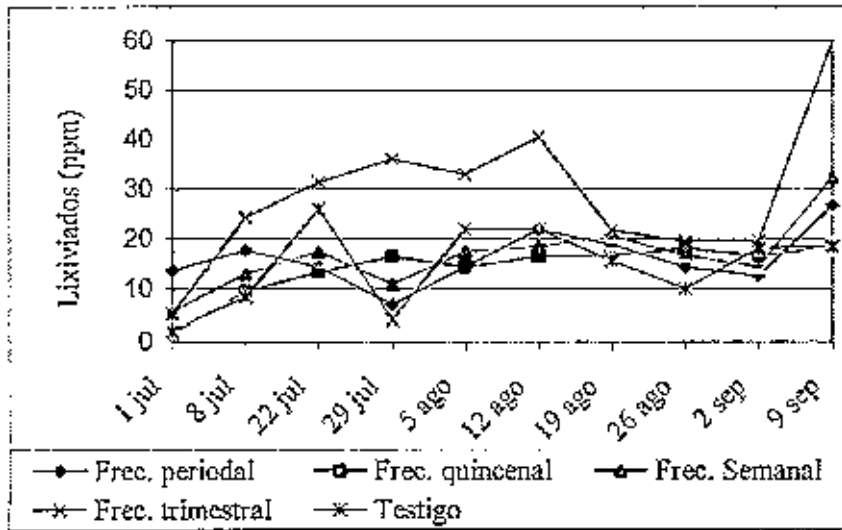


Figura 6. Fechas de muestreo del NO_3^- , Coyotes, Honduras, 2000.

Para la frecuencia trimestral, se esperaba que conforme transcurrían las semanas los resultados de lixiviados fueran aumentando hasta un punto máximo, y luego disminuyendo, lo cual sucedió, excepto con el último muestreo. Tampoco hubo tendencia a mostrar valores similares de lixiviados en la semana después, y las siguientes, de cada aplicación, en el caso de la frecuencia periodal. Se esperaba en la frecuencia quincenal un pequeño aumento y disminución en los lixiviados de cada semana, pero no fue así, y en vez de esto mostró los valores de NO_3^- más estables a través del tiempo. En la frecuencia semanal se esperaban los menores resultados de lixiviados y más estables a través del tiempo, por aplicarse semanalmente la menor fracción de fertilizante, lo cual tampoco sucedió.

Dichas diferencias en los lixiviados de cada semana, fueron comprobadas estadísticamente ($P < 0.021$) (Anexo 3). Los resultados del 9 de septiembre, 5, 12 y 19 de agosto, y 22 de julio, son superiores en lixiviados de nitratos; el 1^{er} de julio resultó el menor de todas las fechas; y el resto de fechas lixiviaron cantidades de medio a bajo (Cuadro 7).

La irregularidad de lixiviados en las fechas pudo deberse al momento de toma de muestras, que en una semana se hiciera con el agua inicial y otra con el agua final del lisímetro, cada una con diferentes concentraciones de los elementos lixiviados.

Cuadro 7. Efecto del tiempo sobre las concentraciones promedio finales de NO_3^- , Coyoles, Honduras, 2000.

Fecha de muestreo	Promedio final (ppm)
9-septiembre	32.68a
12-agosto	24.11a
5-agosto	20.11a
22-julio	20.0 a
19-agosto	19.11a
26-agosto	16.46ab
2-septiembre	16.2 ab
29-julio	16.11ab
8-julio	15.35ab
1 ^o -julio	7.76 b

Valores seguidos por letras iguales no son diferentes significativamente (SNK, $P < 0.05$)

4.2.2.2 Evaluación del K^+ final según los tiempos de muestreo. En números absolutos, la variación en los lixiviados por tiempo del K^+ no fueron tan marcadas como el nitrato, debido a su baja movilidad en el perfil del suelo, y además es fácilmente atraído por las partículas del suelo.

Todas las frecuencias muestran un comportamiento irregular en los resultados de lixiviados a través del tiempo, aunque tienden a disminuir porque las concentraciones finales fueron bastante bajas (Figura 7).

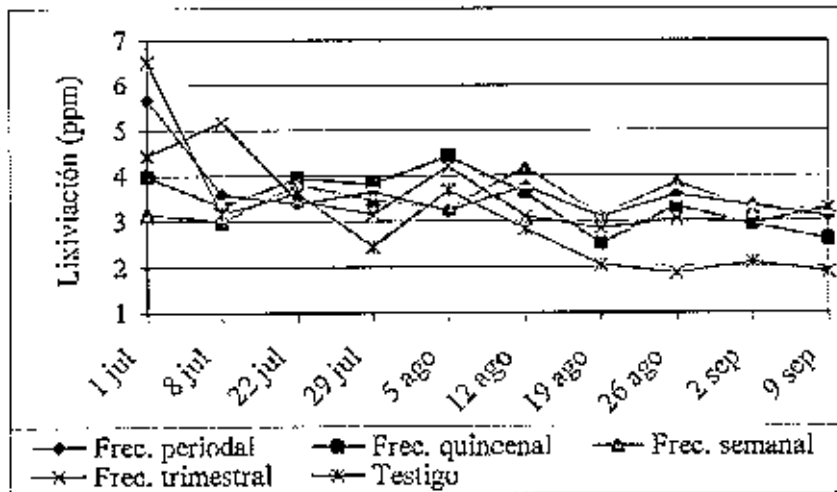


Figura 7. Fechas del muestreo del K^+ , Coyoles, Honduras, 2000.

