

00376



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

DINAMICA Y DISTRIBUCION ESPACIAL Y
TEMPORAL DEL C Y N EN EL SUELO EN UN
ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL:
UN ENFOQUE DE PAISAJE.

Handwritten mark

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:
**MAESTRA EN CIENCIAS
ECOLOGIA Y CIENCIAS AMBIENTALES**
P R E S E N T A :
ALBA ESMERALDA ZARCO ARISTA



DIRECTOR DE TESIS: DR. FELIPE FRANCISCO GARCÍA OLIVA

2001



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mi mamá,
a mi hermana y a mi esposo
quienes tenazmente me alentaron
en los momentos de descreimiento,
que fueron los más.
Sin ellos, nunca habría tenido fuerzas
para llevarla a cabo.
Y aunque habrían merecido algo mejor,
aún así, con todas sus imperfecciones
a ellos les pertenece.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a Dios, la enorme bendición de lograr finalizar ésta tesis. Pero no sólo eso, sino lo más importante fue que durante el proceso de investigación, trabajo de campo y escritura me rodearon personas que enriquecieron mi vida y mi percepción de la ciencia. Por ello a todos y cada uno de ellos mi gratitud

A Polo Galicia, por todo su amor, apoyo, fortaleza, orientación, ayuda, ánimo, y ejemplo que me brindó y me brinda cada día. Por reconocer capacidades que eran desconocidas para mí. Y por que sin él, sencillamente no habría logrado finalizar este proceso, ni habría sido tan placentero su desarrollo.

A cada uno de los miembros de mi familia a Ana Arista Mata por ser mi mamá y enseñarme a salir adelante, apoyarme y ser ejemplo de superación y victoria. A Aída por que desde la niñez hemos compartido las alegrías, las tristezas así como los triunfos que han sido siempre uno en nosotras. Por su apoyo en la búsqueda y envío de libros y artículos necesarios para la presente tesis. A cada uno de mis tíos: Loyda, Martha, Yolanda, Anita, Víctor, Moisés, Husiel y Carlos, a Karlita y Víctor y a mi abuelito; por sus palabras de aliento, por su orientación y por las diferentes formas en que nos han apoyado, por compartir cada momento en este proceso y por su alegría que es fundamental en nuestra vida.

Al apoyo que en diferentes formas nos brindaron Virginia Sarmiento, Noé e Israel Galicia y Olivia García, por las largas horas de plática y todos los apoyos brindados

Durante el transcurso de la maestría fue importante en mi formación la enseñanza impartida por la Dra. Teresa Valverde Valdéz, el Dr. Jorge Meave del Castillo, el Dr. Zenón Cano Santana y el Dr. Alejandro Zavala Hurtado, a cada uno de ellos va mi gratitud por abrir el panorama de la ecología y hacerlo tan placentero y motivante.

Ninguna cosa hay que deleite el ánimo como la dulce y fiel amistad, siendo gran bien estar dispuestos para que con seguridad se deposite cualquier secreto, cuyo parecer aclare tus dudas, cuya alegría destierre tus tristezas y finalmente cuya presencia deleite tu vida (Séneca). A cada uno de mis amigos Fabiola Ramírez, Rosaura Luna, Diana Villagómez, David Monteagudo, Teresa Sosa, Pilar Islas, Marcela Valencia, Irma Zavaleta, Sara Zavala, Octavio Rodríguez. A cada uno de los amigos y compañeros del

DERN-Morelia, por cada uno de los momentos que compartimos, por que sobreponiéndonos a las diferencias conciliamos la amistad, el apoyo y la unidad, a: Carmen Soberanis, Raúl Ahedo, Humberto, Alma, Erna López, Jesús Junco, Leonel, Manuel Mendoza, Alejandro Flamenco, Ana Burgos, Tamara Ortiz, Leonor Solís, Liliana Rentería, Janik Granados, Gabriela Pacheco, Yolanda García

A mi asesor durante la maestría el Dr. Felipe García Oliva, por su apoyo brindado durante mucho tiempo, por las horas de platicas sobre el proyecto, por la oportunidad de trabajar juntos y por las enseñanzas vertidas durante todo este proceso.

A cada uno de los miembros del jurado por el tiempo dedicado a la lectura y revisión de la tesis, por que cada uno en diferentes aspectos y momentos aportó sugerencias que dieron una mejor presentación a la tesis: Dra. Norma Eugenia García Calderón, Dr. Jorge López Blanco, Dr. José Alejandro Velázquez Montes, Dra. Isabelle Barois Boullard Un agradecimiento especial al Dr Víctor Jaramillo Luque y al Dr. Luis Antonio Bojorquez Tapia, por su cuidadosa revisión y por el tiempo que dedicaron no sólo a la revisión sino a las propuestas y sugerencias claras, a las horas invertidas en las platicas para que esta tesis mejorara su presentación e interpretación.

El trabajo de campo fue facilitado por el apoyo del personal de la Estación de Biología Chamela, Instituto de Biología, así como por el apoyo de Salvador Araiza A Georgina García por su apoyo técnico en el laboratorio A Raúl Ahedo y Heberto Ferreira por brindar las facilidades en el área de cómputo y mantenimiento del sistema electrónico.

Este trabajo fue apoyado por los proyectos IN212397 DGAPA-UNAM y G27674-N CONACYT.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.	1
CAPÍTULO I. PRESENTACIÓN DE LA TESIS.	
1.1. Introducción.	3
1.2. Estructura de la tesis.	5
1.3. Literatura citada	5
CAPÍTULO II. VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL C Y N EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL	
2 1 Introducción.	7
2 1.1. Objetivos.	8
2.2. Sitio de estudio.	9
2.3. Diseño experimental.	10
2.4. Muestreo	11
2.4 1 Suelo.	11
2.4.2 Mantillo.	11
2.5. Análisis de laboratorio.	11
2.5.1. Determinaciones químicas del suelo.	11
2 5 2. Determinaciones químicas del mantillo	12
2.5.3. Análisis estadísticos.	12
2.6. Resultados.	12
2.6 1. Variación temporal.	12
2.6 1.1. Nutrientes totales del suelo.	12
2.6.1.2. Carbono y nitrógeno biológicamente activos y N disponible (NH_4^+ y NO_3^-).	13
2.6.1.3. Nutrientes totales del mantillo.	14

2.6.2 Patrón espacial.	15
2.6.2.1. Nutrientes totales del suelo.	15
2.6.2.2 Carbono y nitrógeno microbiano y formas disponibles de N (NH_4^+ y NO_3^-).	17
2.6.2.3. Nutrientes totales del mantillo.	18
2.6.3. Resultados del análisis con la red de 39 puntos para los nutrientes totales del suelo y mantillo.	19
2.7. Discusión	19
2.7.1 Variabilidad temporal del carbono total, nitrógeno total y fósforo total en el suelo y mantillo.	19
2.7.2 Heterogeneidad espacial del carbono total, nitrógeno total y fósforo total en el suelo y mantillo.	22
2.8. Conclusiones.	25
2.9 Literatura citada	26

CAPÍTULO III DINÁMICA TEMPORAL Y ESPACIAL DEL EFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA EROSIÓN Y LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL.

3.1 Introducción.	47
3.1.1. Objetivos.	48
3.2 Sitio de estudio.	48
3.3. Diseño de muestreo.	50
3.4 Muestreo.	50
3.5. Análisis de laboratorio.	50
3.5.1. Suelo.	50
3.5.2. Mantillo.	51
3.5.3. Análisis estadístico.	51

3.6 Resultados.	51
3.6.1. Patrón temporal del efecto de la cobertura de mantillo.	51
3.6.1.1. Pérdida de carbono total, nitrógeno total y fósforo total del suelo.	51
3.6.1.2. Carbono total, nitrógeno total y fósforo total del mantillo transportado.	52
3.6.2. Patrón espacial del efecto de la cobertura de mantillo.	53
3.6.2.1. Efecto del mantillo sobre la pérdida de suelo.	53
3.6.2.2. Efecto del mantillo sobre la pérdida de carbono total, nitrógeno total y fósforo total del suelo.	53
3.6.2.3. Patrón espacial del movimiento de mantillo.	54
3.6.2.4. Efecto del tratamiento sobre la calidad del mantillo.	54
3.6.3. Patrón espacial del suelo y mantillo en el tratamiento con mantillo (TCM).	54
3.6.4. Patrón espacial del suelo y mantillo en el tratamiento sin mantillo (TSM).	56
3.7. Discusión.	57
3.7.1. Efecto de la cobertura de mantillo sobre el movimiento de nutrientes en el suelo.	57
3.7.2. Dinámica espacial de la pérdida de nutrientes en el suelo y mantillo en el tratamiento con mantillo.	61
3.7.3. Dinámica espacial de la pérdida de nutrientes en el suelo y mantillo en el tratamiento sin mantillo.	62
3.8. Conclusiones.	63
3.9. Literatura citada.	64
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN GENERAL.	
4.1 Discusión general.	82
4.2 Literatura Citada.	84

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

CAPÍTULO II. VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL C Y N EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL

Tabla 2.1 Ubicación y características generales de los sitios de muestreo.	33
Tabla 2.2 Precipitación mensual (mm) en la Estación de Biología Chamela, Jalisco en los años 1997 y 1998.	33
Figura 2.1 Mapa de localización de la zona de estudio.	34
Figura 2.2 Mapa de localización de los sitios de muestreo.	35
Figura 2.3 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del suelo en el año 1997.	36
Figura 2.4 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del suelo de 1998-1999.	37
Figura 2.5 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de las formas microbianas y formas disponibles de nitrógeno en el suelo de 1998-1999	38
Figura 2.6 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del mantillo en el año 1997.	39
Figura 2.7 Ordenamiento temporal con análisis de componentes principales para la masa y los nutrientes totales en el mantillo de 1998-1999.	40
Figura 2.8 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del suelo en el año 1997	41
Figura 2.9 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales en el suelo de 1998-1999	42
Figura 2.10 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la concentración de las formas microbianas y formas disponibles de nitrógeno en el suelo de 1998-1999.	43
Figura 2.11 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la masa y el contenido de nutrientes totales en el mantillo de 1998-1999.	44
Figura 2.12 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales con la red de 39 sitios para la concentración de nutrientes totales en el suelo y en el mantillo.	45

CAPÍTULO III. DINÁMICA TEMPORAL Y ESPACIAL DEL EFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA EROSIÓN Y LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL.

Tabla 3.1 Ubicación y características generales de los sitios de muestreo.	69
Tabla 3.2 Valores de la probabilidad de rechazo de la hipótesis nula con los análisis de varianza para los datos de suelo de 1997 - 1999.	69
Tabla 3.3 Valores de la probabilidad de rechazo de la hipótesis nula con los análisis de varianza para los datos de mantillo de 1997 - 1999.	69
Tabla 3.4 Datos promedio de 8 fechas para la concentración de Ct, Nt y Pt de los sedimentos de suelo por sitios entre 1997 - 1999.	70
Tabla 3.5 Datos promedio de 8 fechas del contenido de Ct, Nt y Pt de los sedimentos de suelo por sitios entre 1997 - 1999.	70
Tabla 3.6 Datos promedio de 8 fechas para la concentración de Ct, Nt y Pt del mantillo por sitios entre 1997 - 1999.	71
Tabla 3.7 Datos promedio de 8 fechas para el contenido de Ct, Nt y Pt en el mantillo por sitios entre 1997 - 1999.	71
Figura 3.1 Mapa de localización de los sitios de muestreo	72
Figura 3.2 Dinámica estacional de la pérdida de suelo (g) en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM)	73
Figura 3.3 Dinámica estacional de la concentración de nutrientes en los sedimentos del suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM).	73
Figura 3.4 Dinámica estacional de la pérdida de nutrientes en los sedimentos del suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM).	74
Figura 3.5 Patrón temporal del movimiento y concentración de nutrientes en el mantillo.	75
Figura 3.6 Patrón temporal del contenido de nutrientes en el mantillo.	76
Figura 3.7 Variación espacial de la pérdida total de suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM).	77
Figura 3.8 Variación espacial del movimiento total de mantillo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM).	77
Figura 3.9 Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de pérdida de suelo en 12 sitios bajo el tratamiento con mantillo en el periodo 1997-1999.	78

Figura 3.10 Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de movimiento de mantillo en 12 sitios bajo el tratamiento con mantillo en el período 1997-1999.	78
Figura 3.11 Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de pérdida de suelo en 12 sitios bajo el tratamiento sin mantillo en el período 1997-1999.	79
Figura 3.12 Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos del movimiento de mantillo en 12 sitios bajo el tratamiento sin mantillo en el período 1997-1999.	80

RESUMEN

El objetivo principal de la presente tesis fue el estudio del patrón espacial de los nutrientes del suelo en un ecosistema tropical estacional bajo condiciones de selva. Este trabajo se realizó en una cuenca hidrográfica de 16 ha, donde se ubicaron 11 sitios de muestreo representativos de la heterogeneidad espacial de la cuenca. Se encontró que el patrón de distribución de la biomasa y los contenidos de nutrientes del mantillo fueron afectados por la orientación de laderas y por la posición al interior de la ladera, respectivamente. Sin embargo, no existió un ordenamiento espacial en función al relieve de la concentración Ct, Nt y Pt del mantillo, debido a que las diferencias en la composición química del material vegetal de las especies de árboles generan una gran variación espacial. Por su parte, el patrón de distribución espacial de la concentración de Ct, Nt y Pt del suelo tuvo una estructura jerárquica en tres escalas distintas: piso altitudinal, orientación y posición al interior de ladera. En cambio, la distribución espacial de la concentración de C y N microbiano, así como las de amonio (NH_4^+) y nitratos (NO_3^-) obedeció a la orientación y a la posición al interior de ladera. Los cambios estacionales de la biomasa del mantillo, la concentración y el contenido de C y N obedecieron a los procesos de descomposición del mantillo durante la época de lluvias, así como de los procesos de inmovilización microbiana en la época seca.

También, se evaluó el efecto de la cobertura de mantillo sobre la erosión de suelos. Utilizando un diseño experimental pareado con 12 sitios con cobertura de mantillo (TCM) y sin cobertura de mantillo (TSM) a lo largo de la cuenca hidrográfica. Se encontró que la cobertura del mantillo no sólo reduce significativamente la salida de partículas del suelo, sino también la pérdida de nutrientes, independientemente de la localización espacial de los sitios de muestreo. Sin embargo, la heterogeneidad espacial al interior de la ladera, sí modificó la cantidad de suelo erosionado: las superficies cumbrales presentaron una menor pérdida de nutrientes que los dorsos y los pies de ladera. La dinámica temporal de la pérdida de suelo siguió el patrón de la precipitación, es decir, en los meses con baja precipitación (junio de 1997) se movió una menor cantidad de suelo (88.4 g); por el contrario, en los meses de mayor intensidad de la precipitación (septiembre de 1997), el movimiento de suelo fue mayor (503 g).

PRESENTACIÓN DE LA TESIS

1.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más importantes en la ecología de ecosistemas reside en entender no sólo las causas que determinan su estructura y funcionamiento, sino también en conocer la variabilidad espacial y temporal de dichos procesos. Los procesos del ecosistema como la productividad primaria neta, la evapotranspiración y la descomposición están influenciados por la heterogeneidad espacial. La influencia de la heterogeneidad del paisaje afecta tanto a los atributos espaciales como a los temporales que determinan los procesos del ecosistema (Pickett y Cadenasso 1995).

En ecología el concepto de paisaje tiene dos acepciones. La primera, es intuitiva considerando el paisaje como un área específica basada en escalas humanas. Forman y Godron (1986) lo definen como sistemas ecológicos que existen a escalas de km y comprenden elementos reconocibles como parches de bosques, establecimientos humanos y campos agrícolas. La segunda, es una abstracción el paisaje representando heterogeneidad espacial a cualquier escala. Es decir, como unidad heterogénea que consiste de diversos componentes o elementos. En este aspecto el paisaje es un criterio ecológico para una aproximación espacial en cualquier sistema ecológico (Pickett y Cadenasso 1995). Es en este último contexto como se utilizó el concepto de paisaje en la presente investigación

Levin (1992) sugiere que el estudio de los patrones espaciales de los procesos ecológicos son dependientes de la escala de observación, en este sentido, el estudio de la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas no es la excepción. Con el enfoque de la ecología del paisaje es posible entender cómo es el arreglo espacial tanto de los factores abióticos como de los bióticos y su influencia sobre los procesos que determinan la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Turner 1989).

En ecología de ecosistemas es imperativo entender la variación espacial y temporal de los procesos y los factores que controlan el ciclo de nutrientes (descomposición, mineralización, inmovilización). Considerando que la distribución espacial de la producción de hojarasca, la descomposición del mantillo, la diversidad biológica, las propiedades físicas y químicas del suelo pueden afectar la dinámica espacial del ciclo de nutrientes. Los conocimientos actuales sugieren que los patrones del paisaje pueden reflejar procesos que operan a diferentes escalas y que pueden estar

alterando la estructura y funcionamiento del paisaje (Forman y Godron 1986, Turner 1989).

Asimismo, la erosión del suelo es uno de los principales problemas ambientales, lo cual tiene implicaciones no sólo en la pérdida de suelo sino en el funcionamiento de los ecosistemas porque reduce la calidad química y biológica del suelo. Por ejemplo, la erosión del suelo genera la pérdida de nutrientes, la disminución del sustrato para las raíces finas, reduce la materia orgánica del suelo (MOS) y genera cambios en la estructura y textura del suelo (Gebremedhin et al. 1999). Sin embargo, las consecuencias de la erosión del suelo no son homogéneas espacial y temporalmente, los factores que controlan la heterogeneidad espacial y temporal de la erosión están estructurados a diferentes escalas. Por ejemplo, la heterogeneidad temporal es resultado de patrones estacionales e intraestacionales tales como los asociados a eventos individuales y recurrentes de precipitación, o a los asociados a la dinámica del mantillo y la cobertura del dosel. Por otra parte, la heterogeneidad espacial es el resultado de la distribución espacial de las características topográficas (origen, forma, ángulo de la pendiente, longitud de la pendiente) y edáficas (textura, densidad).

Debido a lo anterior, la importancia teórica de los estudios a diferentes escalas radica en entender la complejidad del proceso de erosión, así como establecer los factores que le determinan a diferentes escalas, para diseñar estrategias de recuperación y protección adecuadas en áreas erosionadas de ecosistemas naturales y manejados (Rudra et al. 1999). A pesar de ello, existen pocos trabajos que estudien la variación espacial de la pérdida de suelo y de los factores que la controlan a diferentes escalas.

El entendimiento de la heterogeneidad espacial y temporal tanto del ciclo de nutrientes como de la susceptibilidad a la erosión del suelo, son clave para comprender el funcionamiento de los ecosistemas, así como sus cambios en diferentes escalas espaciales y temporales, a fin de proponer alternativas de manejo adecuadas.

El objetivo general del presente estudio fue determinar los factores que afectan la distribución espacial y temporal del C y N del suelo total y biológicamente activos, así como los procesos de erosión del suelo que influyen en el funcionamiento de una cuenca hidrográfica en un ecosistema tropical estacional.

Y los objetivos particulares fueron: i) identificar los patrones espaciales que determinan la distribución de carbono y nitrógeno en el suelo a escala de una cuenca

hidrográfica. li) determinar el efecto de la estacionalidad sobre la dinámica de la mineralización e inmovilización del carbono y nitrógeno del suelo a escala de una cuenca hidrográfica. lii) conocer la dinámica espacial y temporal del carbono y nitrógeno biológicamente activos en el suelo en una cuenca hidrográfica. iv) establecer los factores que afectan la distribución espacial y temporal de la erosión del suelo en una cuenca hidrográfica. v) estimar la distribución espacial y temporal de las pérdidas de carbono total, nitrógeno total y fósforo total por efecto de la erosión del suelo a escala de una cuenca hidrográfica.

1.2. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se encuentra estructurada en dos partes, las cuales están enmarcadas en el contexto de la ecología del paisaje para resaltar la importancia de la heterogeneidad tanto espacial como temporal, como una variable relacionada con la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. En la primera parte se analiza la distribución espacial de los nutrientes en el suelo, así como su dinámica espacial y temporal utilizando como unidad de estudio la cuenca hidrográfica. En la segunda parte, se analizó la dinámica espacial y temporal de la erosión del suelo, haciendo referencia al papel que desempeña el mantillo como protector contra la erosión del suelo y la pérdida de nutrientes.

1.4. LITERATURA CITADA.

- Forman R. T. T. y Godron, M. 1986. *Landscape ecology*. John Wiley and Sons, New York, New York, EUA.
- Gebremedhin, B., S. M. Swinton, y Y. Tilahun. 1999. Effects of stone terraces on crop yields and farm profitability: Results of on-farm research in Tigray, northern Ethiopia. *Journal of Soil and Water Conservation* **54**:568-573.
- Levin, S. A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* **73**:1943-1967
- Pickett, S. T. A. y Cadenasso, M. L. 1995. *Landscape Ecology: Spatial heterogeneity in Ecological Systems*. *Science* **269**:331-334.
- Rudra, R. P., W. T. Dickinson, M. J. Abedini y G. J. Wall. 1999. A multi-tier approach for agricultural watershed management. *Journal of the American Water Resources Association* **35**:1159-1170.
- Turner, M. G. 1989. Landscape ecology. the effect of pattern on process. *Annual Review of the Ecology and Systematics* **20**:171-197.

VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL C Y N EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL

2.1. INTRODUCCIÓN

El ciclo de nutrientes se relaciona directamente con el ciclo del carbono y con el contenido de la materia orgánica del suelo (MOS). El flujo de carbono provee energía para llevar a cabo la mineralización de la MOS y la liberación de nutrientes al suelo (Tate 1992). La distribución espacial de la MOS y de los nutrientes están influenciados por la estructura espacial del relieve y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Pastor y Post 1986). Por ejemplo, Stone et al (1985) reportan que los pies de laderas tienen mayor contenido de MOS y de nutrientes en comparación con la cantidad que se encuentra en los dorsos y superficies cumbreles. Asimismo, Roy y Singh (1994) encontraron que en las diferentes microformas del relieve las características biológicas y químicas fueron distintas. Las tasas de mineralización de N fueron mayores en las depresiones en relación a las zonas planas adyacentes, debido a la acumulación de mantillo y la actividad de la biomasa. Su estudio revela que la heterogeneidad espacial en un bosque tropical seco determina la formación de parches de nutrientes disponibles. Sin embargo, a pesar de que se conocen los factores que influyen en la descomposición y la estabilización de la MOS, poco se conoce acerca de cómo varían espacialmente los factores y mecanismos que afectan los almacenes de C en el suelo (Davidson 1995).

Conocer el efecto de la heterogeneidad espacial y temporal sobre la disponibilidad de nutrientes y sobre los almacenes totales de nutrientes puede lograrse entendiendo los flujos y la redistribución de materiales y energía entre los elementos del paisaje (Risser 1987). Dado que los procesos ecológicos operan en diferentes escalas temporales, los cambios en la estructura y en el funcionamiento del paisaje son dependientes de la escala; es decir, la dinámica de un paisaje puede exhibir un mosaico estable a una escala espacial, pero no al considerarlo a otra escala (Kolasa y Rollo 1991). Por lo tanto, la elección de una escala para observar el comportamiento del paisaje puede influir en las conclusiones que generan los patrones observados (Turner 1989).

Los procesos ecológicos del ecosistema como la productividad primaria neta, la evapotranspiración y la descomposición, están influenciados por la heterogeneidad espacial; generando un mosaico espacial que modifica los flujos de materia y energía dentro del ecosistema (Turner 1989). Los patrones espaciales han demostrado influir en los procesos ecológicos, por ello es importante identificar la escala, los procesos y los factores en donde la heterogeneidad espacial tiene una influencia significativa en la dinámica del sistema (Forman 1995, Pickett y Cadenasso 1995, Turner 1989). De manera que incorporando la ecología del paisaje en sistemas organizados jerárquicamente, es posible estudiar el funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema y establecer su importancia en diferentes escalas espaciales y temporales (Urban et al. 1987).

Un elemento importante para el diseño y análisis de los estudios de paisaje es el relieve de la cuenca hidrográfica (Band 1989). Dentro de ésta, las características de los suelos como la textura, la disponibilidad de agua, la concentración de la materia orgánica del suelo (MOS) y los nutrientes del suelo reciben la mayor influencia del relieve (Roy y Singh 1994, Voroney et al. 1981). Caracterizar la variabilidad espacial de los nutrientes en el paisaje, es crítico para predecir adecuadamente los procesos del ecosistema en amplias escalas espaciales (Schimei et al. 1991).

2.1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue determinar el efecto de la heterogeneidad espacial y temporal sobre la distribución de carbono (C) y nitrógeno (N) en una cuenca hidrográfica de un ecosistema tropical estacional.

Los objetivos particulares fueron: a) identificar los factores que determinan los patrones espaciales y temporales de la distribución de los almacenes totales de C, N y P del suelo y mantillo y b) identificar los factores que determinan los patrones espaciales y temporales de la distribución de los almacenes biológicamente activos de C y N y la disponibilidad de N en el suelo amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-).

2.2. SITIO DE ESTUDIO

La investigación se realizó en la Estación de Biología Chamela en Jalisco, México; localizada a 19° 30' latitud norte y 105° 05' longitud oeste (figura 2.1). La zona pertenece a la porción norte de la Sierra Madre del Sur (INEGI 1985). El sistema de topofomas dominantes son lomeríos y valles sobre granitos y graniodoritas del Cretácico (Córdova 1988). La altitud máxima de los lomeríos es de 220 m y las pendientes

dominantes oscilan entre los 15° y 60° (INEGI 1985). Los suelos dominantes son someros, con textura migajón-arenosa y se clasifican como Entisoles (Solís 1993). El clima es tropical estacional, con una temperatura media anual de 24°C y una precipitación media anual de 748 mm. El 80% de la precipitación se concentra en los meses de verano (Bullock 1986).

El tipo de vegetación dominante es la selva baja caducifolia (SBC), una de las más diversas de su tipo (Lott et al. 1987). La producción de hojas es sincrónica para la mayoría de las especies y coincide con el inicio de la temporada húmeda al final del mes de junio o principios del mes de julio. La vegetación arbórea empieza a tirar sus hojas en el mes de noviembre (Bullock y Solís-Magallanes 1990).

Dentro de la Estación de Biología Chamela, existen cinco cuencas experimentales. En una de estas cuencas en la Cuenca #1 se llevó a cabo esta investigación. La Cuenca #1 tiene un perímetro de 2,090m y una superficie de 16 ha. El cauce principal se encuentra en una fractura con rumbo este-oeste dividiéndola en dos grupos de laderas, uno orientado al sur que representa el 62% del área total y otro orientado al norte el cual ocupa el 38% restante (Galicia 1992). Esta cuenca se caracteriza por la presencia de dos fallas que cruzan transversalmente al cauce principal dividiéndola en tres pisos: alto, medio y bajo. La diferencia entre la cabecera y el nivel de base es de 130 m (López-Blanco et al. 1999). La presencia de estos segmentos determinan la morfología de las unidades de ladera (UL) las cuales con base en sus características morfológicas se agrupan en: 1) homogéneas planas (4 UL), localizadas en el segmento alto de la cuenca con pendientes menores a 10°, 2) homogéneas inclinadas (3 UL) localizadas en el segmento bajo de la cuenca en la ladera orientada hacia el norte, con pendientes mayores a 30°, 3) laderas heterogéneas (7 UL) localizadas en la parte baja de la ladera orientada hacia el sur y en la parte media de la cuenca, caracterizadas por tener cambios continuos de pendiente (Galicia 1992).

Las características físicas de los suelos de la Cuenca #1 se distribuyen de la siguiente manera la parte alta de la cuenca es una zona plana (4°) que contiene el mayor porcentaje de arcillas (44%) y el menor contenido de arenas (56%). Por el contrario, la parte baja es una zona con marcado ángulo de inclinación (40°), presenta el mayor porcentaje de arenas (65%) y el menor contenido de arcillas (15%, Galicia et al. 1995).

El piso bajo presenta mayor humedad que el piso alto (14% y 10% respectivamente). Los principales factores que modifican la distribución espacial de la humedad en el suelo son la demanda evaporativa y las características físicas de los suelos. La mayor salida de agua del sistema es mediante la evapotranspiración (EVT), ya que representa alrededor del 80% del agua. La porción orientada al sur presenta una mayor demanda evaporativa que la porción orientada al norte (Galicia et al. 1999).

La distribución de la disponibilidad de agua se refleja en la vegetación, por ejemplo, Martínez-Yrizar et al. (1996) reportan que el piso bajo presenta mayor área basal promedio de los árboles ($19.8 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) que el piso alto y medio (12.7 y $17.3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente). Asimismo, reportan que el incremento de DAP fue mayor en el piso bajo $0.29 \text{ cm ind}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con respecto a los pisos alto y medio (0.20 y $0.19 \text{ cm ind}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente). El número de especies de árboles y arbustos es mayor en el piso bajo (88 especies) en relación a los pisos alto y medio (57 y 78 especies respectivamente).

Este sistema de variación en características como humedad del suelo, propiedades físicas del suelo y número de especies vegetales, permite evaluar la heterogeneidad espacial del paisaje sobre el ciclo de nutrientes al interior de una cuenca.

2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

En el año de 1997 se establecieron 7 sitios de muestreo abarcando los pisos alto y medio de la Cuenca #1, y en el año de 1998 se incorporaron 4 sitios más, ubicados en el piso bajo de la Cuenca #1 (figura 2.2) haciendo un total de 11 sitios. Los criterios utilizados para definir la ubicación de cada sitio de muestreo se basaron en la estructura jerárquica espacial de la cuenca (Tabla 2.1) definida por Galicia et al. (1995).

En cada uno de los sitios, se marcaron dos cuadros permanentes de 1m de largo en forma paralela, divididos en 16 cuadros de 625 cm^2 , en los cuales se tomaron las muestras de suelo y mantillo en cada una de las fechas de muestreo.

2.4. MUESTREO

El período de muestreo abarcó los años 1997 y 1998-99 con un total de 9 fechas de muestreo. Dado que el sistema presenta una marcada estacionalidad y ésta afecta la dinámica del C y N, las fechas de muestreo corresponden a los cambios estacionales en el sistema, en cada uno de los años (Tabla 2.2). Las fechas de colecta fueron abril, junio, julio, septiembre y noviembre de 1997. Abril, julio y noviembre de 1998 y marzo de 1999.

En el mes de marzo de 1999 se realizó un muestreo aleatorio de 39 sitios cubriendo la cuenca de estudio con el propósito de conocer la variación espacial cubierta con el diseño experimental de los 11 sitios seleccionados en la investigación (figura 2.2).

2.4.1. SUELO

El muestreo de suelo se realizó con un nucleador de 5 cm de diámetro a una profundidad de 5 cm, las muestras fueron refrigeradas a 4°C y trasladadas al laboratorio para las determinaciones químicas.

2.4.2. MANTILLO

La colecta del mantillo corresponde a los mismos sitios en donde se realizó el muestreo de suelo. El área de colecta del mantillo fue de 0.0314 m² delimitada por un plato de 20 cm de diámetro. Las muestras fueron pesadas inmediatamente después de la colecta para estimar el contenido de humedad y secadas a temperatura constante (60°C por 48 horas).

2.5. ANÁLISIS DE LABORATORIO

2.5.1. DETERMINACIONES QUÍMICAS DEL SUELO

De cada muestra de suelo se tomó una submuestra de 50 g. Las submuestras fueron pesadas y secadas a una temperatura constante de 60°C por 24 horas. Posteriormente fueron pesadas nuevamente para determinar el porcentaje de humedad y molidas en un mortero de ágata. La concentración de carbono total (Ct) se determinó por medio del autoanalizador de carbono modelo CM5012 (UIC 1995) y las concentraciones de nitrógeno total (Nt) y fósforo total (Pt) se hicieron por el método de oxidación húmeda de Kjeldhal (McGill y Figueiredo 1993), las lecturas fueron realizadas por colorimetría utilizando un autoanalizador (Technicon Industrial Systems 1977). La determinación del carbono en la biomasa microbiana se realizó por el método de fumigación-extracción (Vance et al. 1987) y los extractos se leyeron en un autoanalizador de carbono modelo CM5012 (UIC 1995). La concentración de carbono microbiano fue calculado como la diferencia entre las muestras fumigadas y las muestras no fumigadas y divididas entre el valor de conversión de 0.33 estimado por Jenkinson (1987). El nitrógeno microbiano se determinó por el método de fumigación de CHCl₃ y extracción (Brookes et al. 1985). Los extractos se leyeron como Nt utilizando un autoanalizador (Technicon Industrial Systems 1977). El nitrógeno de la biomasa microbiana fue calculado como la diferencia del suelo no fumigado menos el suelo fumigado y divididas entre el valor de conversión de 0.57 estimado por Jenkinson (1987). Para la determinación de amonio (NH₄⁺) y nitrato (NO₃⁻) se pesaron 10g de suelo y se extrajeron con KCl 2N, la lectura de los extractos se realizó por colorimetría utilizando un autoanalizador (Technicon Industrial Systems 1977).

2.5.2. DETERMINACIONES QUÍMICAS DEL MANTILLO

El mantillo fue procesado en un molino eléctrico para homogeneizar las muestras y hacer las determinaciones químicas. Los análisis efectuadas fueron la concentración de Ct por medio del autoanalizador de carbono modelo CM5012 (UIC 1995) y las concentraciones de Nt y Pt por el método de digestión húmeda (Thomas et al. 1967), las lecturas de los extractos se realizaron por colorimetría utilizando un autoanalizador (Technicon Industrial Systems 1977).

2.5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Con el propósito de conocer la variación temporal y espacial de la concentración de Ct, Nt, Pt en el suelo y mantillo se realizaron análisis de componentes principales (ACP, Kendall 1980). El análisis de cada elemento se realizó en dos periodos. En el año de 1997 la matriz comprendió 7 sitios en 5 fechas (suelo n=35 y mantillo n=35) En el período de 1998-1999 la matriz comprendió 11 sitios en 4 fechas (suelo n= 44 y mantillo n=44).

Para la concentración de Cmic y Nmic se utilizó una matriz de 11 sitios en 4 fechas (n=44) y para la concentración de NH_4^+ y NO_3^- la matriz abarcó 11 sitios en 3 fechas (n=33).

Para conocer la variación espacial de la Cuenca #1 cubierta por los 11 sitios del diseño experimental, se realizó el ACP con los datos de la concentración de Ct, Nt, Pt del suelo y mantillo de los 39 sitios de marzo 1999.

Los análisis de componentes principales se realizaron con el programa ORDEN (Ezcurra 1990)

2.6. RESULTADOS

2.6.1. VARIACIÓN TEMPORAL

2.6.1.1. NUTRIENTES TOTALES DEL SUELO.

AÑO 1997

La mayor variación estacional de el carbono total (Ct) del suelo se presentó entre la época de lluvias intensas (septiembre: $14,982 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 1,191$) y el final de la época húmeda (noviembre: $31,335 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 6,490$). El ordenamiento temporal agrupó a los meses de abril y septiembre los cuales fueron de menor concentración, los meses restantes se dispersaron a lo largo de los ejes (figura 2.3a). Junio y noviembre fueron los

de mayor concentración y julio fue de concentración intermedia ($22,283 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 3,061$)

Los cambios estacionales del Nt del suelo se presentaron en la época de lluvias intensas (septiembre: $1,881 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 561$) y el final de la época húmeda (noviembre: $2,757 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 573$). En el ordenamiento se agruparon abril y julio con $1,123 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 102$ y $1,716 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 315$; respectivamente (figura 2.3b).

Los cambios estacionales en la concentración de Pt en el suelo indicaron que la época de lluvias intensas (septiembre: $218 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 30$) y la época seca (abril: $205 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 8$) presentaron la mayor varianza (figura 2.3c). En el ordenamiento se agruparon abril y julio con menor concentración ($206 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 6$). Junio y noviembre presentaron la mayor concentración ($222 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 10$ y $233 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 13$; respectivamente).

PERÍODO 1998-1999

Los cambios estacionales de la concentración de Ct estuvieron explicados por los meses de la época seca (abril de 1998 y marzo de 1999; figura 2.4a). Abril presentó menor concentración ($26,600 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 4,581$) en relación a marzo ($43,636 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 4,343$). En tanto que julio y noviembre se relacionaron entre sí ($39,547 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 3,687$).

La variación temporal de la concentración de Nt fue explicada por abril y julio (figura 2.4b). La época seca (abril) presentó menor concentración ($1,864 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 224$) en relación al inicio de la época húmeda (julio: $2,394 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 193$).

La variación temporal de la concentración de Pt en el suelo se definió entre julio y noviembre. Al inicio de la época húmeda (julio), la concentración de Pt en el suelo fue mayor (julio: $345 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 65$) en relación al final de la época húmeda (noviembre: $249 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 28$). En cambio, los meses de la época seca (abril y marzo) se separaron (figura 2.4c), abril presentó menor concentración de Pt en el suelo en relación a marzo.

2.6.1.2. CARBONO Y NITRÓGENO BIOLÓGICAMENTE ACTIVOS Y NITRÓGENO DISPONIBLE (NH_4^+ , NO_3^-)

La variación temporal del carbono microbiano (Cmic) del suelo en el periodo de 1998 – 1999 fue contrastante entre julio y los meses de abril y noviembre (figura 2.5a). La concentración de Cmic fue mayor en la época húmeda (julio: $930 \mu\text{g Cmic g}^{-1} \pm 62$), en relación a abril y noviembre ($741 \mu\text{g Cmic g}^{-1} \pm 42$).

La variación temporal del nitrógeno microbiano (Nmic) del suelo fue explicado por abril 1998 y marzo 1999 (figura 2.5b). En abril la variación en la concentración de Nmic al

interior del mes fue mayor, por el contrario marzo presentó menor variación. Los meses de la época húmeda de julio y noviembre fueron de mayor concentración ($87 \mu\text{g Nmic g}^{-1} \pm 10$).

Los cambios estacionales de la concentración de amonio (NH_4^+) en el suelo, se presentaron entre abril y julio (figura 2.5c). Abril tuvo menor concentración ($5.7 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 0.7$) con respecto a julio ($7 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 2.4$). Para la concentración de nitratos (NO_3^-) la variación de la estacionalidad de la precipitación entre abril y noviembre reflejó los cambios de las formas de N mineral (figura 2.5d), abril presentó menor concentración ($7 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 0.9$), en contraste noviembre fue de concentración intermedia ($29 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 3$).

2.6.1.3. NUTRIENTES TOTALES DEL MANTILLO

AÑO 1997

La concentración de Ct del mantillo mostró la variación estacional más importante entre el inicio de la época húmeda (julio: $281,817 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 19,531$) y la época de lluvias intensas (septiembre: $159,720 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 24,648$; figura 2.6a). En el ordenamiento temporal se agrupan julio y noviembre de concentración intermedia. El resto de los meses se separaron a lo largo de los ejes en donde abril presentó la mayor concentración ($362,798 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 18,906$). La variación estacional del Nt del mantillo fue explicada por el final de la época seca (junio: $9,943 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 789$) y el final de la época húmeda (noviembre $13,500 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 1,164$; figura 2.6b). La ordenación agrupó a abril y septiembre con menor concentración ($10,286 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 436$). La mayor variación estacional de la concentración de Pt del mantillo se presentó entre la época seca (abril: $1,389 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 45$) y el inicio de la época húmeda (julio: $1,465 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 68$; figura 2.6c) En el ordenamiento se agruparon abril y noviembre con una alta variación en sus valores de concentración al interior del mes.

PERÍODO 1998-1999

MASA (gm^{-2})

La variación temporal de la masa del mantillo en el periodo de 1998 - 1999 fue explicada por el inicio de la época húmeda (julio: $0.94 \text{ gm}^{-2} \pm 0.21$) y la época seca (marzo: $0.64 \text{ gm}^{-2} \pm 0.08$). El ordenamiento agrupó a los meses de abril y noviembre ($1.88 \text{ gm}^{-2} \pm 0.22$) en tanto que los meses de julio y marzo se separaron en cuadrantes distintos (figura 2.7a).

CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES

La mayor variación estacional de la concentración de Ct del mantillo fue explicada por julio y noviembre (figura 2.7b). El ordenamiento temporal separó en cuadrantes extremos a la época seca (abril: $354,160 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 15,735$) y el final de época húmeda (noviembre: $300,554 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 28,945$); y agrupó a julio y marzo ($317,050 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 1,354$). Los cambios estacionales de la concentración de Nt en el mantillo se presentaron al inicio de la época húmeda (julio) y el final de la época húmeda (noviembre, figura 2.7c). El ordenamiento separó a marzo ($12,464 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 655$) y a noviembre ($21,218 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 1,630$); y agrupó a abril y julio con valores intermedios ($18,545 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 929$). La variación temporal del Pt en el mantillo se definió entre la época seca (abril) y el inicio de la época húmeda (julio, figura 2.7d). En el ordenamiento julio y noviembre se agruparon ($1,722 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 74$), en tanto abril y marzo se separaron en cuadrantes extremos en donde marzo presentó la menor concentración del periodo ($1,254 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 57$).

CONTENIDO DE NUTRIENTES

Los cambios estacionales de los almacenes de Ct y Nt en el mantillo indicaron que los contrastes más importantes se presentaron entre abril y julio (figura 2.7e y 2.7f). En el ordenamiento para el Ct, los meses se separaron a lo largo de los ejes, noviembre presentó los valores más altos del periodo ($0.54 \text{ gm}^{-2} \pm 0.08$), en contraste marzo presentó los valores más bajos ($0.19 \text{ gm}^{-2} \pm 0.02$). En tanto que para el Nt el ordenamiento temporal agrupó a noviembre y marzo ($0.04 \text{ gm}^{-2} \pm 0.006$), y separó a abril y julio. La variación temporal del contenido de Pt en el mantillo se presentó entre julio y marzo (figura 2.7g). Con el ordenamiento temporal noviembre y marzo formaron un grupo con mayor contenido de Pt ($0.003 \text{ gm}^{-2} \pm 0.0005$), misma agrupación que la realizada para el contenido de Nt; en tanto que los meses de abril ($0.001 \text{ gm}^{-2} \pm 0.0001$) y julio ($0.001 \text{ gm}^{-2} \pm 0.0003$) se separaron en cuadrantes distintos.

2.6.2. PATRÓN ESPACIAL

2.6.2.1. NUTRIENTES TOTALES DEL SUELO

AÑO 1997

La variación espacial de la concentración de Ct en el suelo se presentó entre los sitios 5 y 6 (figura 2.8a), ambos sitios se ubicaron en el piso medio de la cuenca. El sitio 5 orientado al norte presentó mayor concentración ($35,836 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 8,829$) en relación al sitio 6 orientado al sur ($20,090 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 1,884$). El ordenamiento espacial formó dos

grupos: i) los sitios 1, 2 en el piso alto y en pie de ladera y el sitio 4 en el piso medio y en superficie cumbral y ii) los sitios 6 y 7 orientados al sur y en el piso medio.