Las diferencias en los lixiviados de cada semana, fueron comprobadas estadísticamente ($P < 0.001$) (Anexo 3). El resultado del 1^o de julio fue el mayor de todas las fechas, porque hubo mayor lixiviación de los elementos; le sigue el 5 de agosto, que

estadísticamente no es diferente al resto; y el 19 de agosto resultó como la fecha con los menores lixiviados; en el resto mencionado, las cantidades lixiviadas se mantuvieron bajas y no variaron significativamente (Cuadro 8).

Las diferencias en los lixiviados de K^+ en las diferentes fechas se debieron al mismo motivo que los nitratos, la forma como se tomaron las muestras.

Cuadro 8. Efecto del tiempo sobre las concentraciones promedio finales de K^+ , Coyoles, Honduras, 2000.

Fecha de muestreo	Promedio final (ppm)
1 ^o -julio	5.87 ^a
5-agosto	3.77 b
8-julio	3.69 bc
22-julio	3.64 bc
12-agosto	3.57 bc
29-julio	3.4 bc
26-agosto	3.28 bc
2-septiembre	3.01 bc
9-septiembre	2.94 bc
19-agosto	2.8 c

Valores seguidos por letras iguales no son diferentes significativamente (SNK, $P < 0.05$)

4.2.3 Evaluación de las repeticiones por tratamiento

Se hicieron dos repeticiones para cada uno de los cuatro tratamientos evaluados, que fueron dos lisímetros cegados al azar, más un testigo, al que sólo se aplicó agua del riego.

Todas las repeticiones resultaron diferentes en lixiviados, y no muestran ninguna tendencia, tanto en cada lisímetro como en cada fecha de muestreo (Cuadro 5), a pesar de que cada lisímetro se intentó que tuviera características similares al resto, pero cada año se renueva la planta dentro de cada uno, dejando las raíces más profundas, que se descomponen y crean conductos, favoreciendo el flujo preferencial. El NO_3^- mostró valores más altos y mayores diferencias entre cada una, que el K^+ , que lixivió menores cantidades pero sin diferencias importantes entre repeticiones.

El testigo fue el único sin repetición. Al compararlo con el resto, también muestra irregularidad a través del tiempo y el promedio de lixiviados se mantiene dentro del resto de lisímetros (Anexo 3).

4.2.3.1 Evaluación del NO_3^- final según las repeticiones por tratamiento. El modelo estadístico empleado fue el mismo que para las otras variables medidas, evaluando en este caso las concentraciones finales de NO_3^- por lisímetro en función de las repeticiones en cada tratamiento (Anexo 3).

La concentración del NO_3^- en cada repetición por tratamiento, es diferente en números totales. La relación mayor frecuencia de aplicación, menor cantidad de lixiviados en la solución del suelo, tampoco se dio para el promedio de lixiviados de nitratos, porque la frecuencia semanal resultó mayor que la quincenal y la periodal (Cuadro 5). El análisis estadístico comprueba que dentro de cada tratamiento las diferencias entre repeticiones fueron altamente significativas ($P < 0.001$) (Anexo 3).

Las diferencias entre el promedio de las repeticiones por tratamiento, se explican porque en la metodología de muestreo de los lixiviados no se realizó adecuadamente, lo que imposibilita obtener un total del agua lavada y con ello un porcentaje de lixiviación de lo aplicado, porque cada muestra se debió haber tomado del total de agua lavada en cada lisímetro, y no de una fracción representativa, para ser más precisos al momento de obtener las concentraciones de nitratos en cada una. La otra explicación de las diferencias es por el efecto residual de las aplicaciones realizadas en cada lisímetro antes de este estudio.

4.2.3.2 Evaluación del K^+ final según las repeticiones por tratamiento. Las diferencias en la concentración del K^+ en cada repetición por tratamiento, son mínimas comparadas al NO_3^- . La relación mayor frecuencia de aplicación, menor cantidad de lixiviados en la solución del suelo, tampoco se dio para el promedio de lixiviados de K^+ , porque las diferencias entre las frecuencias semanal y quincenal son casi nulas, y la periodal resultó en mayores lixiviados que la trimestral (Cuadro 5). El análisis estadístico verifica que dentro de cada tratamiento ($P < 0.001$) las diferencias entre repeticiones fueron altamente significativas (Anexo 3).

Comparando el promedio de las repeticiones por tratamiento de las concentraciones para ambos elementos, se observa que las mayores diferencias en lixiviados los muestra la frecuencia trimestral; la frecuencia quincenal resultó en las menores diferencias de lixiviados de K^+ e igual a la semanal en NO_3^- , y en promedio no hubieron diferencias marcadas entre las repeticiones de las frecuencias periodal y semanal, aunque la forma de aplicación haya sido diferente.

4.2.4 Evaluación del tiempo por tratamiento

La interacción evaluada del tiempo en los promedios de los lixiviados en números absolutos en cada tratamiento varió pero no en las proporciones en que lo hizo en algunas fechas, lo que significa que a través de tiempo, el resultado promedio de cada tratamiento por elemento no varía (Cuadro 5), lo cual se esperaba para afirmar que en cada tratamiento el comportamiento de los lixiviados en cada semana fue estable. Al igual que en las otras variables, el NO_3^- mostró valores más altos y mayores diferencias entre cada tiempo, que el K^+ , que lixivió menores cantidades no mostró diferencias numéricas importantes entre los tiempos.

No hubieron diferencias muy marcadas entre los promedios de los tiempos en cada tratamiento, se debió seguramente a la diferencia tan marcada de los valores en cada uno.

4.2.4.1 Evaluación del NO_3^- final según el tiempo por tratamiento. Se utilizó el mismo modelo estadístico que en las otras variables medidas, evaluando en este caso las concentraciones finales de NO_3^- por lisímetro en función del tiempo en cada tratamiento.

Aunque las concentraciones de nitrato varían entre repetición, el promedio a lo largo del tiempo en cada tratamiento no es diferente en números reales, con unas pocas excepciones. La relación mayor frecuencia de aplicación, menor cantidad de lixiviados en la solución del suelo, no se dio para los tiempos de cada tratamiento, porque el promedio de los tiempos de la frecuencia semanal resultó mayor que el de la quincenal y periodal, relación que sí se mantuvo para el promedio del K^+ (Cuadro 5). El análisis estadístico comprueba que dentro de cada tratamiento a través del tiempo no existieron diferencias significativas ($P < 0.912$) (Anexo 3).

La falta de significancia para las diferencias entre los promedios del tiempo por tratamiento, se debió a que los valores en cada fecha resultaron irrepitibles, que aunque los promedios finales no variaron significativamente, en muchos casos sí lo hicieron entre los tiempos, por lo que el resultado del cálculo del programa estadístico no explica verdaderamente lo sucedido. Diferencias que se debieron a que la metodología de muestreo de los lixiviados no se realizó adecuadamente y al efecto residual de aplicaciones anteriores en los lisímetros antes del estudio.

4.2.4.2 Evaluación del K^+ final según las repeticiones por tratamiento. Las diferencias entre las concentraciones del K^+ en cada tiempo por tratamiento, fueron menores que las del NO_3^- , en números reales, y casi nulos para los promedios finales. La relación mayor frecuencia de aplicación, menor cantidad de lixiviados en la solución del suelo, tampoco se dio para el promedio de lixiviados de K^+ , porque aunque las diferencias entre las frecuencias son mínimas, fueron mayores en la periodal que el resto de frecuencias (Cuadro 5). El análisis estadístico comprueba que dentro de cada tratamiento, las muestras evaluadas a través del tiempo no mostraron diferencias significativas ($P < 0.084$) (Anexo 3).

La similitud de los lixiviados por tiempo para el K^+ , se deben a que este elemento es poco móvil en el suelo porque es absorbido y retenido por las partículas.

Comparando el promedio de los tiempos por tratamiento de las concentraciones para ambos elementos, se observa que las mayores diferencias en lixiviados ocurrieron en la frecuencia trimestral; que la frecuencia quincenal resultó la más estable y con menores diferencias de lixiviados de NO_3^- e igual a la semanal en K^+ ; y en promedio los tiempos en todos los tratamientos variaron considerablemente, diferencias no estadísticas según el programa utilizado.

5. CONCLUSIONES

Las conclusiones son en base a los lisímetros de drenaje, porque los lisímetros de succión no absorbieron solución del suelo ya que el riego fue aplicado para mantener el balance hídrico en la plantación.

1. No hay diferencia estadística ($P < 0.05$) entre aplicar urea y KCl en cualquiera de las frecuencias estudiadas, en cuanto a la lixiviación ocurrida en los suelos bananeros bajo estudio.
2. La frecuencia trimestral resultó en promedio con los valores más altos de concentración de NO_3^- , indicando un mayor potencial de pérdida del fertilizante aplicado.
3. Los suelos bajo estudio indican tener una buena capacidad para retener el K aplicado.
4. El estudio reconfirmó que el NO_3^- se mueve más que el K^+ con el agua del suelo.
5. Establecer la técnica de extracción de la solución del suelo con lisímetros de drenaje en Zamorano, es posible, aunque habría que considerar el precio de su construcción.
6. La metodología utilizada, es una base que debe afinarse para futuros trabajos de extracción de la solución del suelo.

6. RECOMENDACIONES

1. Utilizar los lisímetros de succión en suelos donde haya agua libre, o exista un exceso de agua debido a precipitación.
2. Hacer un análisis de suelo de los lisímetros de drenaje y del agua del riego antes de realizar algún estudio, para corroborar aportaciones de nutrientes a partir de ambos factores.
3. Medir el total de agua lavada de cada lisímetro de drenaje y tomar la muestra de la solución del suelo de ese total.
4. Para futuro uso de estos lisímetros determinar si hay efecto de flujo preferencial causado por crecimiento radicular de plantas utilizadas en trabajos anteriores, factor que puede alterar los datos obtenidos.
5. Realizar otro estudio evaluando las diferentes frecuencias de aplicación de fertilizantes en época de invierno, para asegurarse de los resultados en este estudio.
6. Si se establece la técnica de extracción de la solución del suelo en Zamorano, llevarla a cabo en cultivos intensivos como hortalizas.