Los resultados del análisis realizado para el Nt del suelo mostraron que la mayor variación espacial se presentó en el piso medio de la cuenca entre los sitios 4 y 5. Estos sitios se separaron por su posición al interior de la ladera, la superficie cumbral presentó menor concentración (sitio 4: $1,856 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 412$) con respecto al dorso (sitio 5: $2,822 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 767$). El ordenamiento espacial agrupó nuevamente a los sitios 6 y 7, ubicando en este mismo grupo al sitio 1. Otro grupo lo integraron los sitios 3 y 4 orientados al norte y en superficie cumbral (figura 2.8b).

La mayor variación espacial del Pt en el suelo se definió entre el sitio 1 (piso alto, orientado al sur) y el sitio 5 (piso medio, orientado al norte; figura 2.8c). El sitio 5 presentó mayor concentración de Pt ($279 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 32$) con respecto al sitio 1 ($181 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 7$). El ordenamiento espacial agrupó a los sitios 1, 2 y 4, misma agrupación que el Ct y en otro grupo se relacionaron los sitios 6 y 7 al igual que en el Ct y el Nt (figura 2.8a, b y c).

PERÍODO 1998-1999

La mayor variación espacial de la concentración de Ct del suelo se presentó en la ladera orientada al sur entre el piso alto (sitio 1 $32,749 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 8,665$) y el piso bajo (sitio 8: $43,813 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 5,930$; figura 2.9a). La mayor variación espacial de la concentración de Nt se presentó en el piso bajo de la cuenca por efecto de la orientación: el sitio 10 orientado al norte presentó mayor concentración ($3,810 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 907$) con respecto al sitio 8 orientado al sur ($2,910 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 349$; figura 2.9b). En el ordenamiento espacial de las concentraciones de Ct y de Nt, los sitios ubicados en el piso medio y orientados al norte se separaron por su posición al interior de la ladera (figura 2.9a y 2.9b): la superficie cumbral presentó menor concentración (sitio 4. $31,095 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 5,015$ y $2,055 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 227$), en relación al pie de ladera (sitio 5: $40,540 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 6,853$ y $2,485 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 255$). En contraste, los sitios 6 y 7 ubicados en el piso medio y orientados al sur se agruparon independientemente de su posición al interior de la ladera con menor concentración ($27,868 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 4,779$ y $1,690 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 207$). Por otra parte, los sitios ubicados en el piso bajo de la cuenca se separaron por orientación, los sitios 10 y 11 en la ladera orientada al norte presentaron mayor concentración ($56,630 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 10,140$ y $3,810 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 907$) en relación a los sitios 8 y 9 ubicados en la ladera orientada al sur ($43,813 \mu\text{g C g}^{-1} \pm 5,930$ y $2,910 \mu\text{g N g}^{-1} \pm 349$).

La variación espacial de la concentración de Pt en el suelo se definió entre el sitio 8 (pie de ladera y orientado al sur: $410 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 49$) y el sitio 11 (superficie cumbral y orientado al norte: $397 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 70$). El ordenamiento espacial mostró un grupo formado por los sitios ubicados en el piso alto y medio de la cuenca (con excepción del sitio 4). Los sitios 8 y 9 ubicados en el piso bajo de la cuenca y orientados al sur se agruparon. Por el contrario, los sitios del piso bajo y orientados al norte se separaron por su posición al interior de la ladera, el sitio 10 en pie de ladera presentó mayor concentración ($587 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 96$) con respecto al sitio 11 en superficie cumbral ($397 \mu\text{g P g}^{-1} \pm 70$; figura 2.9c).

2.6.2.2. CARBONO Y NITRÓGENO MICROBIANO Y FORMAS DISPONIBLES DE NITRÓGENO (NH_4^+ , NO_3^-)

El comportamiento espacial del Cmic indicó que la mayor diferencia se presentó en el piso medio de la cuenca orientado al norte (sitios 4 y el sitio 5, figura 2.10a). Estos sitios se separaron por su posición al interior de la ladera, la superficie cumbral presentó menor concentración (sitio 4: $651 \mu\text{g Cmic g}^{-1} \pm 80$) con respecto al dorso de la ladera (sitio 5: $767 \mu\text{g Cmic g}^{-1} \pm 105$). El ordenamiento espacial formó un grupo integrado por los sitios 1, 3, 5, 7, 9 y 11; ubicados en superficie cumbral, con excepción del sitio 5. Este grupo fue de mayor concentración de Cmic con la excepción del sitio 7.

La variación espacial de la concentración de Nmic se presentó entre el piso medio de la cuenca en la ladera orientada al norte (sitio 5) y el piso bajo de la cuenca en la ladera orientada al sur (sitio 8, figura 2.10b). La concentración de Nmic del suelo en el sitio 5 fue menor ($63 \mu\text{g Nmic g}^{-1} \pm 10$) con respecto al sitio 8 ($74 \mu\text{g Nmic g}^{-1} \pm 12$). Los sitios se ordenaron en la siguiente forma: i) sitios 8 y 10 ubicados en el piso bajo y en pie de ladera, presentaron menor concentración ($74 \mu\text{g Nmic g}^{-1} \pm 12$) con respecto al grupo ii) sitios 9 y 11 ubicados en el piso bajo y en superficie cumbral ($80 \mu\text{g Nmic g}^{-1} \pm 13$), iii) sitios 2 y 4 orientados al norte fueron de concentración intermedia y iv) sitios 5, 6 y 7 ubicados en el piso medio de la cuenca presentaron la menor concentración ($51- 63 \mu\text{g Nmic g}^{-1}$).

La mayor variación espacial de la concentración de NH_4^+ en el suelo se presentó en el piso alto de la cuenca entre el sitio 1 y el sitio 3 (figura 2.10c). El sitio 1 ubicado en el pie de ladera presentó mayor concentración ($4.4 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 2.3$) con relación al sitio 3 ubicado en superficie cumbral ($3.8 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 1.3$). En el ordenamiento, los sitios ubicados en el piso medio tuvieron mayor concentración de amonio (sitios 4, 5, 6 y 7:

10 $1 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 2.4$). Los sitios del piso bajo de la cuenca se separaron por su posición al interior de la ladera: los sitios ubicados en superficie cumbral presentaron menor concentración de amonio (sitios 9 y 11: $2.6 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 1.2$) con respecto a los sitios ubicados en pie de ladera (sitios 8 y 10: $3.7 \mu\text{g NH}_4^+ \text{g}^{-1} \pm 1.5$).

La mayor variación espacial de la concentración de NO_3^- se presentó en el piso medio de la cuenca entre el sitio 4 y el sitio 6 (figura 2.10d). El sitio 4 orientado al norte presentó mayor concentración ($31 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 10$) con respecto al sitio 6 orientado al sur ($23 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 8$). En el ordenamiento se formaron tres grupos: i) sitios 2 y 6 en pie de ladera ($38 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 16$), ii) sitios 10 y 11 en el piso bajo y orientados al norte ($45 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 21$) y iii) sitios 8 y 9 en el piso bajo y orientados al sur ($28 \mu\text{g NO}_3^- \text{g}^{-1} \pm 8$).

2.6.2.3. NUTRIENTES TOTALES DEL MANTILLO

Con el ACP para la concentración de Ct, Nt y Pt del mantillo en los dos periodos de estudio no fue posible identificar patrones espaciales generales. Sin embargo los resultados de los análisis en el periodo 1998-99 para la masa del mantillo y los contenidos de Ct, Nt y Pt si presentaron patrones. La masa del mantillo presentó un efecto de orientación en el piso bajo de la cuenca entre el sitio 9 y el sitio 11 (figura 2.11a). El sitio 9 orientado al sur presentó una menor masa ($0.07 \text{ gm}^{-2} \pm 0.2$) en relación al sitio 11 orientado al norte ($1.1 \text{ gm}^{-2} \pm 0.3$). En el ordenamiento espacial también se observó este efecto de orientación en los tres grupos: i) sitios 3 y 10 en superficie cumbral y orientados al norte: $1.6 \text{ gm}^{-2} \pm 0.6$, ii) sitios 6 y 7 en el piso medio y orientados al sur: $0.9 \text{ g m}^{-2} \pm 0.4$ y, iii) sitios 4, 5 y 11 orientados al norte: $1.2 \text{ g m}^{-2} \pm 0.3$, en este grupo se ubicó también el sitio 1 con $1.4 \text{ g m}^{-2} \pm 0.2$.

La mayor variación espacial de los contenidos de Ct, Nt y Pt del mantillo se presentó consistentemente entre los sitios 8 y 11 localizados en el piso bajo de la cuenca, básicamente por un efecto de posición al interior de la ladera. El pie de ladera presentó consistentemente mayor contenido (sitio 8: $0.5 \text{ g de C} \pm 0.2$, $0.032 \text{ g de N} \pm 0.01$ y $0.003 \text{ g de P} \pm 0.0009$) que la superficie cumbral (sitio 11: $0.3 \text{ g de C} \pm 0.1$, $0.02 \text{ g de N} \pm 0.01$ y $0.002 \text{ g de P} \pm 0.0004$; figura 2.11b, c y d).

2.6.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS CON LA RED DE 39 PUNTOS PARA LOS NUTRIENTES TOTALES DEL SUELO Y MANTILLO.

Los resultados obtenidos con el ACP para la concentración de Ct, Nt y Pt del suelo y del mantillo en el muestreo de los 39 sitios en marzo de 1999 indicaron que los sitios del diseño experimental se encontraron representados en la variación espacial de la cuenca (figura 2.12 a y b). En el ordenamiento de los 39 sitios, la concentración de los nutrientes en el suelo mostró tres grupos ubicados en los cuadrantes II, III y IV, y en los cuales se encuentran distribuidos los 11 sitios de muestreo del presente estudio (figura 2.12a). Asimismo, para la concentración de los nutrientes en el mantillo se observó la formación de cuatro grupos (figura 2.12b), en los cuales se incluyen los 11 sitios del diseño experimental.

2.7. DISCUSIÓN

2.7.1. VARIABILIDAD TEMPORAL DEL CARBON TOTAL, NITRÓGENO TOTAL Y FÓSFORO TOTAL EN EL SUELO Y MANTILLO.

En el presente estudio, la variación anual en la cantidad y la distribución de la precipitación afectó el patrón temporal de los nutrientes en el suelo. Sin embargo, la ausencia de una relación positiva de los pulsos de disponibilidad de nutrientes y la distribución de la precipitación en este ecosistema tropical estacional es el resultado de la variación espacial de los factores que influyen en la disponibilidad de nutrientes, tales como la disponibilidad de agua en el suelo, la textura, la estructura del suelo y el almacén de la MOS; los cuales afectaron la importancia relativa de los pulsos estacionales reportados para este ecosistema. Risser (1987) señala que una de las características reconocidas en ecología del paisaje es que no todos los procesos del paisaje ocurren simultáneamente en el tiempo. Un fenómeno similar ha sido reportado por Ryel et al. (1996) quienes señalan que el patrón espacial del Nt y la humedad del suelo fue diferente en distintos períodos de muestreo. Lo que les sugirió que la disponibilidad de recursos no mantiene el mismo patrón espacial en el tiempo, sino que depende de factores como la captura de nutrientes por parte de las plantas que se ajustan a diferentes escalas de patrones de recursos durante las distintas estaciones.

Sin embargo, en la época húmeda de 1997 sí se observó un acoplamiento entre las concentraciones de Ct y Nt del suelo. Esta relación entre el Ct, el Nt y la precipitación ha sido sugerida por Burke et al. (1989) como una característica de interdependencias que sugieren condiciones cercanas a un estado estable. Es decir, la cantidad de Ct está determinada en parte por la cantidad total de precipitación que recibe en el año; además,

la cantidad de Ct almacenado en el suelo determina la cantidad de Nt que puede ser retenido. Debido a lo anterior, se ha sugerido que en ausencia de disturbios ambos elementos están en equilibrio con la disponibilidad de agua (Burke et al. 1989, Reiners 1986). Lodge et al. (1994) y Roy y Singh (1995) han reportado que en la época húmeda la captura de nutrientes por parte de los microorganismos y las plantas, así como la lixiviación reducen la concentración de nutrientes en el suelo. Por el contrario, el incremento en la concentración de nutrientes al final de lluvias se explica por la inmovilización microbiana, la disminución en la captura de nutrientes por las plantas, así como por la entrada de nutrientes al suelo por la descomposición de la MOS (Birch 1960, Franzluebbers et al. 1994, Kief et al. 1987, Roy y Singh 1995, Singh et al. 1989, Singh et al. 1991, Sørensen 1974).

En 1998 no se presentó un acoplamiento entre la concentración de Ct y Nt, sugiriendo que la distribución de la precipitación en el año pudo influir en el ciclaje de estos nutrientes debido a la presencia de eventos de lluvia extremos. La distribución de las lluvias pudo permitir que la concentración de Ct, Cmic y Nmic al interior de la época húmeda fuera mayor que en la época seca, porque en la época seca las poblaciones microbianas redujeron su crecimiento poblacional ante la limitante de agua presentada en el año 1997, de tal forma que al inicio de la época húmeda de 1998 aquellas poblaciones que lograron sobrevivir aumentaron su tamaño poblacional con una subsecuente captura de nutrientes (Bottner 1988, Sparling et al. 1987, Van Gestel et al. 1991). Este comportamiento estaría apoyando la hipótesis propuesta por Lodge et al. (1994) quien considera que bajo condiciones ambientales constantes, el tamaño del almacén de nutrientes en el suelo se mantiene, debido principalmente a la capacidad de la biomasa microbiana para amortiguar pequeñas variaciones ambientales y así evitar que se presenten pulsos de mineralización de nutrientes

Las variaciones estacionales de la concentración de Nt en el suelo dentro de la época húmeda puede ser el resultado de la pérdida de Nt por desnitrificación y lixiviación o por la captura por las plantas (Groffman et al. 1993, Turner et al. 1997) En concordancia con lo anterior, se observó el patrón temporal de la concentración de NH_4^+ y NO_3^- definido por el cambio estacional entre el final de la época seca de menor concentración y el inicio de la época húmeda de mayor concentración. Este comportamiento ha sido explicado por Davidson et al. (1993) y Singh et al. (1989) como el resultado de la liberación de formas disponibles capturadas en las arcillas del suelo y

la biomasa microbiana, así como por la incorporación de nutrientes provenientes del proceso de descomposición del mantillo.

Los pulsos de nutrientes en el mantillo reflejados en el año 1997 sugieren fases de acumulación y liberación de nutrientes. Cornejo et al. (1994) trabajando en bosques secos estacionales, sugieren que el pulso de mayor concentración de nutrientes en el mantillo al inicio de la época de lluvias se debe a la descomposición del material acumulado en la época seca. Consideran que este incremento en la concentración de nutrientes al inicio de lluvias es explicado por el reciclaje de nutrientes mediado por hongos presentes en el mantillo durante el primer estado de descomposición. Aber y Melillo (1979) y Staff y Berg (1982) han encontrado que en la descomposición del mantillo se distinguen dos fases distintas. Una fase de acumulación de nutrientes, donde la duración y la magnitud dependen del sustrato. Esta fase de acumulación al inicio del proceso de descomposición puede sugerir que existe limitación de nutrientes para los organismos descomponedores (Laskowski et al. 1995). La segunda fase está dominada por la liberación, surge cuando los nutrientes exceden las necesidades de los descomponedores o bien cuando el material es deficiente en energía, predominando la mineralización sobre la inmovilización (Bosatta y Berendse 1984).

Para 1998 la pérdida de masa de mantillo coincide con los resultados de Martínez-Yrizar y Sarukhán (1990) y Patiño (1990). Sin embargo, la masa observada en marzo 1999 pone en evidencia que la precipitación presentada en el año 1998 pudo haber prolongado la disponibilidad de agua para las plantas, evitando que la caída de sus hojas se presentará en el mes de noviembre en el cual históricamente existe la mayor producción de hojarasca. Esta extensión en el periodo de agua disponible para las plantas significaría ampliar la estación húmeda, de tal forma que el mes de marzo correspondería al inicio de la época seca y aún no ha ocurrido la entrada principal de la hojarasca.

La concentración y el contenido de nutrientes en el mantillo en el año 1998 siguió un comportamiento acoplado a la pérdida de masa como resultado de la descomposición y la humificación del material. El incremento en la concentración y el contenido de nutrientes en el mantillo al inicio de la época húmeda ha sido sugerida como una fase inicial de inmovilización microbiana, asociada a una limitante de nutrientes para las poblaciones microbianas (Bosatta y Berendse 1984, Laskowski et al. 1995). La reducción en la concentración y el contenido de nutrientes en marzo, puede estar evidenciando el

proceso de lixiviación al cual ha estado sujeto el material debido a la intensidad de las lluvias presentes en el año, representando una fase de liberación neta con la reducción de nutrientes en el material vegetal, así como la reducción en la masa del mantillo (Staaf y Berg 1982, Swift et al. 1979).

2.7.2. HETEROGENEIDAD ESPACIAL DEL CARBONO TOTAL, NITRÓGENO TOTAL Y FÓSFORO TOTAL EN EL SUELO Y MANTILLO.

SUELO

La distribución de nutrientes en el paisaje fue espacialmente heterogénea y estructurada jerárquicamente en tres escalas distintas: a) piso altitudinal, b) orientación de laderas y c) posición el interior de la ladera.

a) En la escala de piso altitudinal se observó 1.3 veces mayor concentración de Ct, Nt y Pt en el piso alto con relación al piso bajo. Estos resultados concuerdan con los resultados de Solís (1993), quien encontró una mayor concentración de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , y PO_4^{3-} y Nt en el piso bajo del mismo sitio de estudio. Este patrón espacial de la dinámica de nutrientes puede explicarse por un conjunto de condiciones que se presentan en el piso bajo, las cuales son reconocidas como variables importantes que influyen en la dinámica de los nutrientes en el suelo. Galicia (1992), Martínez-Yrizar et al. (1996) y Patiño (1990) sugieren que en el piso bajo existe un mayor almacén de MOS (261 kg ha^{-1}), mayor porcentaje de humedad en el suelo (12%), mayor tasa de descomposición (0.52) y mayor productividad ($10,359 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), estas condiciones facilitan el flujo de nutrientes al suelo. Por el contrario, para el piso alto estos mismo autores mostraron que existe un menor almacén de MOS (233 kg ha^{-1}), menor porcentaje de humedad en el suelo (10%), menor tasa de descomposición (0.42) y menor productividad ($9,263 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Como resultado de ello este piso está sujeto a condiciones que generan un menor flujo de nutrientes al suelo.

b) Escala de orientación de laderas. El efecto de la orientación de laderas fue importante para explicar el patrón espacial presentado en el piso medio y el piso bajo de la cuenca. La concentración de nutrientes del suelo en la ladera orientada al norte fue 1.3 veces mayor con respecto a la ladera orientada al sur, coincidiendo con los resultados obtenidos por Solís (1993). Este autor reporta una mayor concentración de Ca^{2+} y PO_4^{3-} en el ladera orientada al norte y menor en la ladera orientada al sur. Los datos reportados a esta escala por Galicia (1992) y Solís (1993) señalan que las laderas orientadas al sur presenta un menor contenido de MOS (74 kg ha^{-1}) y menor porcentaje de agua en el suelo (14%) que en las laderas orientadas al norte, 82 kg ha^{-1} y 18% para

la MOS y el porcentaje de agua en el suelo respectivamente. Estas variables son importantes para explicar la diferencia en la concentración de nutrientes. Brunet y Astin (1997) y Silver et al. (1994) han reportado una correlación significativa entre el contenido de MOS y la concentración de Ct, Nt y Pt en el suelo. Por otra parte, la reducción de la humedad del suelo en la ladera orientada al sur genera restricciones para la actividad microbiana y el ciclaje de nutrientes, reduciendo la incorporación de nutrientes al suelo.

c) Escala de posición en la ladera. En esta escala las superficies cumbrales presentaron 1.5 veces menor concentración de nutrientes en el suelo con relación a los dorsos y pies de ladera. Este patrón es consistente con los trabajos de Malo et al. (1974), Barnes y Harrison (1982), Schimel et al. (1985), Burke et al. (1995). Estos autores reportan el incremento de la concentración de Ct, Nt y Pt en los dorsos y pies de ladera con respecto a las superficies cumbrales, debido al flujo de agua pendiente abajo que genera la redistribución de nutrientes en solución, principalmente de partículas finas y materiales orgánicos. El patrón espacial del contenido de nutrientes en el mantillo siguió este mismo patrón. El menor contenido de nutrientes en el mantillo se registró en las superficies cumbrales en relación a los pies de ladera. Este almacén de nutrientes vía descomposición pudo también influir que la concentración de nutrientes fuera mayor en las partes bajas de la ladera.

Es importante señalar que si bien los sitios que explicaron las variaciones en la distribución de los nutrientes en el paisaje fueron distintos cuando se utilizaron 7 sitios (año 1997) y cuando se utilizaron 11 sitios (año 1998), los factores que los modificaron siguen la estructura jerárquica del relieve de la cuenca. En el caso de los 7 sitios (año 1997) se observaron dos escalas, orientación de laderas y posición al interior de las laderas. Cuando se consideraron los 11 sitios (año 1998) la escala de piso altitudinal fue añadida a la estructura jerárquica en la distribución de los nutrientes en el suelo.