7. BIBLIOGRAFIA

- ANDRIULO, G.; CORDONE, G.; FERREYRA, C.; RIVERO, M.L. 1997. Estimate of soil balance. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) (USA) 39(1):18-21.
- ARAGON, R. 1997. Determinación de la contaminación de las aguas y los nitratos procedentes de fuentes agrarias. Agricultura Técnica (Chile) 27(2):56-64.
- BURT, C.; O'CONNOR, K.; RUEHR, T. 1995. Determining irrigation requirements. Irrigation Training and Research Center, California, USA. 195 p.
- DOMINGUEZ, A. 1997. Tratado de fertilización. 3ra ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. 613 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VENTURA, M. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Editorial Cepis, Lima, Perú. 81 p.
- GIRALDEZ, J.V.; VALDERLINDEN, K.; TEN BERGE, H.F. 1990. Soil water evaporation under atmospheric control. Transactions of the ASAE (USA) 30(1):20-26.
- ISRAELSEN, P. 1990. Measurement of evapotranspiration. Transactions of the ASAE (USA) 31(1):24-39.
- KLOCKE, N.L.; WATTS, D.G.; DAVISON, D.R. 1999. Nitrate leaching in irrigated corn and soybean in a semi-arid climate. Transactions of the ASAE (USA) 42(2):17-19.
- LOZANO, A.; GUZMÁN, G.; FERRUCHO, A.; ROJAS, L. 1997. Isotermas de adsorción de potasio en un oxisol de los llanos orientales de Colombia. Revista Colombiana de Química. (Colombia) 26(1):46-50.
- MABBETT, T. 1998. Agricultura de las Américas: el agua en la agricultura. (Colombia) 47(1):34-42.
- MARTÍN, E.C.; LOUDON, T.L.; DITTHIE, J.T. 1993. Use of drainage lysimeters to evaluate nitrogen and irrigation management strategies to minimize nitrate leaching in maize production. Transactions of the ASAE (USA) 38(1):24-39.

- POTASH & PHOSPHATE INSTITUTE. 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. PPI, USA. 73 p.
- RADULOVICH, R.; BAVEYE, P. 1992. Fertilizer losses by bypass flow in tropical soils. University of Costa Rica, San José, Costa Rica. 47p.
- RAMOS, C.; KÜCKE, M. 1991. Critical revision of leaching measurement methods of nitrate in farming soils. Transactions of the ASAE (USA) 32(1):28-34.
- SAGARDOY, J.A. 1992. Una vision global de la contaminación del agua por la agricultura. Santiago, FAO. p.19-26.
- SPOSITO, G. 1994. The chemistry of soils. Oxford University Press, New York, USA. 270p.
- SUMNER, 2000. Handbook of soil science. CRS Press, Florida, USA. 811p.
- TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J.; HAVLIN, J. 1993. Soil fertility and fertilizers, 5th ed. Mcmillan, New York, USA. p. 109-175, 230-265.
- TUÑÓN, J.; MORELI, L.; FERROILS, N.S. 1990. Critical revision of leaching measurement methods of nitrate in farming lands. Transactions of the ASAE (USA) 30(2):42-49.
- WOLT, J.D. 1994. Soil solution chemistry: applications environmental science and agriculture. John Wiley & Sons, New York, USA. 360 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Análisis del agua del riego

ANÁLISIS DE AGUA
Western Hemisphere Analytical Laboratory
 PROYECTO 04 - 01 - 014 - 0143

No. PROJECT:04010140143

Date: 06/10/2000

SAMPLED : 06/05/2000

Sampling Site		mmhos/cm	me/L	me/L	ppm	Mg/l Cl_2		mg/l			
	pH	CE	CO_3	HCO_3	Solidos Disueltos	Cloro Total	Cloro Libre	Sulfuro H_2O	Sulfato SO_4	Solidos Suspendidos	Nitratos $N NO_3$
Palo Verde "A"	7.79	0.34	0	2.30	600	0.01	0.04	0.007	39	177	0.8
Palo Verde "B"	8.05	0.32	0	2.06	600	0.06	0.04	0.010	38	254	0.4
Cayo "A"	8.11	0.24	0	1.69	800	0.05	0.05	0.005	21	774	0.8
Limones "A"	8.10	0.24	0	1.41	200	0.02	0.03	0.001	19	244	1.0
Troja "A"	8.18	0.25	0	1.73	200	0.02	0.02	0.003	20	122	0.8
Mendez	8.09	0.17	0	1.11	800	0.04	0.14	0.002	14	965	1.5
Mabuhay	8.10	0.18	0	1.25	1000	0.02	0.35	0.002	12	920	1.4
Hogge	8.03	0.28	0	1.98	200	0.05	0.03	0.008	29	0	0.9
Chute	7.99	0.28	0	1.92	200	0.05	0.04	0.005	27	20	0.6
Bohemia	7.98	0.28	0	1.94	400	0.01	0.02	0.000	27	388	0.8
Nerones	7.93	0.28	0	1.90	200	0.06	0.05	0.011	28	42	0.7
Drip - Nerones	7.10	0.32	0	2.21	0	0.04	0.00	0.000	30	0	0.0

ANALISIS DE AGUA
Western Hemisphere Analytical Laboratory

Date: 6/10/00

SAMPLED : 06/05/2000

Sampling Site		mmhos/cm	me/L	me/L	ppm	Mg/l cl ₂		mg/l			
	pH	CE	CO ₃	HCO ₃	Solidos Disueltos	Cloro Tota	Cloro Libr	Sulfuro H ₂ O	Sulfato SO ₄	Solidos Suspendidos	Nitratos N NO ₃
Palo Verde "A"	7.79	0.34	0	2.30	600	0.01	0.04	0.007	39	177	0.8
Palo Verde "B"	8.05	0.32	0	2.06	600	0.06	0.04	0.010	38	254	0.4
Cayo "A"	8.11	0.24	0	1.69	800	0.05	0.05	0.005	21	774	0.8
Limonas "A"	8.10	0.24	0	1.41	200	0.02	0.03	0.001	19	244	1.0
Troja "A"	8.18	0.25	0	1.73	200	0.02	0.02	0.003	20	122	0.8

ANALISIS DE AGUA
Western Hemisphere Analytical Laboratory

Date: 6/10/00

SAMPLED : 06/05/2000

Sampling Site	ppm										
	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	B	Cu	Na	S
Palo Verde "A"	0.04	3.02	40.79	9.32	0.04	0.00	0.01	0.05	0.00	16.28	11.04
Palo Verde "B"	0.07	2.92	42.05	9.59	0.02	0.00	0.00	0.05	0.00	15.71	10.96
Cayo "A"	0.10	1.45	40.21	4.61	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	5.59	5.38
Limonas "A"	0.07	1.77	42.16	4.82	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	5.80	5.04
Troja "A"	0.02	1.74	41.51	4.79	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	5.73	5.27

Anexo 2. Análisis de lixiviados

ANALISIS ESPECIAL
Western Hemisphere Analytical Laboratory
Analisis de Lixiviados

No. PROJECT: LixiviadosE

DATE: 9/29/00

SAMPLED: 09/09/2000

No. Lab	OBS.	Muestra #	* mg/l	ppm										
			N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn	Fe	B	Cu	Na	S
8200	Lixiviados	1	102.8	0.55	3.94	277.40	36.62	0.03	0.01	0.09	0.31	0.00	128.86	47.43
8201	Lixiviados	2	4.1	0.26	3.46	57.14	21.84	0.00	0.01	0.06	0.26	0.00	62.35	25.58
8202	Lixiviados	3	23.4	0.10	1.69	181.80	25.95	0.02	0.01	0.09	0.24	0.00	93.14	61.69
8203	Lixiviados	4	17.4	0.00	2.65	174.35	20.70	0.01	0.00	0.03	0.22	0.00	98.24	74.59
8204	Lixiviados	5	24.3	0.00	2.51	160.47	23.45	0.00	0.00	0.01	0.19	0.00	97.53	80.50
8205	Lixiviados	6	13.6	0.00	3.54	149.68	25.86	0.01	0.00	0.08	0.18	0.00	87.64	71.24
8206	Lixiviados	7	18.6	0.01	1.90	152.68	35.84	0.01	0.00	0.06	0.18	0.00	94.87	90.25
8207	Lixiviados	8	40.5	0.01	4.08	217.26	28.82	0.02	0.00	0.06	0.15	0.00	109.13	115.25
8208	Lixiviados	9	49.5	0.13	2.73	253.70	31.37	0.03	0.00	0.02	0.14	0.00	116.29	104.59

Estado Líquido

* Lectura por metodología Hach DR 2000

Anexo 3. DCA con Medidas Repetidas en Tiempo

```

DATA LISIMETR;
INPUT TRT TIEMPO REP NINIC KINIC NFIN KFIN;
NINIC1=SQRT (ARSIN (NINIC/100));
KINIC1=SQRT (ARSIN (KINIC/100));
NFIN1=SQRT (ARSIN (NFIN/100));
KFIN1=SQRT (ARSIN (KFIN/100));
DATALINES;
1 1 1 3.1 7.11 25.4 4.85
1 1 2 25.1 6.51 2.2 6.5
1 2 1 3.1 7.11 17.5 2.99
1 2 2 25.1 6.51 18.1 4.17
1 3 1 3.1 7.11 3 3.51
1 3 2 25.1 6.51 26 3.28
.
.
;
PROC GLM DATA = LISIMETR;
CLASS TRT TIEMPO REP;
MODEL NFIN1 KFIN1 = TRT TIEMPO REP*TRT TRT*TIEMPO/SS3;
MEANS TRT TIEMPO/SNK;
TEST H = TRT E = REP*TRT;
RUN;

```

General Linear Models Procedure Class Level Information

Class	Levels	Values
TRT	5	1 2 3 4 5
TIEMPO	10	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
REP	2	1 2

Number of observations in data set = 90

Group	Obs	Dependent Variables
1	87	NFIN1
2	88	KFIN1

Dependent Variable: NFIN1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	53	1.16533580	0.02198747	1.74	0.0457
Error	33	0.41656322	0.01262313		
Corrected Total	86	1.58189902			

R-Square	C.V.	Root MSE	NFIN1 Mean
0.736669	27.61082	0.11235269	0.40691550

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRT	4	0.18829476	0.04707369	3.73	0.0130
TIEMPO	9	0.29884294	0.03320477	2.63	0.0205
TRT*REP	4	0.41337280	0.10334320	8.19	0.0001
TRT*TIEMPO	36	0.28622003	0.00795056	0.63	0.9115

Student-Newman-Keuls test for variable: NFIN1

Alpha= 0.05 df= 33 MSE= 0.012623
 WARNING: Cell sizes are not equal.
 Harmonic Mean of cell sizes= 16.23932

Number of Means	2	3	4	5
Critical Range	0.0802192	0.0967503	0.1066531	0.1137254

Means with the same letter are not significantly different.

SNK Grouping	Mean	N	TRT
A	0.48180	19	4
B	0.41289	19	3
B	0.38070	19	2
B	0.37516	20	1
B	0.36662	10	5

Student-Newman-Keuls test for variable: NFIN1

Alpha= 0.05 df= 33 MSE= 0.012623
 WARNING: Cell sizes are not equal.
 Harmonic Mean of cell sizes= 8.64494

Number of Means	2	3	4	5	6
Critical Range	0.1099464	0.1326036	0.146176	0.1558693	0.1633925
Number of Means	7	8	9	10	
Critical Range	0.1695281	0.1747004	0.1791655	0.1830897	

Means with the same letter are not significantly different.