La concentración de las formas biológicamente activas de C y N, así como las formas disponibles de nitrógeno (NH_4^+ y NO_3^-) presentaron un patrón espacialmente heterogéneo estructurado jerárquicamente en dos escalas distintas. a) posición al interior de la ladera y b) orientación de laderas.

a) La distribución espacial de la concentración de Cmic y NH_4^+ fue 1.2 veces mayor en los pies de ladera con respecto a las superficies cumbrales. Este comportamiento puede deberse al transporte de sedimentos y materia orgánica hacia las partes bajas de la ladera (Sharpley 1980, Gregorich y Anderson 1985, Palis et al. 1990, Wan y El-Swaify

1997) debido a que la acumulación de MOS y las partículas finas promueven la inmovilización microbiana en las posiciones bajas de la ladera (Reiners 1983, Roberts et al. 1989, Tate 1992, Burke et al. 1995). Burke et al. (1995) han reportado que la tasa de mineralización de N se incrementa cuando aumenta la humedad del suelo y el contenido de MOS, lo cual podría explicar la mayor concentración de NH_4^+ en las partes bajas de la ladera, como parece ocurrir en el presente estudio.

b) La concentración de NO_3^- fue 1.3 mayor en las laderas orientadas al norte, coincidiendo con las formas totales de los nutrientes. La mayor disponibilidad de agua en la ladera orientada al norte (Galicia et al. 1999) favorece la actividad microbiana (Williams y Gray 1974, Parkin 1993), esta variación asociada a la orientación coincide con los datos reportados por Maxwell y Coleman (1995) quienes encontraron mayor biomasa microbiana en laderas orientadas al norte en relación a las laderas orientadas al sur explicado por una mayor disponibilidad de agua

MANTILLO

La distribución espacial de la masa de mantillo presentó un comportamiento general relacionado con la orientación de laderas. Los sitios orientados al norte presentaron una mayor masa de mantillo siendo 1.6 veces mayor con relación a los sitios orientados al sur. Este resultado también ha sido reportado por Patiño (1990). Este autor reporta que existe una mayor biomasa de mantillo en la ladera orientada al norte ($8,687 \text{ kg ha}^{-1}$) con respecto a la ladera orientada al sur ($6,597 \text{ kg ha}^{-1}$) como resultado de la diferente tasa de descomposición. Se ha reportado que la ladera orientada al norte presenta una menor tasa de descomposición ($k= 0.28 - 0.40$) en relación a la ladera orientada al sur ($k=0.49 - 0.52$, Patiño 1990).

Las concentraciones de Ct, Nt y Pt en el mantillo no presentaron un patrón espacial definido. La ausencia de un patrón espacial sugiere que una variable adicional como la composición de especies puede influir en la contribución de la hojarasca al mantillo, determinando así su composición, calidad y producción. Burghouts et al. (1998) señalan que la variación en la arquitectura del dosel y la diferencia en la composición de especies promueven la variación en la cantidad de aporte de hojarasca y la descomposición del mantillo, lo cual genera un mosaico espacial de nutrientes en el mantillo, por lo que estos elementos en el mantillo presentan una alta variabilidad.

La distribución espacial de los contenidos de Ct, Nt y Pt del mantillo en el paisaje se relaciona espacialmente con la posición al interior de la ladera. El contenido de Ct, Nt

y Pt mostró a los sitios ubicados en pie de ladera con 1.7 veces mayor contenido Ct, 1.6 veces más Nt y 1.5 veces más Pt con relación a los sitios en superficie cumbral. Este patrón puede explicarse por la dinámica del movimiento de materiales a lo largo de la pendiente. La parte baja de la ladera recibe material proveniente de ladera arriba, lo cual no sólo incrementa la masa del mantillo, sino también modifica la calidad del material. Por el contrario en las superficies cumbrales el material puede ser removido por la acción del viento y el agua reduciendo así el almacén del mantillo.

2.8. CONCLUSIONES

La variación entre años de la cantidad y la distribución de la precipitación afectó la dinámica estacional de los nutrientes. El año 1997 con una precipitación cercana al promedio presentó un acoplamiento entre la concentración de Ct y Nt en el suelo, lo cual no se observó en el año de 1998. Sugiriendo que la cantidad y la distribución de la precipitación en 1998 pudo haber afectado la dinámica de los ciclos del C y N temporalmente.

La dinámica espacial mostró una estructura jerárquica para la concentración de nutrientes en el suelo, donde si bien la importancia de los sitios fue distinta entre años los factores que la influyeron siguieron la misma tendencia. La distribución de nutrientes del suelo fue espacialmente heterogénea y estructurada jerárquicamente en tres escalas distintas: a) piso altitudinal, las variables que influyeron en esta escala fueron el tamaño del almacén de MOS, el contenido de humedad en el suelo, la tasa de descomposición y la productividad b) orientación de laderas, a esta escala las variables importantes fueron el porcentaje de agua en el suelo el cual modificó los tamaño del almacén de MOS y la tasa de descomposición. c) posición el interior de la ladera, los procesos que influyeron en este nivel fueron la redistribución de nutrientes en solución así como de partículas finas y materiales orgánicos de la superficie cumbral hacia el dorso y pie de ladera. Siendo importante también el transporte del mantillo de la parte alta de la ladera hacia la parte baja modificando la cantidad y la calidad del material.

Para un mejor conocimiento del patrón espacial del mantillo es necesario integrar en el estudio espacial variables como la composición de especies, ya que éstas influyen en la contribución de la hojarasca al mantillo determinando su composición, calidad y producción.

2.9. LITERATURA CITADA

- Aber, J. D. y J. M. Melillo. 1979. Litter decomposition: measuring relative contributions of organic matter and nitrogen to forest soils. *Canadian Journal of Botany* **58**:416-421.
- Band, L. E. 1989. A terrain-based watershed information system. *Hydrological Process* **3**:151-162.
- Barnes, P. y A. T. Harrison. 1982. Species, distribution and community organization in a Nebraska Sandhills mixed prairie as influenced by plant-soil-water relations. *Oecologia* **52**:192-202.
- Birch, H. F. 1960. Nitrification of soils after different periods of dryness. *Plant and Soil* **12**:81-96.
- Bosatta, E. y F. Berendse. 1984. Energy or nutrient regulation of decomposition: implications for the mineralization - immobilization response to perturbations. *Soil Biology and Biochemistry* **16**:63-67.
- Bottner, P. 1988. Response of microbial biomass to alternate moist and dry conditions in a soil incubated with ¹⁴C- and ¹⁵N-labelled plant material. *Soil Biology and Biochemistry* **17**:329-337.
- Brookes, P.C., A. Landman, G. Pruden y D. S. Jenkinson. 1985. Chloroform fumigation and release of soil N: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass N in soil. *Soil Biology and Biochemistry* **17**:837-942.
- Brunet, R. C. y K. B. Astin. 1997. Spatio-temporal variations in sediment nutrients levels: the River Adour. *Landscape Ecology* **12**:171-184.
- Bullock, S. H. 1986. Climate of Chamela, Jalisco, and trends in the south coastal region of Mexico. *Arch. Met. Geoph. Biol.* **36**:297-316.
- Bullock, S. H. y A. Solís-Magallanes. 1990. Phenology and canopy trees of a tropical deciduous forest in Mexico. *Biotropica* **21**:22-35.
- Burghouts, T. B. A., N. M. Van Straalen y L. A. Bruijnzeel. 1998. Spatial heterogeneity of element and litter turnover in a Bornean rain forest. *Journal of Tropical Ecology* **14**:477-506.
- Burke, I. C., C. M. Yonker, W. J. Parton, C. V. Cole, K. Flach y D. S. Schimel. 1989. Texture, climate, and cultivation effects on soil organic matter content in U. S. grassland soils. *Soil Science Society of American Journal* **53**:800-805.

- Burke, I. C., E. T. Elliot y C. V. Cole. 1995. Influence of microclimate, landscape position and management on soil organic matter in agroecosystems. *Ecological Applications* **5**:124-131.
- Córdova, C. 1988. Geomorfología en escala pequeña del occidente de la República Mexicana Tesis Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- Cornejo, F. H., A. Varela, y S. J. Wright. 1994. Tropical litter decomposition under seasonal drought: nutrient release, fungi and bacteria. *Oikos* **70**:183-190.
- Davidson E. A. 1995. Spatial covariation of soil organic carbon, clay content, and drainage class at a regional scale. *Landscape Ecology* **6**:349-362.
- Davidson, E. A., P. A. Matson, P. M. Vitousek, R. Riley, G. García-Méndez y J.M. Maass. 1993. Process regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology* **74**:130-139.
- Ezcurra, E. 1990. Program ORDEN. Centro de Ecología, UNAM. México.
- Forman R. T. T. 1995. Land mosaics. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain
- Franzluebbers, K., R. W. Weaver, A. S. R. Juo y A. J. Franzluebbers. 1994. Carbon and nitrogen mineralization from cowpea plants part decomposing in moist and in repeatedly dried and wetted soil. *Soil Biology and Biochemistry* **10**:1379-1387.
- Galicia, L. 1992. Influencia de la variabilidad de la forma de la pendiente en las propiedades físicas de los suelos y su capacidad de retención de agua, en una cuenca tropical estacional. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- Galicia, L., F. García-Oliva y J. López-Blanco. 1995. Efecto de la estructura jerárquica del relieve en la distribución de las características físicas de los suelos en una cuenca tropical estacional mexicana. *Boletín de Investigaciones Geográficas* **3**:53-75.
- Galicia, L., J. López-Blanco, A. E. Zarco-Arista, V. Filips y F. García-Oliva. 1999. The relationships between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico. *Catena* **36**:153-164.
- Gregorich, E. G. y D. W. Anderson. 1985. Effects of cultivation and erosion on soil of four toposequences in the Canadian prairies. *Geoderma* **36**:343-354.
- Groffman, P. M., C. W. Rice, y J. M. Tiedje. 1993. Denitrification in a tallgrass prairie landscape. *Ecology* **74**:855-862.

- INEGI. 1985. México: Información sobre aspectos geográficos, sociales y económicos Vol. I. Secretaría de Programación y Presupuesto México.
- Jenkinson, D. S. 1987. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. Páginas 368-386 *en* J. R. editor. *Advances in N cycling in agricultural ecosystem*. CBAT National, U.K.
- Kendall, M. 1980. *Multivariate Analysis*. Charles Griffin and Company. Londres.
- Kieft, L., Soroker, E. y Firestone, M. K. 1987. Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted. *Soil Biology and Biochemistry* **8**:119-126.
- Kolasa, J. y C. D. Rollo. 1991. Introduction: the heterogeneity of heterogeneity: A Glossary. Páginas 1-23 *en* Kolasa, J y S. T. A Pickett, editores. *Ecological heterogeneity*. Springer, New York.
- Laskowsky, R., M. Niklinska, y M. Maryansky. 1995. The dynamics of chemical elements in forest litter. *Ecology* **76**:1393-1406.
- Lodge, D. J., W. H. Mc Dowell y C. P. Mc Swiney. 1994. The importance of nutrient pulse in tropical forest. *TREE* **9**:384-387.
- López-Blanco, J., L. Galicia-Sarmiento y F. García-Oliva. 1996. Aplicación de un SIG para la caracterización morfológica y la delimitación de unidades de ladera de una cuenca tropical estacional en Chamela, Jalisco, México. *Boletín de Investigaciones Geográficas* **4**:39-61.
- López-Blanco, J., L. Galicia y F. García-Oliva. 1999. Hierarchical slope configuration of small watershed in a Tropical Deciduous Forest in Mexico. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria* **22**:33-40.
- Lott, E., H. S. Bullock y A. Solís-Magallanes. 1987. Floristic diversity and structure of upland and arroyo forests of Coastal Jalisco. *Biotropica* **19**:226-235
- Malo, D. D., B. K. Worchester, D. K. Cassel y K. D. Matzdorf. 1974. Soil-landscape relationships in a closed drainage system. *Soil Science Society of America Proceedings* **38**: 813-818.
- Martínez-Yrizar, A. y J. Sarukhán. 1990. Litterfall patterns in a tropical deciduous forest in Mexico over a five-year period. *Journal of Tropical Ecology* **6**:433-444.
- Martínez-Yrizar, A., J. M. Maass, L. A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. 1996. Net primary productivity of a tropical deciduous forest ecosystem in Western Mexico. *Journal of Tropical Ecology* **12**:169-175.

- Maxwell, R. A. y Coleman, D. C. 1995. Seasonal dynamics of nematode and microbial biomass in soils of riparian-zone forest of the southern Appalachians. *Soil Biology and Biochemistry* 27:79-84.
- McGill, W. B. y C. T. Figueiredo. 1993. Total Nitrogen. *En* Carter, M. R. editor. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Murphy, P. G. y Lugo, A. E. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review the Ecology and Systematics* 17:67-88
- Palis, R. G., Okwach, G., Rose, C. W. y Saffigna, P. G. 1990. Soil erosion processes and nutrient loss. II. The effect of surface contact cover and erosion processes on enrichment ratio and nitrogen loss in eroded sediment. *Australian Journal of Soil Research* 28:641-658.
- Pastor, J. y W. M. Post. 1986. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry* 2:3-27.
- Parkin, T. B. 1993. Spatial variability of microbial processes in soil a review. *Journal of Environmental Quality* 22:409-417.
- Patiño, A. M. C. 1990. Variación espacial y temporal de la capa de hojarasca (mantillo) en una selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. México. Tesis de Licenciatura Facultad de Ciencias. UNAM.
- Pickett, S. T. A. y Cadenasso, M. L. 1995. Landscape Ecology. Spatial heterogeneity in Ecological Systems. *Science* 269:331-334
- Reiners, W. A. 1983. Transport processes in the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, phosphorous, and sulfur. Páginas 143-176 *en* B. Bolin y R. B. Cook, editores *The major biogeochemical cycles and their interactions*. Scope 21. John Wiley and Sons, Nueva York, E.U.A.
- Risser, P. G. 1987. Landscape ecology: State of the art. Páginas 3-14 *en* M. G. Turner, editor *Landscape Heterogeneity and Disturbance*. Springer-Verlag, Nueva York, E. U. A.
- Roberts, T. L., J. R. Bettany y W. B. Stewart. 1989. A hierarchical approach to the study of organic C, N, P, and S in western Canadian soils. *Canadian Journal of Soil Science* 69:739-749.
- Roy, S. y J. S. Singh. 1994. Consequences of habitat heterogeneity for availability of nutrients in a dry tropical forest. *Journal of Ecology* 82:503-509.

- Roy, S. y J. S. Singh. 1995. Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forest habitat. *Soil Biology and Biochemistry* **27**:33-40.
- Ryel, R. J., M. M. Cladwell y J. H. Manwaring. 1996. Temporal dynamics of soil spatial heterogeneity in sagebrush-wheatgrass steppe during a growing season. *Plant and Soil* **184**:299-309.
- Schimel, D. S., M. A. Stillwell y R. G. Woodmansee. 1985. Biogeochemistry of C, N, and P in a soil catena of the shortgrass steppe. *Ecology* **66**:276-282.
- Schimel, D. S., Kittel, T. G. F. y Parton, W. J. 1991. Terrestrial biogeochemical cycles: global interactions with the atmosphere and hydrology. *Tellus* **43**:188-203.
- Sharpiey, A. N. 1980. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments. *Journal of Environmental Quality* **9**:521-526
- Silver, W. L., F. N. Scatena, A. H. Johnson, T. G. Siccama y M. J. Sanchez. 1994. Nutrient availability in a montane wet tropical forest: spatial patterns and methodological considerations. *Plant and Soil* **164**:129-145
- Singh, J. S., A. S. Raghubanshi, R. S. Singh y S. C. Srivastava. 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature* **338**:499-500.
- Singh, R. S., A. S. Raghubanshi y J. S. Singh. 1991. Nitrogen-mineralization in dry tropical savanna: effects of burning and grazing. *Soil Biology and Biochemistry* **23**:269-273
- Solis, V. E. 1993. Características fisicoquímicas de un suelo en un ecosistema tropical estacional. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Sørensen, L. H. 1974. Rate of decomposition of organic matter in soil as influenced by repeated air drying-rewetting and repeated additions of organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* **6**:287-292.
- Sparling, G. P., Milne, J. D. G. y Vincent K. W. 1987. Effect of soil moisture regime on the microbial contribution to Olsen phosphorus values. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **30**:79-84.
- Staaf, H. y Berg, B. 1982. Release and accumulation of plant nutrients in needle litter during decomposition. Long-term decomposition of Scot pine needle litter. II. *Canadian Journal of Botany* **60**:1561-1568.

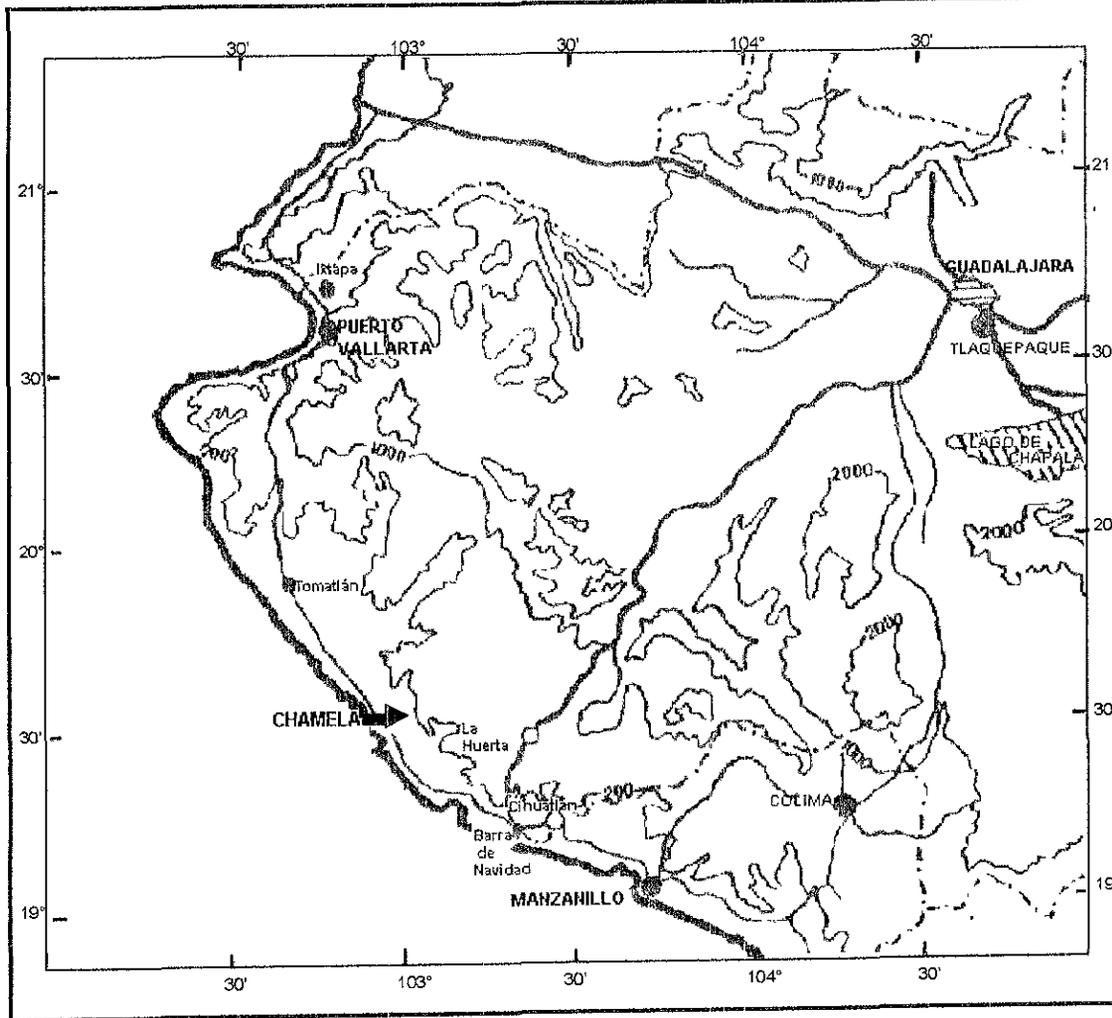
- Stone, J. R., J. W. Gilliam, D. K. Cassel, R. B. Daniels, L. A. Nelson y H. J. Kleis. 1985. Effect of soil erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. *Soil Science Society of American Journal* **49**:987-991
- Swift, M. J., O. W. Heal y J. M. Anderson. 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Blackwell Scientific. Oxford.
- Tate, R. L. III. 1992. *Soil organic matter: biological and ecological effects*. Krieger Publishing Company. Florida, E. U. A.
- Technicon Industrial System. 1977. Technicon Industrial method No 329-74W/B. Individual/simultaneous determinations of nitrogen and/ or phosphorus in BD acid digestion. Technicon Industrial System. New York.
- Thomas, R. L., R. W. Sheard y J. R. Moyer. 1967. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus and potassium analyses of plant tissue using a simple digestion. *Agronomical Journal* **59**:240-243.
- Turner, C. L., J. M. Blair, R. J. Scharz y J. C. Neel. 1997. Soil N and plant responses to fire, topography and supplemental N in tallgrass prairie. *Ecology* **76**:1832-1843.
- Turner, M. G. 1989. Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annual Review the Ecology and Systematics* **20**:171-197.
- UIC. 1995. Operation manual for the CM5012 CO₂ Coulometer. UIC. Joilet IL, E. U. A
- Urban, D. L., R. V. O'Neill y H. H. Shugart, Jr. 1987. Landscape Ecology. *BioScience* **37**:119-127.
- Vance, E. D., A. C. Brookes y D. S. Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* **19**:703-707.
- Van Gestel, M., J. N. Ladd y M. Amato. 1991. Carbon and nitrogen mineralization from two soils of contrasting texture and microaggregate stability: influence of sequential fumigation, drying and storage. *Soil Biology and Biochemistry* **4**:313-322.
- Voroney, R. P., van Veen, J. A. y Paul, E. A. 1981. Organic C dynamics in grassland soil. 2. Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion. *Canadian Journal of Soil Science* **61**:211-224.
- Wan, Y. y S. A. El-Swaify. 1997. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol. *Catena* **75**:251-265.

Tabla 2.1. Ubicación y características generales de los sitios de muestreo. Datos obtenidos a partir de Galicia et al. 1996.

SITIO	PISO	ORIENTACIÓN	POSICIÓN EN LADERA	UNIDAD DE LADERA
1	alto	sur	pie	homogénea plana
2	alto	norte	pie	homogénea plana
3	alto	norte	superficie cumbral	homogénea plana
4	medio	norte	superficie cumbral	heterogénea inclinada
5	medio	norte	dorso	heterogénea inclinada
6	medio	sur	pie	heterogénea inclinada
7	medio	sur	superficie cumbral	heterogénea inclinada
8	bajo	sur	pie	heterogénea inclinada
9	bajo	sur	superficie cumbral	heterogénea inclinada
10	bajo	norte	pie	homogénea inclinada
11	bajo	norte	superficie cumbral	homogénea inclinada

Tabla 2.2. Precipitación mensual (mm) en la Estación de Biología Chamela, Jalisco en los años 1997 y 1998.

MES	1997	1998
ENERO	5	0
FEBRERO	0	4
MARZO	12.5	0
ABRIL	10.5	0
MAYO	0	0
JUNIO	7.5	169
JULIO	149	64
AGOSTO	33.5	99
SEPTIEMBRE	156	777
OCTUBRE	177.5	148
NOVIEMBRE	71	0
DICIEMBRE	5	0
ANUAL	627.5	1,261



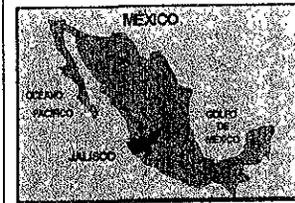
POBLADOS

- Menos de 2500 hab
- De 2500 a 10 000 hab.
- De 20 000 a 50 000 hab
- De 50 000 a 100 000 hab
- Capital del Estado

VÍAS DE COMUNICACIÓN

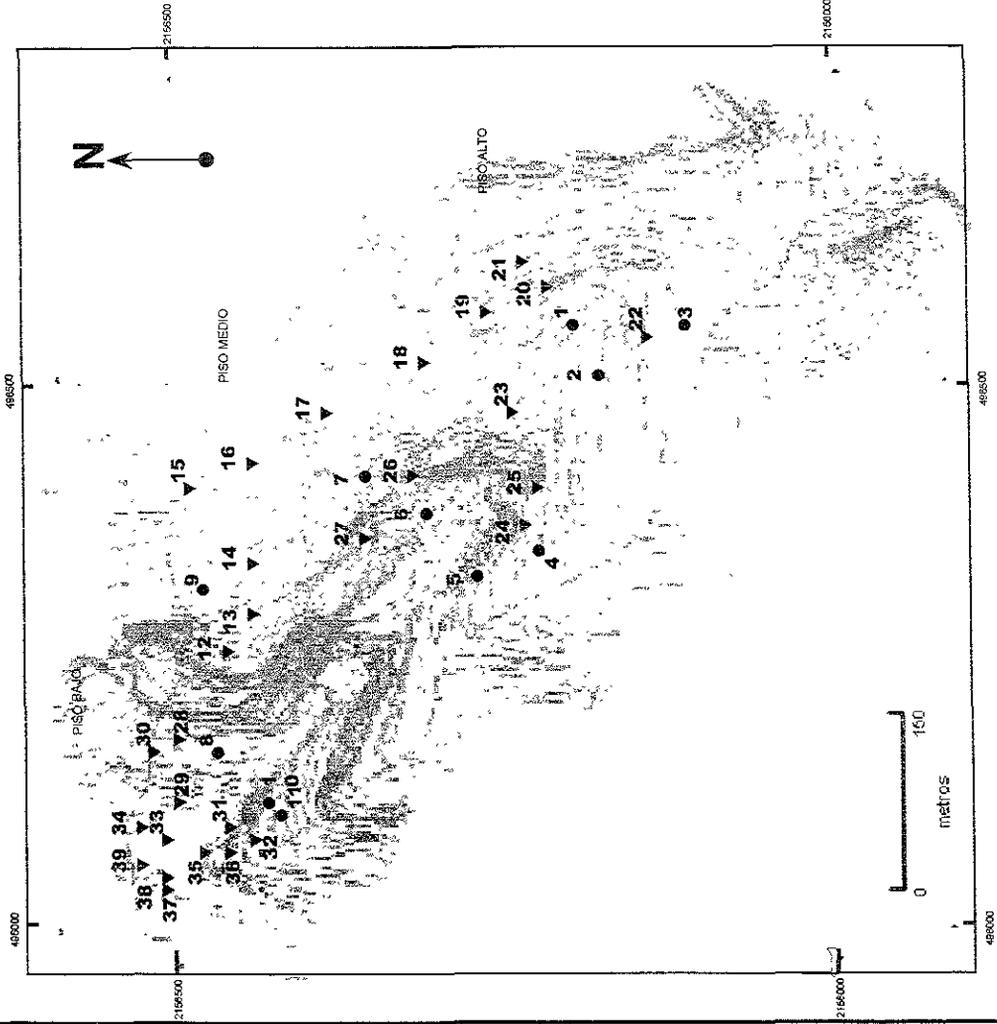
- Carretera pavimentada troncal
- Carretera pavimentada
- Curva de nivel
- Lago
- Límite estatal

KILÓMETROS



**CHAMELA, JALISCO
MÉXICO**

Figura 2.1



- Muestreo 1997 y 1998
- ▼ Muestreo marzo 1999
- Curva de nivel

Coordenadas UTM

Localización de los sitios de muestreo en la Cuenca 1.

ESTACIÓN DE BIOLOGÍA CHAMELA,
JALISCO, MÉXICO

Figura 2.2

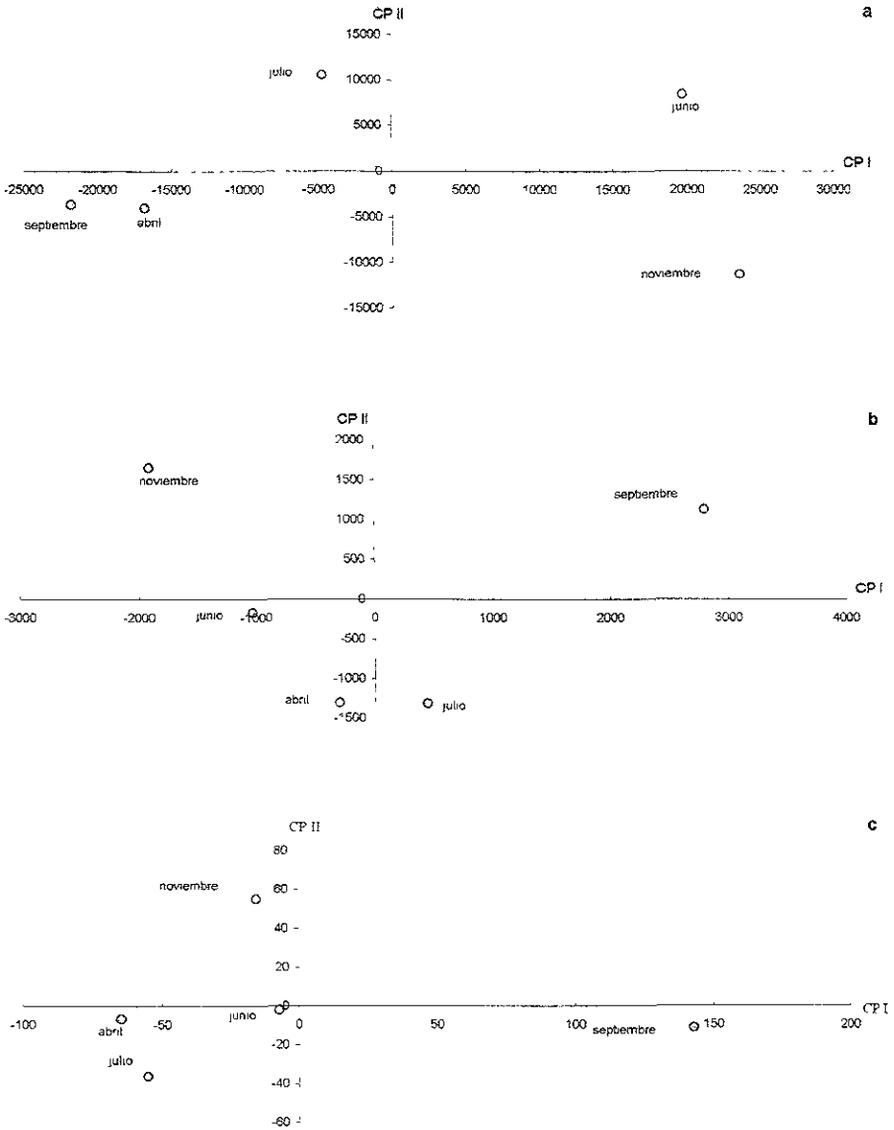


Figura 2.3 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales en el suelo en el año 1997 a) carbono total, varianza explicada CP I 76% y CP II 15%, b) nitrógeno total, varianza explicada CP I 61% y CP II 36%, c) fósforo total, varianza explicada CP I 80% y CP II 13%.

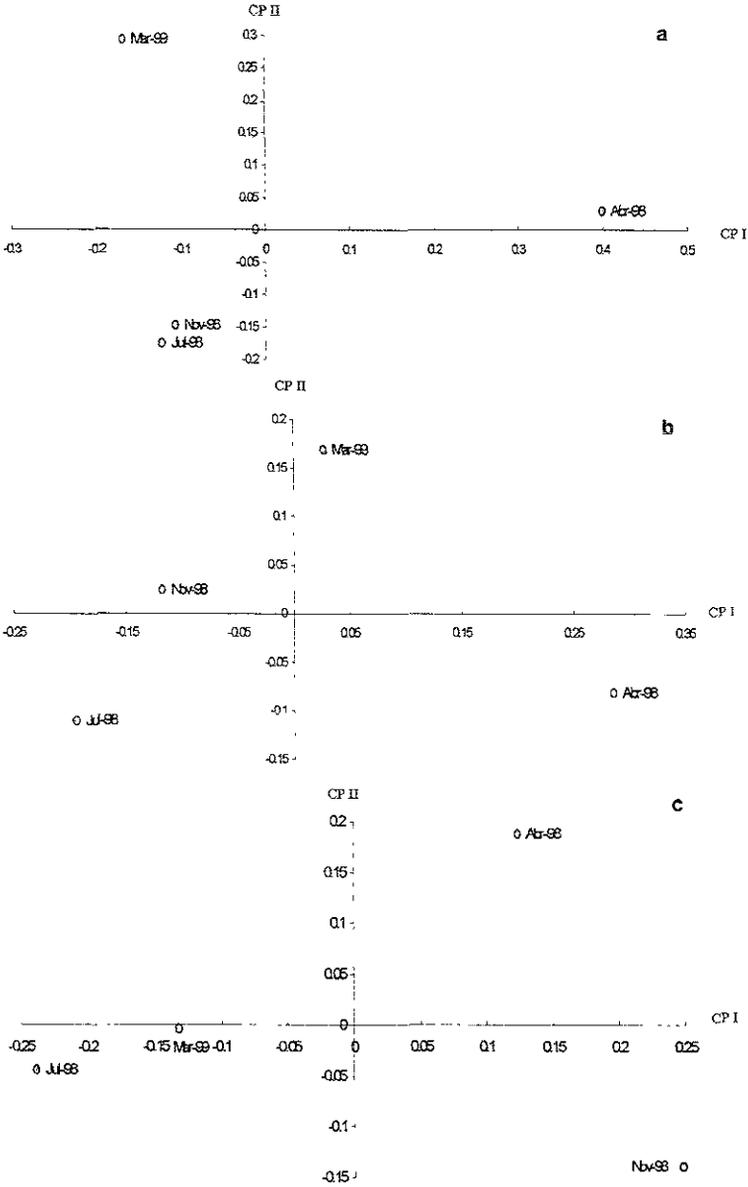


Figura 2.4 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del suelo de 1998-1999: a) carbono total, varianza explicada CP I 58% y CP II 38%, b) nitrógeno total, varianza explicada CP I 68% y CP II 24%, c) fósforo total, varianza explicada CP I 61% y CP II 23% .

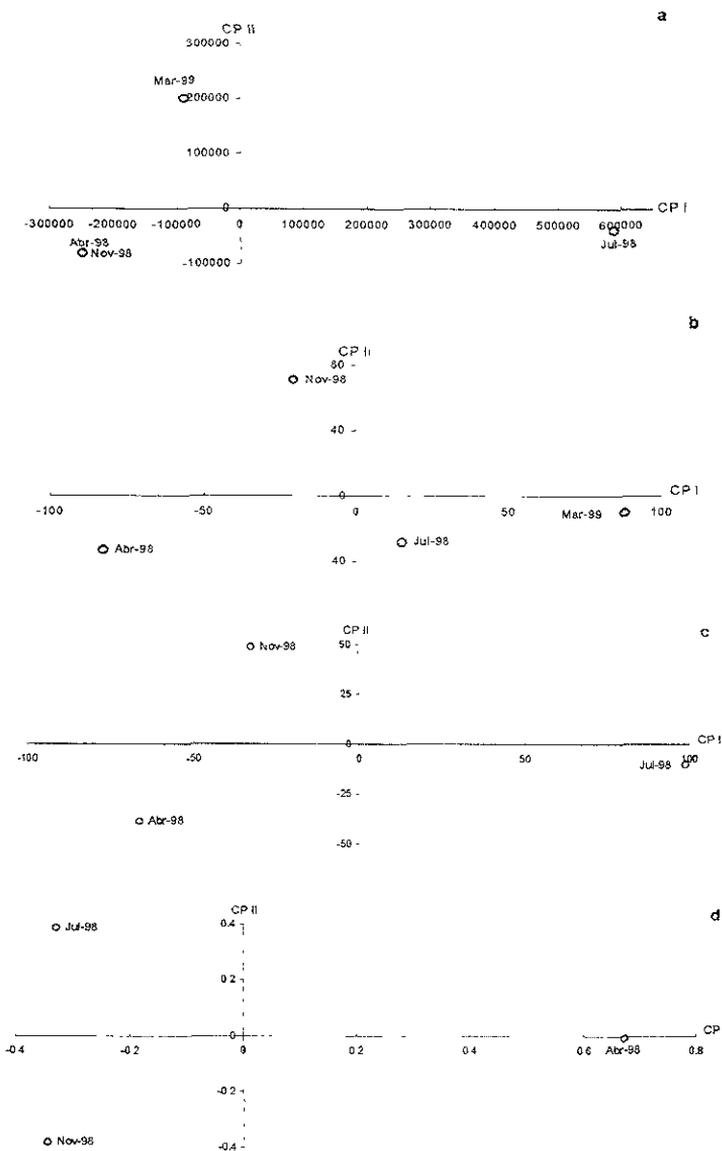


Figura 2.5 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de las formas microbianas y formas disponibles de nitrógeno en el suelo de 1998-1999. a) carbono microbiano, varianza explicada CP I 90% y CP II 10%, b) nitrógeno microbiano, varianza explicada CP I 65% y CP II 30%, c) concentración de amonio, varianza explicada CP I 79% y CP II 21%, d) concentración de nitrato, varianza explicada CP I 70% y CP II 30%

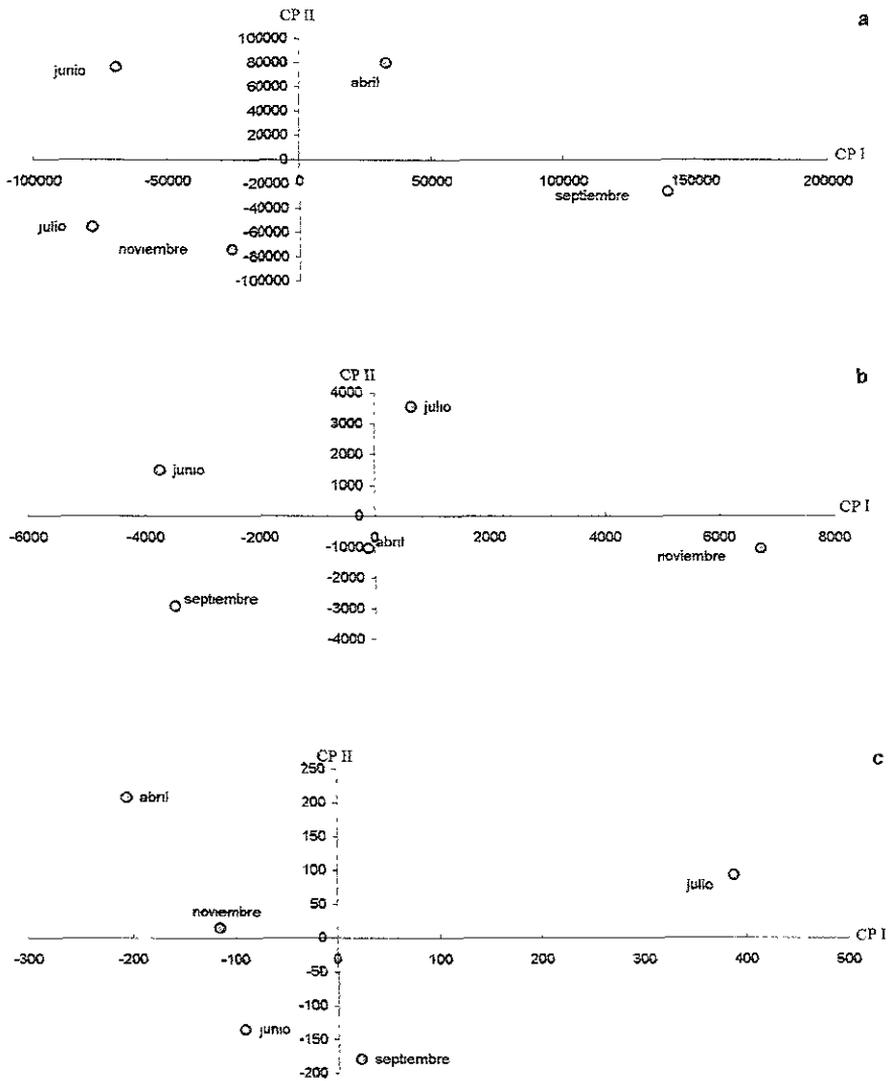


Figura 2.6 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del mantillo en el año 1997: a) carbono total, varianza explicada CP I 47% y CP II 32%, b) nitrógeno total, varianza explicada CP I 62% y CP II 22% y c) fósforo total, varianza explicada CP I 55% y CP II 26%

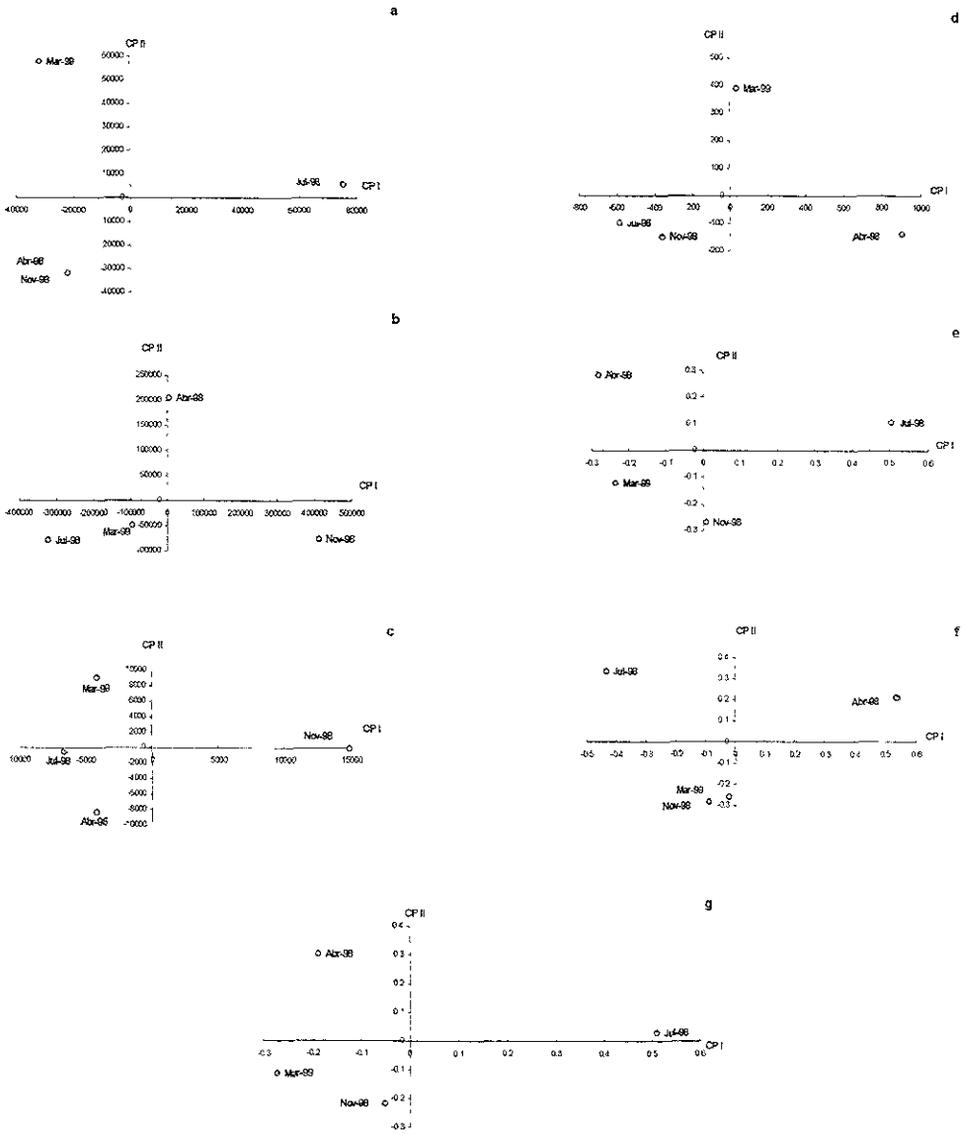


Figura 2.7 Ordenamiento temporal por análisis de componentes principales para la masa y los nutrientes totales en el mantillo de 1998-1999 a) masa de mantillo varianza explicada CP I 59% y CP II 41%, b) concentración de carbono, varianza explicada CP I 83% y CP II 16%, c) concentración de nitrógeno, varianza explicada CP I 60% y CP II 30%, d) concentración de fósforo, varianza explicada CP I 81% y CP II 13%, e) contenido de carbono, varianza explicada CP I 61% y CP II 28%, f) contenido de nitrógeno, varianza explicada CP I 60% y CP II 38% y g) contenido de fósforo, varianza explicada CP I 64% y CP II 26%.