SNK Grouping	Mean	N	TIEMPO
A	0.47839	9	6
A	0.47117	8	10
A	0.43304	9	7
A	0.43041	9	5
A	0.42786	9	3
B	0.39862	9	9
B	0.39682	9	8
B	0.38114	9	2
B	0.37388	9	4
B	0.25012	7	1

Dependent Variable: NFIN1

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRT	4	0.18829476	0.04707369	0.46	0.7675

Dependent Variable: KFIN1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	53	0.06047079	0.00114096	4.18	0.0001
Error	34	0.00928446	0.00027307		
Corrected Total	87	0.06975525			

R-Square	C.V.	Root MSE	KFIN1 Mean
0.866900	8.870547	0.01652490	0.18628950

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRT	4	0.00439844	0.00109961	4.03	0.0089
TIEMPO	9	0.03914484	0.00434943	15.93	0.0001
TRT*REP	4	0.01302461	0.00325615	11.92	0.0001
TRT*TIEMPO	36	0.01577617	0.00043823	1.60	0.0844

Student-Newman-Keuls test for variable: KFIN1

Alpha= 0.05 df= 34 MSE= 0.000273
 WARNING: Cell sizes are not equal.
 Harmonic Mean of cell sizes= 16.37931

Number of Means	2	3	4	5
Critical Range	0.0117351	0.0141498	0.0155955	0.0166276

Means with the same letter are not significantly different.

SNK Grouping	Mean	N	TRT
A	0.189611	20	1
A	0.189112	19	3
A	0.187523	19	2
A	0.187106	20	4
B	0.170307	10	5

Student-Newman-Keuls test for variable: KFIN1

Alpha= 0.05 df= 34 MSE= 0.000273
 WARNING: Cell sizes are not equal.
 Harmonic Mean of cell sizes= 8.75

Number of Means	2	3	4	5	6
Critical Range	0.0160557	0.0193595	0.0213375	0.0227496	0.0238454
	7	8	9	10	
Critical Range	0.0247389	0.0254919	0.0261419	0.0267132	

Means with the same letter are not significantly different.

SNK Grouping	Mean	N	TIEMPO
A	0.241031	7	1
B	0.193700	9	5
C	0.190258	9	3
C	0.189610	9	2
C	0.188309	9	6
C	0.183462	9	4
C	0.180000	9	8
C	0.172537	9	9
C	0.169895	9	10
C	0.166257	9	7

Dependent Variable: KFIN1

Tests of Hypotheses using the Type III MS for TRT*REP as an error term

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRT	4	0.00439844	0.00109961	0.34	0.8410

Anexo 4. Análisis de Covarianza

```

DATA LISIMETR;
INPUT TRT TIEMPO REP NINIC KINIC NFIN KFIN;
NINIC1=SQRT (ARSIN (NINIC/100));
KINIC1=SQRT (ARSIN (KINIC/100));
NFIN1=SQRT (ARSIN (NFIN/100));
KFIN1=SQRT (ARSIN (KFIN/100));
DATALINES;
1 1 1 3.1 7.11 25.4 4.85
1 1 2 25.1 6.51 2.2 6.5
1 2 1 3.1 7.11 17.5 2.99
1 2 2 25.1 6.51 18.1 4.17
1 3 1 3.1 7.11 3 3.51
1 3 2 25.1 6.51 26 3.28
.
.
;
PROC GLM DATA = LISIMETR;
CLASS TRT NINIC1;
MODEL NFIN1= TRT NINIC1/SS3;
MEANS TRT/SNK;
RUN;

PROC GLM DATA = LISIMETR;
CLASS TRT KINIC1;
MODEL KFIN1= TRT KINIC1/SS3;
MEANS TRT/SNK;
RUN;

```

General Linear Models Procedure Class Level Information

Class	Levels	Values
TRT	5	1 2 3 4 5
NINIC1	8	0.209795638 0.1483299533 0.1760822743 0.1844086605 0.230271240 0.3788032576 0.3970544586 0.5036995023

Number of observations in data set = 90

Dependent Variable: NFIN1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	0.56235410	0.07029426	5.38	0.0001
Error	78	1.01954492	0.01307109		
Corrected Total	86	1.58189902			

R-Square	C.V.	Root MSE	NFIN1 Mean
0.355493	28.09646	0.11432886	0.40691550

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRT	1	0.24033060	0.24033060	18.39	0.0001
NINIC1	4	0.40566838	0.10141710	7.76	0.0001

Student-Newman-Keuls test for variable: NFIN1

Alpha= 0.05 df= 78 MSE= 0.013071
WARNING: Cell sizes are not equal.
Harmonic Mean of cell sizes= 16.23932

Number of Means	2	3	4	5
Critical Range	0.0798776	0.0958634	0.1053331	0.1120464

Means with the same letter are not significantly different.

SNK Grouping		Mean	N	TRT
	A	0.48180	19	4
B	A	0.41289	19	3
B		0.38070	19	2
B		0.37516	20	1
B		0.36662	10	5

General Linear Models Procedure
Class Level Information

Class	Levels	Values				
TRT	5	1	2	3	4	5
KINIC1	8	0.21752621	0.22610233	0.187636012	0.195983273	
		0.22004298	0.22874411	0.255237282	0.266758394	

Number of observations in data set = 90

Dependent Variable: KFIN1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	0.01128968	0.00141121	1.91	0.0704
Error	79	0.05846557	0.00074007		
Corrected Total	87	0.06975525			

R-Square	C.V.	Root MSE	KFIN1 Mean
0.161847	14.60320	0.02720424	0.18628950

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TRT	1	0.00011753	0.00011753	0.16	0.6913
KINIC1	4	0.00832120	0.00208030	2.81	0.0309

Student-Newman-Keuls test for variable: KFIN1

Alpha= 0.05 df= 79 MSE= 0.00074
WARNING: Cell sizes are not equal.
Harmonic Mean of cell sizes= 16.37931

Number of Means	2	3	4	5
Critical Range	0.0189215	0.0227072	0.0249495	0.026539

Means with the same letter are not significantly different.