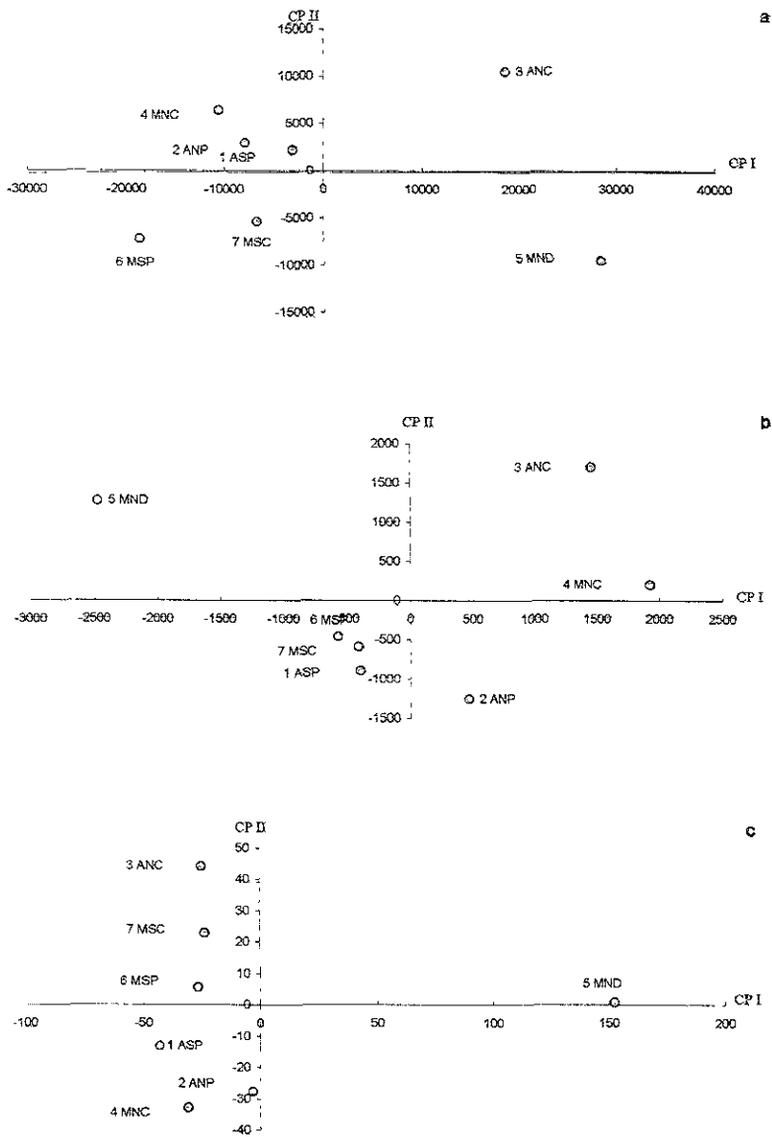


Figura 2.8 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales del suelo en el año 1997: a) carbono total, varianza explicada CP I 78% y CP II 15%, b) nitrógeno total, varianza explicada CP I 61% y CP II 36%, c) fósforo total, varianza explicada CP I 80% y CP II 13%. Las letras indican: A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-orientación al norte, S-orientación al sur, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera

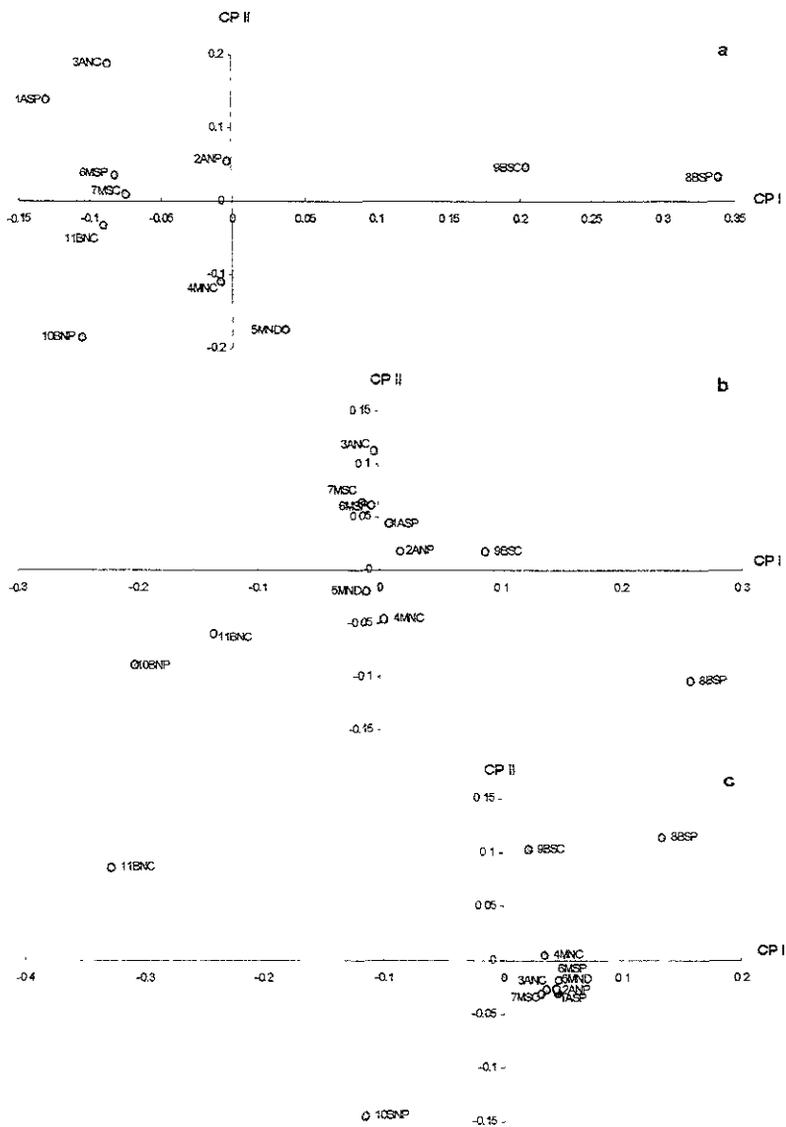


Figura 2.9 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la concentración de nutrientes totales en el suelo de 1998-1999: a) carbono total, varianza explicada CP I 58% y CP II 38%, b) nitrógeno total, varianza explicada CP I 68% y CP II 24%, c) fósforo total, varianza explicada CP I 61% y CP II 23%. Las letras indican: A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-orientación al norte, S-orientación al sur, C-superficie cumbral, D-dorso, P-pie de ladera.

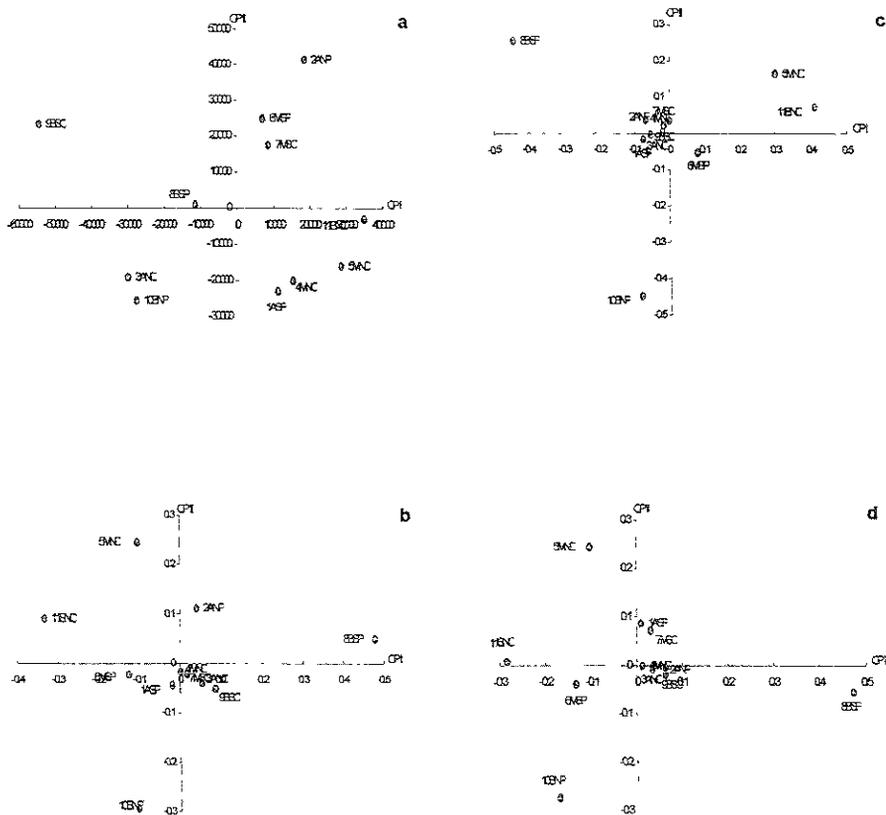


Figura 2.11 Ordenamiento espacial por análisis de componentes principales para la masa y el contenido de nutrientes totales en el mantillo de 1998-1999. a) masa, varianza explicada CP I 93% y CP II 5%, b) carbono total, varianza explicada CP I 57% y CP II 25%, c) nitrógeno total, varianza explicada CP I 53% y CP II 19%, d) fósforo total, varianza explicada CP I 83% y CP II 16% Las letras indican: A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-orientación al norte, S-orientación al sur, C-superficie cumbra, D-dorso, P-pie de ladera

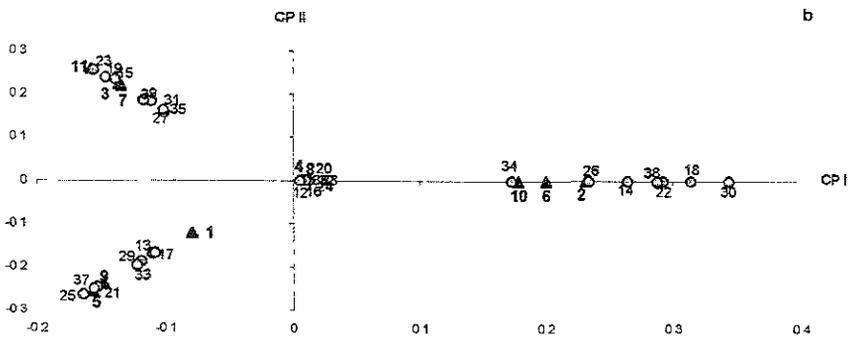
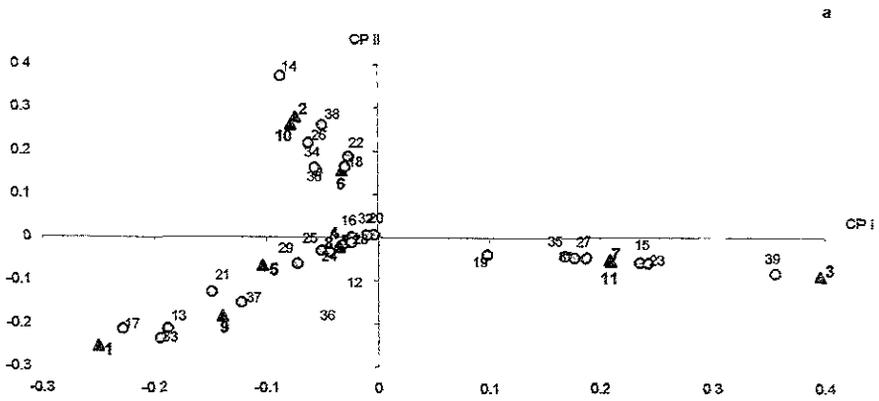


Figura 2.12. Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales con la red de 39 sitios, para la concentración de carbono, nitrógeno y fósforo total en: a) suelo, porcentaje de varianza explicada CP I 51% y CP II 49% y b) manto, porcentaje de varianza explicada CP I 93% y CP II 5%. La ubicación de los 11 sitios de muestreo del período 1998-1999 está marcada con el símbolo ▲ y con números oscuros.

CAPÍTULO III

DINÁMICA TEMPORAL Y ESPACIAL DEL EFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA EROSIÓN Y LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL

DINÁMICA TEMPORAL Y ESPACIAL DEL EFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA EROSIÓN Y LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES EN UN ECOSISTEMA TROPICAL ESTACIONAL

3.1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente, el proceso de erosión se ha considerado como el resultado de procesos mecánicos, influidos principalmente por el tamaño de la partícula, el ángulo de la pendiente y la red de drenaje (Morgan 1986). Sin embargo, la erosión de suelos no es el resultado aislado de las características topográficas, morfológicas y geométricas del relieve, sino que dependen también de su interacción con la cobertura vegetal del terreno, tanto a nivel del dosel como a nivel del suelo (Wischmeir y Smith 1978). Pimentel y Kounang (1998), reportan que en las áreas protegidas con cobertura vegetal las tasas de erosión se reducen ($0.001-2.0 \text{ ton}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) en relación a áreas sin cobertura vegetal ($400 \text{ ton}^{-1} \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Desde el punto de vista ecológico, la erosión de suelos reduce la fertilidad y la concentración de la materia orgánica del suelo, afectando la estabilidad de los ecosistemas. Por ejemplo, la pérdida de carbono orgánico reduce la energía para que se lleven a cabo los procesos de mineralización e inmovilización microbiana, la formación de agregados estables en agua y la porosidad del suelo. La pérdida de estas características estructurales, biológicas y biogeoquímicas del suelo modifican los mecanismos que controlan el funcionamiento de los ecosistemas, como la disponibilidad de nutrientes, la descomposición, las relaciones lluvia-escurrimiento y la disponibilidad de agua en el suelo (Lal 1986, Pimentel y Kounang 1998).

A pesar de que el efecto de la cobertura vegetal ha sido considerado en la reducción de pérdida de suelo, existen pocos estudios acerca de la evaluación de la pérdida de nutrientes por erosión en el contexto de paisaje. Para comprender el proceso de erosión y su efecto sobre la pérdida de nutrientes en el ecosistema, es necesario determinar los patrones de erosión, sus causas y sus efectos sobre la pérdida de nutrientes en el contexto de paisaje. La ecología del paisaje considera las causas y las consecuencias ecológicas de los patrones espaciales en el ambiente y examina la interacción entre los patrones espaciales y los procesos ecológicos que son causa y consecuencia de la heterogeneidad espacial; atendiendo tres aspectos del paisaje la estructura, el funcionamiento y el cambio (Turner 1998). Actualmente, el estudio de la

erosión considera la importancia de los factores que generan la heterogeneidad espacial a diferentes escalas; por ejemplo, el relieve y las características físicas del suelo, la cobertura vegetal y la dinámica del mantillo. Lo anterior permite explicar porqué los procesos hidrológicos, edáficos y biológicos no son homogéneos al interior de una cuenca (Band 1989, Imeson y Lavee 1999).

En el análisis de los procesos que controlan y favorecen la erosión el relieve de la cuenca hidrográfica es un elemento importante (Band 1989). Al interior de la cuenca las características de los suelos son las que reciben la mayor influencia del relieve y modifican características como la textura, la disponibilidad de agua, la cantidad de la materia orgánica del suelo (MOS) y los nutrientes del suelo (Roy y Singh 1994, Voroney et al. 1981). El desarrollo de modelos conceptuales de los procesos de erosión en el contexto de paisaje, incorporando la variabilidad espacial y temporal son claves en el entendimiento de dicho proceso.

3.1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue evaluar el papel de la cobertura del mantillo y su heterogeneidad espacio-temporal sobre el movimiento de suelo y la pérdida de carbono total (Ct), nitrógeno total (Nt) y fósforo total (Pt) en una cuenca hidrográfica de un ecosistema tropical estacional.

Los objetivos particulares fueron: a) evaluar el efecto de la cobertura del mantillo sobre los patrones espaciales y temporales del movimiento del suelo en una cuenca hidrográfica de un ecosistema tropical estacional y b) evaluar el efecto del mantillo sobre los patrones espaciales y temporales de la pérdida de Ct, Nt y Pt del suelo y mantillo en una cuenca hidrográfica de un ecosistema tropical estacional.

3.2. SITIO DE ESTUDIO

El sitio de estudio se ubica en la costa de Jalisco, México, en la Estación de Biología Chamela, localizada a 19° 30' latitud norte y 105° 05' longitud oeste.

El clima es tropical estacional, con una temperatura media anual de 24°C y una precipitación media anual de 700 mm. El 80% de la precipitación se concentra en los meses de verano (Bullock 1986). El tipo de vegetación dominante es la selva baja caducifolia (Lott et al. 1987). La producción de hojas para la mayor parte de las especies inicia en la temporada húmeda y empieza a tirar sus hojas en el mes de noviembre (Bullock y Solís-Magallanes 1990). Los suelos dominantes son someros, con textura migajón-arenosa y se clasifican como Entisoles (Solís 1993).

El estudio se realizó en la Cuenca #1, una de las cinco cuencas experimentales localizadas en la Estación de Biología Chamela. La Cuenca #1 tiene un perímetro de 2,090 m y una superficie de 16 ha. Se caracteriza por la presencia de dos fallas que la cruzan transversalmente al cauce principal y que han dado lugar a que la cuenca se encuentre dividida en tres pisos: alto, medio y bajo. La diferencia altitudinal entre la cabecera y el nivel de base es de 130 m (López-Blanco et al. 1999).

Dominan las pendientes con marcado ángulo de inclinación, el 58% de la cuenca presenta pendientes entre 16° y 30°. La ladera orientada al sur contiene el 18% y el 44% del área total para ángulos de inclinación < 8° y > 16° respectivamente. Por el contrario, la ladera que se encuentra orientada al norte abarca el 12% y el 25% del área total para ángulos de inclinación < 8° y > 16° respectivamente (Galicia 1992).

La estructura de la Cuenca #1 presenta un arreglo jerárquico espacial, desde el nivel cuenca hasta unidades de ladera, definidas en base a características morfológicas propias (López-Blanco et al. 1996). Los atributos del relieve en cada unidad de ladera generan procesos de erosión y de depositación particulares a cada unidad de ladera. Por su longitud y marcados rompimientos de pendiente en las unidades de ladera heterogéneas (piso medio de la cuenca y piso bajo orientado al sur), se generan procesos de erosión, transporte y depositación de manera alternada al interior de la unidad de ladera. Las unidades de ladera homogéneas inclinadas (piso bajo de la cuenca orientado al norte), tienen un marcado ángulo de inclinación y corta longitud de pendiente, estas características determinan que los flujos de agua sean rápidos. Por otra parte, las unidades de ladera homogéneas planas (piso alto de la cuenca) son unidades donde los procesos pedogenéticos son más importantes que los procesos morfogénicos (Galicia et al. 1995).

Los factores que explican la distribución espacial de la humedad en el suelo son las características topográficas, las características físicas de los suelos y la interceptación de la radiación solar al interior de la cuenca (Galicia et al. 1999). La humedad del suelo es mayor en el piso bajo con respecto al piso alto, tanto en la ladera orientada al norte (17% y 13% respectivamente) como en la ladera orientada al sur (15% y 12% respectivamente, Galicia et al. 1999).

El piso bajo presenta mayor área basal promedio (19.8 m² ha⁻¹) con respecto al piso alto y medio (12.7 y 17.3 m² ha⁻¹, respectivamente). Asimismo, se presenta mayor

número de especies de árboles y arbustos en el piso bajo (88 especies) en relación a los pisos alto y medio (57 y 78 sp respectivamente, Martínez-Yrizar et al. 1996).

3.3. DISEÑO DE MUESTREO

Para el presente trabajo se utilizaron los sitios establecidos por López-Blanco y García-Oliva (1998), consistiendo de 12 sitios de muestreo de 1 m² al interior de la Cuenca #1, con dos tratamientos: i) suelo con cobertura de mantillo (TCM) y ii) suelo expuesto sin cobertura de mantillo (TSM), es decir 24 en total (figura 3.1). Los criterios utilizados para definir la ubicación de cada sitio de muestreo consideraron la estructura jerárquica de la cuenca: pisos altitudinales, orientación y posición al interior de la ladera (Tabla 3.1). En cada uno de los sitios se colocaron mallas (1 mm de abertura) de 1m de largo x 0.5 m de alto, como trampas para los sedimentos y para el mantillo.

3.4. MUESTREO

El monitoreo de la erosión en los 12 sitios cubrió un período de dos años (1997, 1998-1999) con 8 fechas de muestreo. En junio, julio, septiembre, noviembre de 1997. Febrero, abril, julio de 1998 y marzo de 1999.

El material colectado (sedimentos - material vegetal) en las trampas de erosión fue pesado después de su colecta.

3.5. ANÁLISIS DE LABORATORIO

El material colectado en las trampas fue secado a una temperatura constante de 70°C por 24 horas y pesado para determinar el porcentaje de humedad. Dado que el material colectado en las trampas, tanto de sedimentos como del material vegetal estaban mezclados, fue necesario separarlos en forma manual para que la separación fuera lo más fina posible utilizando tres diferentes tamices (2 mm, 1.8 mm y 0.5 mm). Una vez separados el suelo y el mantillo, se pesaron por sitio y tratamiento para las ocho fechas de muestreo.

3.5.1. SUELO

Las muestras de los sedimentos de suelo colectados en las trampas de erosión fueron molidas en un mortero de ágata para realizar las determinaciones químicas de carbono total (Ct), nitrógeno total (Nt) y fósforo total (Pt). La concentración de Ct se realizó con un autoanizador de carbono modelo CM5012 (UIC 1995) Las concentraciones de Nt y Pt fueron determinadas con el método de oxidación húmeda de Kjeldhal (McGill y Figueiredo 1993), las lecturas fueron realizadas por colorimetría utilizando un autoanizador (Technicon Industrial Systems 1977).

3.5.2. MANTILLO

El mantillo colectado en las trampas de erosión fue procesado en un molino eléctrico para homogeneizar las muestras. Las determinaciones químicas del Ct se realizaron con el autoanalizador de carbono modelo CM5012 (UIC 1995) y las de Nt y Pt por el método de digestión húmeda (Thomas et al. 1967); las lecturas de los extractos se realizaron por colorimetría utilizando un autoanalizador (Technicon Industrial Systems 1977).

3.5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para evaluar los cambios estacionales de la pérdida de suelo, el movimiento de mantillo, así como la concentración y el contenido de nutrientes en los sedimentos de suelo y el mantillo colectado en las trampas de erosión, se realizaron análisis de varianza. La fecha y el tratamiento fueron considerados como los efectos principales. Cuando un efecto o su interacción fue significativa las comparaciones de medias se realizaron con la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

Para conocer el ordenamiento espacial del movimiento de suelo y mantillo se realizaron análisis de componentes principales (Kendall 1983); la matriz comprendió 8 fechas con 12 sitios para cada una de las variables y para cada uno de los dos tratamientos. Para los datos de concentración y contenido de nutrientes no fue posible realizar el análisis de componentes principales al estar desbalanceada la matriz de datos, debido a la diferencia en el movimiento de suelo y mantillo presentado a lo largo del periodo de estudio.

Los análisis de varianza se realizaron con el programa estadístico JMP (SAS Institute Inc., 1996) y los análisis de componentes principales se realizaron con el programa ORDEN (Ezcurra 1990).

3.6. RESULTADOS

3.6.1. PATRÓN TEMPORAL DEL EFECTO DE LA COBERTURA DE MANTILLO.

3.6.1.1. PÉRDIDA DE CARBONO TOTAL, NITRÓGENO TOTAL Y FÓSFORO TOTAL DEL SUELO.

La pérdida de sedimentos fue significativamente diferente entre tratamientos ($p < 0.0001$) y entre fechas ($p < 0.0001$, Tabla 3.2). Asimismo, la pérdida de sedimentos varió conjuntamente con el tratamiento y la fecha ($p < 0.0001$): la pérdida de sedimentos no fue estadísticamente diferente entre tratamientos en junio, julio y septiembre de 1997 y, febrero, abril y julio de 1998; por el contrario, el tratamiento sin mantillo (TSM) tuvo

mayor pérdida de suelo que el tratamiento con mantillo (TCM) en noviembre de 1997 y marzo de 1999 (figura 3.2).

La concentración de Ct de los sedimentos no fue estadísticamente diferente entre tratamientos ($p > 0.05$); sin embargo, varió estacionalmente ($p < 0.0001$) y también varió dependiendo del tratamiento y la estación de manera conjunta ($p < 0.005$, Tabla 3.2). La concentración de Ct no fue significativamente diferente entre tratamientos en junio, septiembre y noviembre de 1997; febrero y julio de 1998 y marzo de 1999 (figura 3a); en cambio, la concentración de Ct fue significativamente mayor en el TSM en julio de 1997 y abril de 1998 (figura 3.3a).

Las concentraciones de Nt y Pt de los sedimentos fueron significativamente diferentes entre tratamientos ($p = 0.003$ y $p < 0.0001$, respectivamente); asimismo variaron estacionalmente ($p < 0.0001$). La interacción del tratamiento con la estacionalidad de la precipitación también afectó significativamente la concentración de Nt y Pt ($p = 0.0002$ y $p < 0.0001$, respectivamente). Las concentraciones de Nt y Pt de los sedimentos no fueron diferentes entre tratamientos en septiembre y noviembre de 1997, y febrero y abril de 1998 (figura 3.3b y c). Las concentraciones de Nt y Pt fueron mayores en el TSM en los meses de junio y julio de 1997 y julio de 1998, sin embargo cabe mencionar que en el caso del Nt el mes de julio de 1998 no fue estadísticamente diferente (figura 3.3b y c).

Los contenidos de Ct, Nt y Pt de los sedimentos fueron significativamente diferente entre tratamientos, entre estaciones y con la interacción del tratamiento con la estacionalidad de la lluvia (Tabla 3.2). Los contenidos de Ct, Nt y Pt de los sedimentos no fueron diferentes entre tratamientos en junio, julio y septiembre de 1997 y febrero y abril de 1998 (figura 3.4); por el contrario, los contenidos de Ct, Nt y Pt fueron mayores en el TSM en noviembre de 1997, julio de 1998 y marzo de 1999 (figura 3.4).

3.6.1.2. CARBONO TOTAL, NITRÓGENO TOTAL Y FÓSFORO TOTAL DEL MANTILLO TRANSPORTADO.

El movimiento de mantillo no fue estadísticamente diferente entre tratamientos ($p > 0.05$), ni con la interacción (Tabla 3.3), pero sí varió estacionalmente ($p < 0.0001$, Tabla 3.3). Febrero y abril de 1998 presentaron menor movimiento de mantillo con respecto a julio de 1998 y marzo de 1999 (figura 3.5a).

Las concentraciones de Ct, Nt y Pt del mantillo no fueron estadísticamente diferente entre tratamientos (Tabla 3.3); sin embargo, si variaron estacionalmente y con la interacción del tratamiento con la estacionalidad de la precipitación (Tabla 3.3). Las

concentraciones de Ct, Nt y Pt no fueron diferentes estadísticamente entre tratamientos en junio, julio y noviembre de 1997, abril de 1998 y marzo 1999; con la excepción de la concentración de Pt en abril de 1998. Las concentraciones de Nt y Pt en el mantillo fueron mayores en el TCM en septiembre de 1997, sin embargo este resultado no fue seguido por la concentración de Ct (figura 3.5b, c y d). Las concentraciones de Ct, Nt y Pt fueron mayores en el TSM en febrero de 1998. Asimismo, en julio de 1998 las concentraciones de Ct y Nt del mantillo fueron mayores en el TCM, pero la concentración de Pt no fue diferente entre tratamientos (figura 3.5b, c y d).

El contenido de Ct, Nt y Pt del mantillo no fue diferente significativamente entre tratamientos, ni con la interacción del tratamiento con la estacionalidad de la precipitación (Tabla 3.3). Los contenidos de Ct, Nt y Pt del mantillo variaron estacionalmente (Tabla 3.3): la pérdida de Ct, Nt y Pt del mantillo fue mayor en junio de 1997 y julio de 1998 en relación a febrero y abril de 1998, con la excepción de Nt y Pt en febrero (figura 3.6).

3.6.2. PATRÓN ESPACIAL DEL EFECTO DE LA COBERTURA DE MANTILLO

3.6.2.1. EFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA PÉRDIDA DE SUELO

El efecto del mantillo fue espacialmente heterogéneo, la pérdida de suelo fue mayor en el TSM con relación al TCM, sin embargo las magnitudes variaron espacialmente. En el sitio 1 (piso alto, superficie cumbral) el TSM presentó 186 veces mayor salida de sedimentos (2449.6 g) con relación al TCM (13.2 g). En contraste, los sitios 5 (piso alto, dorso) y 7 (piso medio, superficie cumbral) tuvieron una pérdida de suelo 3 veces mayor en el TSM (2648 g y 2537 g respectivamente) con relación al TCM (854.6 g y 822.9 g respectivamente, figura 3.7).

3.6.2.2. EFECTO DEL MANTILLO SOBRE LA PÉRDIDA DE CARBONO TOTAL, NITRÓGENO TOTAL Y FÓSFORO TOTAL DEL SUELO

Las concentraciones de Ct, Nt y Pt de los sedimentos fueron mayores en el TCM, con excepción de los sitios 4, 7, 8 donde las concentraciones de estos elementos fueron mayores en el TSM (Tabla 3.4).

La variación espacial de los contenidos de Ct, Nt y Pt, como una medida del almacén de nutrientes que se pierde por efecto de la erosión, mostraron que el sitio 1 (piso alto, superficie cumbral) presentó la mayor diferencia entre tratamientos; por ejemplo, la pérdida de Nt fue 146 veces mayor en el TSM (10.2 g) con respecto al TCM (0.07 g, Tabla 3.5). En contraste, los sitios 7 (piso medio, superficie cumbral) y 11 (piso medio, superficie cumbral) tuvieron la menor diferencia entre tratamientos, por ejemplo,

la pérdida de Nt fue entre 2 y 3 veces mayor en el TSM (0.6 – 6.3 g) con relación al TCM (0.3 – 2.1 g, Tabla 3.5).

3.6.2.3. PATRÓN ESPACIAL DEL MOVIMIENTO DE MANTILLO

La variación espacial del movimiento de mantillo mostró al sitio 6 (piso alto, superficie cumbral) con la mayor diferencia entre tratamientos, el movimiento de mantillo fue 1.5 veces mayor en el TSM (245.5 g) con relación al TCM (157.4 g). En contraste, en el sitio 4 (piso alto, dorso) el movimiento de mantillo fue de 264 g en el TCM y de 263 g en el TSM (figura 3.8).

3.6.2.4. EFECTO DEL TRATAMIENTO SOBRE LA CALIDAD DEL MANTILLO

La variación espacial de la concentración de Ct y Nt mostró que en el sitio 9 la diferencia entre tratamientos fue mayor, este sitio presentó 1.4 veces más concentración de Ct en el TCM (300,346 $\mu\text{g C g}^{-1}$) con relación al TSM (220,008 $\mu\text{g C g}^{-1}$). la concentración de Nt fue 1.5 veces mayor en el TCM (20,150 $\mu\text{g N g}^{-1}$) con respecto al TSM (13,450 $\mu\text{g N g}^{-1}$, Tabla 3.6). Por otra parte, la concentración de Pt presentó la mayor diferencia en el sitio 11, siendo 1.7 veces mayor en el TCM (2,205 $\mu\text{g P g}^{-1}$) con respecto al TSM (1,324 $\mu\text{g P g}^{-1}$). Los sitios 1, 4 y 10 presentaron la menor diferencia en la concentración de Nt y el sitio 6 para la concentración de Ct y Pt (Tabla 3.6).

Los datos del contenido de Ct, Nt y Pt en el mantillo fueron espacialmente heterogéneos. Los contenidos de Ct y Nt en el sitio 9 mostraron la mayor variación entre tratamientos siendo 1.7 veces mayor el contenido de Ct en el TCM (103.4 g C) con respecto al TSM (60.2 g C) y 1.6 veces mayor el contenido de Nt en el TCM (5.7 g N) con respecto al TSM (3.5 g N). Para el contenido de Ct y Pt la mayor variación se presentó en el sitio 12, siendo mayor en el TCM (45.3 g C y 0.2 g P) con relación al TSM (25.5 g C y 0.1 g P). Los sitios 2 y 4 registraron la menor diferencia entre tratamientos (Tabla 3.7).

Los resultados de cada tratamiento se presentan bajo diferentes subtítulos, para demostrar mejor la influencia del tratamiento sobre las diferentes variables que afectaron el proceso de erosión y considerando que el ACP para los datos de pérdida de suelo y movimiento del mantillo separó a los sitios por tratamiento.

3.6.3. PATRÓN ESPACIAL DEL SUELO Y MANTILLO EN EL TRATAMIENTO CON MANTILLO.

PÉRDIDA DE SUELO.

La mayor variación espacial de la pérdida de suelo se presentó en los sitios 2 y 8. El sitio 2 (piso alto) presentó menor pérdida de sedimentos (226 g) con relación al sitio 8

(piso medio, 294 g). El ordenamiento espacial formó dos grupos: i) {sitios 1, 3 y 6} ubicados en el piso alto, el movimiento de total de sedimentos fue entre 13.2 - 43.5 g y ii) {sitios 5 y 11} ubicados en el piso alto y medio, la salida total de sedimentos en estos sitios fue entre 100 – 855 g; en el cuadrante I se ubicaron los sitios 4, 8, 9 y 10, los sitios 4 y 9 se localizan en pie de ladera y los sitios 8 y 10 en el dorso; la salida total de sedimentos en estos sitios fue entre 245 – 495 g (figura 3.9).

CONCENTRACIÓN Y CONTENIDO DE Ct, Nt Y Pt EN LOS SEDIMENTOS.

La mayor variación espacial en la concentración de Ct en los sedimentos de suelo del TCM se presentó en el sitio 1 (piso alto: $163,433 \mu\text{g C g}^{-1}$), en contraste, los sitios 7 (piso medio) y 10 (piso medio) presentaron menor concentración ($30,087 \mu\text{g C g}^{-1}$ y $29,135 \mu\text{g C g}^{-1}$ respectivamente, Tabla 3.4). Las concentraciones de Nt y Pt fueron mayores en los sitios 3 y 6 (piso alto: $7,744 \mu\text{g N g}^{-1}$; $7,362 \mu\text{g N g}^{-1}$ y $307 \mu\text{g P g}^{-1}$, $334 \mu\text{g P g}^{-1}$; respectivamente), en relación al sitio 10 ($1,974 \mu\text{g N g}^{-1}$) y a los sitios 2 y 7 ($199 \mu\text{g P g}^{-1}$ y $196 \mu\text{g P g}^{-1}$, respectivamente; Tabla 3.4)

Los datos del contenido de Ct, Nt y Pt indicaron que la salida más importante de estos elementos se presentó en los sitios 5 y 7 en relación al sitio 1. Por ejemplo, el contenido de Ct en el sitio 5 fue de 43 g de C, mientras que en el sitio 1 fue de 1.8 g de C (Tabla 3.5).

MOVIMIENTO DEL MANTILLO

La variación espacial del movimiento de mantillo se presentó entre los sitios 9 (piso medio, pie de ladera) y 11 (piso medio, superficie cumbral). El sitio 9 presentó mayor movimiento de mantillo (294.1 g) con respecto al sitio 11 (147.8 g). El ordenamiento espacial separó a los sitios por cuadrantes: cuadrante I {sitios 5, 7 y 12} los sitios 7 y 12 en superficie cumbral y el sitio 5 en dorso con 180.9 - 281.9 g, cuadrante II {sitios 2 y 10} ambos ubicados en el dorso (145.1 - 200.7 g), cuadrante III {sitios 3, 6 y 11} los sitios 6 y 11 en superficie cumbral y el sitio 3 en pie de ladera con 147.8 - 157.4 g, cuadrante IV {sitios 1, 4, 8 y 9} presentando mayor movimiento de mantillo (141.2 - 404.3 g; figura 3.10).

CONCENTRACIÓN Y CONTENIDO DE Ct, Nt Y Pt EN EL MANTILLO.

La concentración de Ct en el mantillo fue mayor en los sitios 1 y 8 ($364,514 \mu\text{g C g}^{-1}$ y $364,918 \mu\text{g C g}^{-1}$, respectivamente). La concentración de Nt fue mayor en el sitio 3 ($26,150 \mu\text{g N g}^{-1}$) y la de Pt en el sitio 11 ($2,205 \mu\text{g P g}^{-1}$). El sitio 12 fue de menor

concentración de Ct ($272,277 \mu\text{g C g}^{-1}$), Nt ($13,354 \mu\text{g N g}^{-1}$) y Pt ($1,338 \mu\text{g P g}^{-1}$; Tabla 3.6).

El comportamiento espacial del contenido de Ct, Nt y Pt en el mantillo mostró que la mayor pérdida de estos elementos fue en los sitios 8 y 9 (Tabla 3.7). En contraste, los sitios 10 y 11 presentaron menor pérdida de Ct (38.8 y 39.9 g de C, respectivamente) y Nt (2.3 y 2.6 g de N, respectivamente). Por otra parte la pérdida de Pt en el mantillo fue menor en los sitios 1, 6, 10 y 12 (Tabla 3.7).

3.6.4. PATRÓN ESPACIAL DEL SUELO Y MANTILLO EN EL TRATAMIENTO SIN MANTILLO.

PÉRDIDA DE SUELO.

La variación espacial más importante de la pérdida de suelo en el TSM se presentó entre los sitios 6 y 9 (figura 3.11a). Como el efecto del sitio 9 oscurecía el patrón espacial, se eliminó este sitio y se realizó el análisis de componentes principales nuevamente. Los sitios que explicaron la mayor varianza fueron el sitio 6 y el sitio 8. El ordenamiento espacial con el CP I permitió observar un efecto de posición al interior de la ladera, los sitios en la superficie cumbral presentaron valores negativos, con excepción del sitio 2 ubicado en ladera. En contraste, los sitios ubicados en el dorso y pie de ladera se ordenaron hacia los valores positivos (figura 3.11b).

CONCENTRACIÓN Y CONTENIDO DE Ct, Nt Y Pt EN LOS SEDIMENTOS.

La variación espacial en la concentración de Ct en los sedimentos de suelo del TSM fue mayor en el sitio 1 ($94,364 \mu\text{g C g}^{-1}$) en relación al sitio 9 ($29,891 \mu\text{g C g}^{-1}$; Tabla 3.4). La distribución espacial de la concentración de Nt indicó que los sitios 1, 3 y 5 ubicados en el piso alto tuvieron la mayor concentración ($5,360$; $5,640$ y $5,348 \mu\text{g N g}^{-1}$; respectivamente), en relación a los sitios 10 y 11 ubicados en el piso medio ($1,827$ y $1,848 \mu\text{g N g}^{-1}$; respectivamente; Tabla 3.4). El comportamiento espacial de la concentración de Pt en los sedimentos de suelo indicó que el sitio 3 presentó la mayor concentración de Pt ($298 \mu\text{g P g}^{-1}$); en relación a los sitios 9 y 10 (185 y $162 \mu\text{g P g}^{-1}$, respectivamente; Tabla 3.4).

Los contenidos de Ct, Nt y Pt en los sedimentos del TSM mostraron un patrón espacial consistente. La mayor pérdida de estos elementos se presentó en los sitios 8 y 9 ambos ubicados en el piso medio pero en diferente posición de ladera (Tabla 3.5). En contraste, los sitios 6 y 11 ambos ubicados en superficie cumbral presentaron la menor pérdida de Ct, Nt y Pt (Tabla 3.5).

MOVIMIENTO DEL MANTILLO.

El ACP indicó que los sitios 5 y 6 explicaron el mayor porcentaje de varianza. El sitio 5 ubicado en el dorso de la ladera presentó mayor movimiento de mantillo (360.9 g), con respecto al sitio 6 ubicado en la superficie cumbre (245.5 g). El ordenamiento espacial separó a los sitios por cuadrantes: cuadrante I los sitios 2 y 5 ubicados en piso alto y en dorso de ladera presentaron mayor movimiento de mantillo (360.9 g), cuadrante II los sitios 1, 6 y 11, ubicados en la superficie cumbre presentaron menor movimiento (171-245.5 g), cuadrante III los sitios 3, 4, 7, 10 y 12 con valores de movimiento entre 129 – 262.9 g; cuadrante IV los sitios 8 y 9 ubicados en el piso medio con valores de 553 g y 213.8 g, respectivamente (figura 3.12).

CONCENTRACIÓN Y CONTENIDO DE Ct, Nt Y Pt EN EL MANTILLO.

La concentración de Ct, Nt y Pt fue consistentemente mayor en el sitio 6 (piso alto). En contraste, el sitio 12 (piso bajo) presentó la menor concentración de Nt y Pt, y el sitio 11 (piso medio) la menor concentración de Ct (Tabla 3.6).

El contenido de Ct, Nt y Pt en el mantillo fue consistentemente mayor en el sitio 8 (piso medio, dorso; Tabla 3.7). El menor contenido, de Ct y Nt lo presentaron los sitios 7 y 11 ambos ubicados en superficie cumbre (Tabla 3.7), el sitio 12 (superficie cumbre) presentó bajo contenido de Pt (0.1 g de P; Tabla 3.7).

3.7. DISCUSIÓN

3.7.1. EFECTO DE LA COBERTURA DE MANTILLO SOBRE EL MOVIMIENTO DE NUTRIENTES EN EL SUELO.

PATRÓN TEMPORAL.