SNK Grouping		Mean	N	TRT
	A	0.189611	20	1
	A	0.189112	19	3
	A	0.187523	19	2
	A	0.187106	20	4
	A	0.170307	10	5

Anexo 5. Medidas de precipitación, Coyoles, (2000).

Precipitación Semanal

SEM.	2000
1	1.80
2	23.80
3	23.20
4	0.00
5	1.10
6	28.20
7	0.00
8	16.40
9	0.00
10	0.00
11	0.00
12	0.00
13	0.00
14	0.00
15	16.00
16	0.00
17	0.00
18	0.00
19	29.40
20	105.60
21	5.70
22	24.00
23	2.10
24	15.10
25	58.40
26	38.40
27	51.40
28	17.40
29	36.30
30	20.60
31	13.00
32	65.10
33	9.80
34	20.50
35	10.90
36	11.90
37	37.80
38	16.00
39	32.30
40	26.70
TOT.	758.90

Evaporación Semanal

SEM.	2000
1	23.2
2	26.8
3	21.0
4	29.1
5	31.9
6	18.2
7	36.6
8	24.8
9	36.1
10	40.5
11	39.8
12	48.2
13	45.8
14	43.5
15	41.4
16	49.3
17	48.0
18	47.9
19	42.8
20	31.9
21	42.3
22	39.3
23	35.6
24	40.2
25	36.0
26	34.4
27	41.6
28	42.2
29	37.3
30	32.9
31	40.9
32	35.6
33	40.5
34	39.6
35	37.4
36	39.8
37	44.2
38	40.5
39	31.8
40	35.2
TOT.	1494.1

Anexo 6. Correlación precipitación - nitrato y potasio final

```

DATA LISIMETR;
INPUT TRT TIEMPO REP PPT NFIN KFIN;
PPT2=PPT*PPT;
PPT3=PPT2*PPT;
PPT4=PPT3*PPT;
DATALINES;
1 1 1 38.4 25.4 4.85
1 1 2 38.4 2.2 6.5
1 2 1 51.4 17.5 2.99
1 2 2 51.4 18.1 4.17
1 3 1 36.30 3 3.51
1 3 2 36.3 26 3.28
.
.
;
PROC PLOT DATA=LISIMETR;
PLOT NFIN*PPT='*';
RUN;

PROC CORR DATA=LISIMETR NOSIMPLE;
VAR NFIN;
WITH PPT;
RUN;

PROC REG DATA=REGRES;
MODEL NFIN = PPT P R CLM CLI;
RUN;

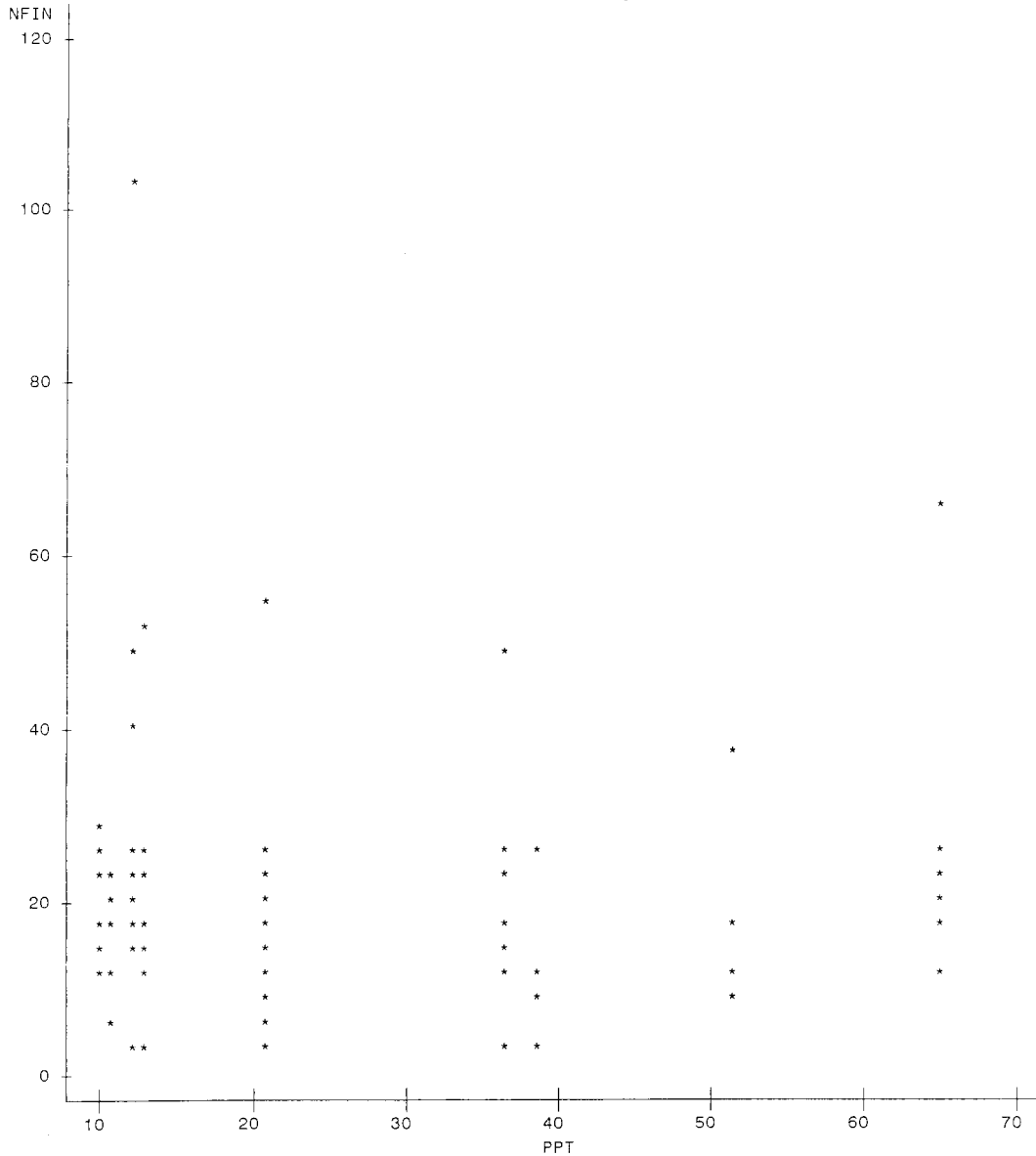
PROC REG DATA=REGRES;
MODEL NFIN = PPT2;
RUN;

PROC REG DATA=REGRES;
MODEL NFIN = PPT3;
RUN;

PROC REG DATA=REGRES;
MODEL NFIN = PPT PPT2;
RUN;

```

Plot of NFIN*PPT. Symbol used is '*'.



NOTE: 2 obs had missing values. 30 obs hidden.

Correlation Analysis

1 'WITH' Variables: PPT

1 'VAR' Variables: NFIN

Pearson Correlation Coefficients/Prob>|R|under Ho: Rho=0/Number of Observations

	NFIN
PPT	-0.04892
	0.6508
	88

Anexo 7. Normalidad de los datos de la Correlación

```

DATA LISIMETR;
INPUT TRT TIEMPO REP PPT NFIN KFIN;
PPT2=PPT*PPT;
PPT3=PPT2*PPT;
PPT4=PPT3*PPT;
DATALINES;
1 1 1 38.4 25.4 4.85
1 1 2 38.4 2.2 6.5
1 2 1 51.4 17.5 2.99
1 2 2 51.4 18.1 4.17
1 3 1 36.30 3 3.51
1 3 2 36.3 26 3.28
.
.
;
PROC UNIVARIATE NORMAL PLOT;
VAR PPT;
RUN;

```

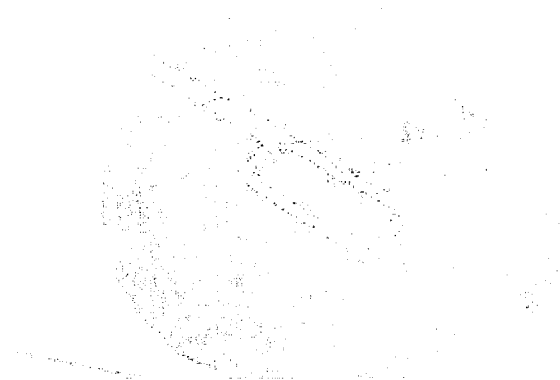
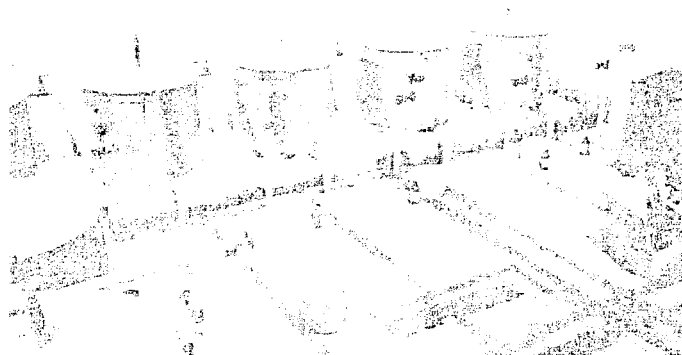
Univariate Procedure

Variable=PPT

Moments				Quantiles (Def=5)			
N	90	Sum Wgts	90	100% Max	65.1	99%	65.1
Mean	27.79	Sum	2501.1	75% Q3	38.4	95%	65.1
Std Dev	18.32143	Variance	335.6746	50% Med	20.55	90%	58.25
Skewness	0.811588	Kurtosis	-0.63684	25% Q1	11.9	10%	10.35
USS	99380.61	CSS	29875.04	0% Min	9.8	5%	9.8
CV	65.92812	Std Mean	1.931248			1%	9.8
T:Mean=0	14.38966	Pr>|T|	0.0001	Range	55.3		
Num ^= 0	90	Num > 0	90	Q3-Q1	26.5		
M(Sign)	45	Pr>=|M|	0.0001	Mode	9.8		
Sgn Rank	2047.5	Pr>=|S|	0.0001				
W:Normal	0.812744	Pr<W	0.0001				

Extremes

Lowest	Obs	Highest	Obs
9.8(	87)	65.1(	51)
9.8(	74)	65.1(	52)
9.8(	73)	65.1(	71)
9.8(	54)	65.1(	72)
9.8(	53)	65.1(	86)

Anexo 8. Interior de los lisímetros de drenaje**Anexo 9.** Lisímetros de drenaje sellados con plástico**Anexo 10.** Tanques con tuberías de recolección

Anexo 11. Instalación de los lisímetros de drenaje en el suelo**Anexo 12.** Aplicación de los tratamientos