La comparación de la pérdida de sedimentos entre tratamientos mostró que la presencia de la capa de mantillo reduce significativamente la erosión del suelo. Los bajos niveles de sedimentos producidos con el TCM se debe principalmente a que la capa de mantillo reduce el impacto de la gota de lluvia y disipa la energía antes que afecte la estructura del suelo. Además, la capa de mantillo contribuye a mejorar la estructura del suelo, incrementando la capacidad de infiltración y reduciendo la cantidad de sedimentos que puedan ser transportados por escurrimiento (Morgan 1986, Besler 1987, Maass et al. 1998, Schmidt 1991, Bardfor y Huang 1994, Kohl y Schumacher 1999). Cabe señalar que independientemente de la estacionalidad de la precipitación, la cantidad de sedimentos producidos fue siempre mayor en el TSM. Debido a lo anterior se puede

establecer que la degradación y remoción de la capa de mantillo que cubre al suelo, por más delgada que ésta sea produce un severo incremento en la erosión.

La variación temporal de la pérdida de sedimentos estuvo acoplada a la estacionalidad de la precipitación ($r=0.96$). Los meses del final de la época húmeda presentaron no solo las mayores diferencias entre tratamientos, sino la mayor producción de sedimentos hasta 114 veces mayor al final de la época húmeda con relación a la época seca. Lo anterior, sugiere que el efecto de la precipitación fue diferencial a lo largo del ciclo de estudio, ya que aún cuando en ambas temporadas se registró una cantidad similar de lluvia mensual, la pérdida de sedimentos fue diferente. Al inicio de la época de lluvias, el agua puede ser absorbida por la cubierta de material vegetal acumulado o infiltrarse en el suelo, reduciendo la posibilidad de que se presenten eventos de escurrimiento y el transporte de sedimentos. Lo anterior podría explicar por qué no se observaron diferencias significativas en la pérdida de suelo entre los tratamientos durante las épocas secas. En cambio al interior de la época húmeda, la máxima producción de sedimentos puede explicarse debido al efecto combinado de la cantidad de precipitación mensual y la humedad antecedente en el suelo. López (1992), trabajando en la misma zona de estudio, reporta que el inicio de la época de lluvias con una precipitación mensual de 110.5 mm no generó escurrimiento; por el contrario, en el mes de septiembre con 92.8 mm de precipitación, el escurrimiento fue de 12 56 mm lo cual representó el 12% del escurrimiento total debido a la humedad antecedente. Govers y Loch (1993) y Bryan (1996) han mostrado que pequeños cambios en la humedad antecedente del suelo pueden afectar en gran medida la resistencia del suelo a la erosión, al reducir la capacidad de infiltración del suelo. Asimismo, en esta época la capa protectora de mantillo se ve reducida por el proceso de descomposición, por lo que su efecto protector contra la lluvia es menor.

La dinámica temporal de la concentración de nutrientes en los sedimentos transportados sugieren que la presencia de la capa de mantillo al inicio de la época de lluvias retarda la pérdida de los elementos de menor densidad como la MOS, por disminuir el "impacto de la gota de lluvia". La mayor concentración de Ct, Nt, Pt en los sedimentos del TSM al inicio de la época húmeda sugiere el transporte de la MOS debido a su baja densidad y de las partículas finas (arcilla y limos). Los elementos con mayor susceptibilidad a la pérdida son el Nt y el Pt, en donde el TSM presentó mayor

salida de estos elementos. Este comportamiento del Nt y el Pt ha sido sugerido con anterioridad por Schimel et al. (1985)

Temporalmente, el contenido de Ct, Nt y Pt en el suelo siguen los cambios estacionales en el sistema, en donde los meses finales de cada periodo (noviembre 1997 y marzo 1999) presentaron la mayor pérdida de estos nutrientes, explicados básicamente por la cantidad de sedimentos transportados. Los meses secos fueron de menor pérdida por ser meses que presentaron el menor movimiento de sedimentos.

PATRÓN ESPACIAL.

El patrón espacial de la pérdida de sedimentos mostró que a pesar de la heterogeneidad del paisaje como resultado de sus características topográficas (ángulo de la pendiente; curvatura; rugosidad; etc.), la presencia de la cobertura del mantillo redujo la pérdida de suelo en todos los sitios. Sin embargo, la importancia relativa del mantillo fue espacialmente variable porque dependió de las características físicas, edáficas y morfológicas de los sitios. La efectividad del mantillo fue mayor en sitios de menor pendiente, cuando el proceso erosivo dominante es la separación de partículas del suelo por el "impacto de la gota de lluvia", mientras que en los sitios inclinados o de mayor pendiente, la efectividad del mantillo se ve reducida cuando la energía del escurrimiento se ve incrementada por efecto de la pendiente, de tal forma que la capa de mantillo no logra amortiguar o disipar esta energía. Por ejemplo, el sitio 1, localizado en la superficie cumbral del piso alto presentó la mayor diferencia en la salida de sedimentos entre el TCM y el TSM. Galicia et al. (1995) y López-Blanco et al. (1996) han reportado para la unidad de ladera en la cual se localiza este sitio que la forma predominante de la superficie cumbral es convexa y el ángulo de pendiente 2-4°, en estas condiciones la protección del mantillo fue efectiva al reducir en más de 300 veces la pérdida de sedimentos. Schmidt (1991), Bradford y Huang (1994) y Kohl y Schumacher (1999) trabajando con materiales porosos y con residuos vegetales como medios de protección del suelo han reportado que para sitios con estas características topográficas la protección de una cubierta a nivel del suelo reduce el impacto erosivo de la "gota de lluvia" protegiendo al suelo de la separación de partículas, asimismo incrementa la capacidad de infiltración del suelo reduciendo la cantidad de sedimentos transportados por escurrimiento. Por otra parte, la cantidad de sedimentos producidos sin la capa de mantillo (186 veces mayor en relación al TCM) puede explicarse por la geometría del relieve (curvatura convexa, pendiente 2-4°). Young y Mutchler (1969),

Pennock y Jong (1987), Kamalu (1994) han sugerido que sitios con estas características promueven el escurrimiento laminar con la capacidad de separar y transportar sedimentos.

Por el contrario, en los sitios 5 y 7 la efectividad del mantillo fue menor. La pérdida de suelo en el TCM fue sólo 3 veces menor con respecto al TSM. Galicia et al. (1995) y López-Blanco et al. (1996) han reportado para las unidades de ladera en donde se localizan estos sitios que la geometría del relieve es lineal (sitio 5) y convexa (sitio 7), y el ángulo de pendiente en ambas entre 8-16°. Young y Mutchler (1969) encontraron que en los sitios con pendientes uniformes y convexas las pérdidas de suelo no difieren entre ellas, asimismo reportan que al incrementarse el ángulo de la pendiente aumenta la velocidad del flujo permitiendo una menor infiltración. Cao y Coote (1993) y Singer et al. (1981) señalan que como resultado de la geometría del relieve en sitios con las características topográficas ya mencionadas se incrementa el poder erosivo del flujo superficial, al aumentar la velocidad y la capacidad de carga del escurrimiento,.

El efecto del tipo y cantidad de material vegetal, así como del ángulo de la pendiente, sobre la erosión del suelo ha sido documentado en la literatura; sin embargo, poco se ha reportado acerca de cómo afectan estos factores los diferentes mecanismos de erosión en el paisaje (Okwach et al. 1992). En este sentido, el presente trabajo sugiere que en sitios donde la topografía no influye en la dinámica del movimiento de suelo (pendientes <4°), la presencia del mantillo tiene un efecto significativo en la protección de los sedimentos. Por el contrario, en los sitios en donde la topografía ejerce un efecto determinante (pendiente >8°), el efecto de la cobertura de mantillo se reduce, como resultado de la interacción entre la inestabilidad y susceptibilidad de los sitios.

En general la dinámica espacial de la concentración de nutrientes evidenció que la presencia de la cobertura de mantillo permitió una mayor concentración de nutrientes en los sedimentos del TCM. Lo cual sugiere que la capa de mantillo es un medio efectivo para abastecer de nutrientes al suelo, al incorporar nutrientes por descomposición y lixiviación, como ha sido sugerido para sistemas estacionales (Kundu 1990). El patrón fue inverso en los sitios 4 y 8, en estos sitios la concentración de Ct, Nt y Pt fue mayor en los sedimentos del TSM. La ubicación al interior de la ladera parece ser el factor que influye en este comportamiento. Galicia et al. (1995) y López-Blanco et al. (1996) han reportado para las unidades de ladera en donde se localizan estos sitios que la geometría del relieve es cóncava en el pie de ladera con ángulo 8-16° (sitio 4) y convexa

en el dorso con un ángulo de pendiente entre 16-20° (sitio 8) En base a las características presentadas en el sitio 4, este resultado puede ser explicado por el "subsidio" de zonas ladera arriba. Gregorich y Anderson (1985) señalan que los pies de la ladera generalmente se asocian con procesos de depositación, por lo cual se ven enriquecidos en nutrientes principalmente de Nt y Pt. Por otra parte, el hecho de que los sedimentos provenientes del TSM en el sitio 8 presentaran mayor concentración de nutrientes sugiere que debido a sus características topográficas y la ausencia de la protección del mantillo, la capa de suelo biológicamente activa pudo verse reducida por un efecto gravitacional o en masa. Andreu et al. (1994), Palis et al. (1990), Wan y El-Swaify (1997) mencionan que uno de los primeros constituyentes del suelo en ser removidos por la erosión es la MOS, por su baja densidad y junto con ella el Ct, Nt y Pt.

El patrón espacial del contenido de Ct, Nt y Pt en los sedimentos mostró que independientemente de su posición la salida de estos elementos fue mayor en el TSM. Este patrón fue similar al presentado por los datos de movimiento de suelo, sugiriendo que a pesar de que los sedimentos del TCM presentaron mayor concentración de nutrientes, la pérdida de estos elementos es mayor cuando no se tiene la capa de mantillo.

3.7.2. DINÁMICA ESPACIAL DE LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES EN EL SUELO Y MANTILLO EN EL TRATAMIENTO CON MANTILLO.

La dinámica espacial de la pérdida de suelo en el paisaje fue espacialmente heterogénea. El ordenamiento espacial parece sugerir la agrupación de los sitios por su erodabilidad. Los sitios 1, 3 y 6 que presentaron la menor pérdida de sedimentos sugieren ser sitios de baja erodabilidad. López-Blanco et al. (1996) , reportan ángulos de pendiente < 8° para las zonas al interior de las unidades de ladera en donde se localizan estos sitios. Por ello ante la presencia del mantillo estos sitios se muestran como sitios estables a la erosión. Kamalu (1994) reporta que la lluvia sobre pendientes suaves tiene la capacidad para separar el material pero no para transportarlo. Los sitios 5 y 11 son sitios que ante la presencia de eventos de lluvia extremos su erodabilidad es alta. Los datos reportados por Galicia et al. (1995) y López-Blanco et al. (1996) para las zonas donde se ubican estos sitios señalan que la geometría del relieve es de curvatura lineal (sitio 5) y lineal-convexa (sitio 11) con ángulo 4-8°. Asimismo, Galicia (1992) ha reportado que debido a las características topográficas y edáficas los sitios pueden tener baja capacidad de infiltración, incrementándose el flujo superficial; el bajo porcentaje de

arcillas aunado a la geometría del relieve promueven que la estabilidad del suelo sea menor. Los sitios 4, 8, 9 y 10 son sitios que por su geometría convexa y ángulo de pendiente 16- 30° (Galicia et al. 1995, López-Blanco et al 1996) el proceso de erosión dominante es el gravitacional o en masa (Cao y Coote 1993) y por lo tanto sujetos a movimientos continuos en donde la presencia del mantillo no es una protección efectiva.

La dinámica de la concentración de nutrientes en los sedimentos de suelo fue espacialmente heterogénea. En los sitios 1 y 6 la concentración de nutrientes totales en los sedimentos de suelo fue mayor como resultado de una alta tasa de descomposición y una alta masa de mantillo lo que permitió la entrada de nutrientes al suelo. Por el contrario, los sitios en dorso y en pie de ladera con pendientes entre 8-16° presentaron baja concentración. Estos sugiere que el tiempo de residencia del mantillo en estos sitios no es suficiente para lograr influir en el intercambio de nutrientes entre el mantillo y el suelo debido a la inestabilidad de los sitios.

El patrón espacial del contenido de Ct, Nt y Pt en los sedimentos del suelo se explica por un efecto de masa. Espacialmente, las pérdidas más importantes se presentaron en los sitios 5 y 7, sujetos a pérdidas importantes en cantidad de sedimentos; por el contrario, las superficies cumbrales (sitios 1 y 11) acordes a la masa de sedimentos producida, presentaron bajos contenidos de Ct, Nt y Pt.

3.7.3. DINÁMICA ESPACIAL DE LA PÉRDIDA DE NUTRIENTES EN EL SUELO Y MANTILLO EN EL TRATAMIENTO SIN MANTILLO.

Bajo el TSM la dinámica espacial de pérdida de suelo parece ser dominada por el proceso de erosión laminar, ya que en los diferentes periodos el mayor movimiento de sedimentos se presentó en sitios que tienen una alta susceptibilidad a este proceso por su posición en la ladera y ángulo de pendiente. Por el contrario, los sitios con menor movimiento de suelo (sitios 6 y 11), se explican no sólo por su posición en superficie cumbrales sino también por la cobertura del dosel, ya que no todos los sitios con estas características presentaron bajo movimiento de sedimentos por ejemplo, el sitio 1. Galicia (1992) reporta una mayor densidad de árboles y arbustos al interior de las unidades de ladera en donde se ubican los sitios 6 y 11 con respecto al sitio 1. Andreu et al. (1994), Okwach et al. (1992) y Pimental y Kounang (1998) señalan que cuando la cobertura vegetal se incrementa, la cantidad de sedimentos producidos decrece como resultado de la intercepción de la lluvia por el dosel de la vegetación, de igual forma la

mayor densidad de árboles incrementa la retención del suelo por la biomasa radicular, al reducir la erosión, como parece ocurrir en estos sitios.

El ordenamiento espacial separó a los sitios ubicados en la cresta de los sitios ubicados en ladera y pie de ladera, sugiriendo que operan diferentes procesos al interior de la ladera. Las zonas de superficie cumbre son afectadas por erosión laminar y el efecto "splash" o de "salpicadura" por el impacto directo de las gotas de lluvia (sitios 1,6,7,11 y 12); por el contrario, en los sitios en dorso y pie de ladera, el efecto es por gravedad, afectado por el ángulo de la pendiente y la forma o microforma de la ladera (sitios 3,4,5,8,10).

La dinámica espacial de la concentración de nutrientes en los sedimentos mostró un patrón heterogéneo estructurado en dos escalas distintas: a) piso altitudinal y b) posición al interior de la ladera. a) Piso altitudinal, los sitios ubicados en el piso alto presentaron alta concentración de nutrientes en los sedimentos. Sugiriendo que el proceso de erosión ha resultado en la separación de las partículas finas del suelo. El-Swaify (1993), Okwach et al. (1992), Wan y El-Swaify (1997), han reportado que las partículas finas (arcillas y limos) están enriquecidas en nutrientes y conlleva el transporte de MOS básicamente por su baja densidad. b) Posición al interior de la ladera, los sitios en dorso y en pie de ladera con pendientes entre 16-30° presentaron menor concentración de nutrientes en los sedimentos. La dinámica de la pérdida de sedimentos en grandes cantidades en estos sitios alteran la textura y estructura del suelo. Pimentel y Kounang (1998) mencionan que estas alteraciones pueden modificar no solo las propiedades físicas del suelo sino también las interacciones biológicas-químicas por la inestabilidad de los sitios

El contenido de nutrientes en los sedimentos de suelo y del mantillo se explican por un efecto de masa, los sitios 8 y 9 ubicados en el dorso y pie de ladera, respectivamente presentaron la mayor pérdida de nutrientes relacionada con una mayor pérdida de sedimentos en estos sitios en donde por sus características topográficas el proceso erosivo es gravitacional.

3.8. CONCLUSIONES

La erosión del suelo en el TSM puede reducir la productividad del sistema a través de la pérdida de nutrientes, la disminución de la capa de suelo, la reducción de la MOS y cambios en la estructura y características físicas del suelo. Por el contrario, todas

estas características son protegidas y mejoradas con la presencia de una capa de mantillo como lo mostraron los resultados obtenidos en el TCM de este estudio.

La presencia del mantillo, no sólo influye la cantidad de sedimentos transportados, sino también la entrada de nutrientes por descomposición y lixiviación del mantillo. Por ello, la presencia del mantillo es primordial en la protección de pérdida de nutrientes por erosión.

Asimismo, resultó evidente la necesidad de analizar el proceso de erosión en un contexto espacial, ya que para comprender la severidad de estos procesos erosivos es necesario considerar la interacción entre varios elementos del paisaje y no solo sitios individuales como elementos aislados, debido a que el proceso de erosión no es lineal, ni homogéneo en el tiempo ni en el espacio.

3.9. LITERATURA CITADA

- Andreu, V., J. Forteza, J. L. Rubio y R. Cerni. 1994 Nutrient losses in relation to vegetation cover on automated field plots. Páginas 116-126 en R. J. Rickson, editor. *Conserving Soil Resources European Perspectives*, CAB International, University Press, Cambridge
- Band, L E 1989 A terrain-based watershed information system *Hydrological Process* 3:151-162.
- Besler, H. 1987. Slope properties, slope processes and soil erosion risk in the rain forest of Kalimantan Timur (Indonesian Borneo). *Earth Surface Processes and Landforms* 12:195-204
- Bradford, J M. y C. Huang. 1994. Interrill soil erosion as affected by tillage and residue cover. *Soil and Tillage Research* 31:353-361.
- Bullock, S. H. 1986. Climate of Chamela, Jalisco, and trends in the south coastal region of Mexico. *Arch. Met. Geoph. Biol.* 36:297-316.
- Bullock, S. H. y A. Solís-Magallanes. 1990. Phenology and canopy trees of a tropical deciduous forest in México. *Biotropica* 21:22-35.
- Bryan, R. B. 1996. Erosional response to variation in the interstorm weathering conditions. Páginas 589-613 en M. Anderson y S. Brooks, editores. *Advances in hillslopes processes*. Wiley-Interscience, Chichester, UK.

- Cao, Y. Z. y D. R. Coote. 1993. Topography and water erosion in northern Shaanxi Province, China. *Geoderma* **59**:249-262.
- El-Swaify, S. A. 1993. Soil erosion and conservation in the humid tropics. Páginas 233-255 en D. Pimentel editor. *World soil erosion and conservation*. University Press. Cambridge.
- Ezcurra, E. 1990. Program ORDEN. Centro de Ecología, UNAM. México.
- Galicia, L. 1992. Influencia de la variabilidad de la forma de la pendiente en las propiedades físicas de los suelo y su capacidad de retención de agua, en una cuenca tropical estacional. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México.
- Galicia, L., J. López-Blanco, A.E. Zarco-Arista, V. Filips y F. García-Oliva. 1999. The relationships between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico. *Catena* **36**:153-164.
- Galicia, L., F. García-Oliva y J. López-Blanco. 1995. Efecto de la estructura jerárquica del relieve en la distribución de las características físicas de los suelos en una cuenca tropical estacional mexicana. *Boletín de Investigaciones Geográficas* **3**:53-75.
- Govers, G. y R. J. Loch. 1993. Effects of initial water content and soil mechanical strength on the runoff resistance of clay soils. *Australian Journal of Soil Research* **31**:549-566.
- Gregorich, E. G. y D. W. Anderson. 1985. Effects of cultivation and erosion on soils of four toposequences in the Canadian prairies. *Geoderma* **86**:343-354.
- Imeson, A. C. y H. Lavee. 1999. Soil erosion and climate change: The transect approach and the influence of scale. *Geomorphology* **23**:219-227.
- Kamalu, C. 1994. The effects of slope length and inclination on the separate and combined actions of rainsplash and runoff. Páginas 143-149 en R. J. Rickson editor. *Conserving Soil Resources European Perspectives*, CAB International, University Press, Cambridge.
- Kendall, M. 1980. *Multivariate Analysis*. Charles Griffin & Co. Londres.
- Kohl, R. A. y T. E. Schumacher. 1999. Infiltration with porous and nonporous simulated residue. *Journal of Soil and Water Conservation* **54**:574-576.
- Kundu, D. K. 1990. Tropical leaf-litter nutrients. *Nature* **344**:203.
- Lai, R. 1986. *Tropical Edaphology*. John Wiley and Sons.

- López-Blanco, J. y F. García-Oliva. 1998. Soil erosion monitoring by sheetwash processes in different positions of a small watershed in Chamela, Mexico. The 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France.
- López-Blanco, J., L. Galicia y F. García-Oliva. 1999. Hierarchical slope configuration of small watershed in a Tropical Deciduous Forest in Mexico. *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria* 22:33-40.
- López-Blanco, J., L. Galicia-Sarmiento y F. García-Oliva. 1996. Aplicación de un SIG para la caracterización morfológica y la delimitación de unidades de ladera de una cuenca tropical estacional en Chamela, Jalisco, México. *Boletín de Investigaciones Geográficas* 4:39-61.
- López, G. A. 1992. Escorrentía en pequeñas cuencas hidroiológicas con seiva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. Tesis de Licenciatura. E.N.E.P. Iztacala, UNAM, México.
- Lott, E., H.S. Bullock y A. Solís-Magallanes. 1987. Floristic diversity and structure of upland and arroyo forests of Coastal Jalisco. *Biotropica* 19:226-235.
- Maass, J.M., C. F. Jordan y J. Sarukhán. 1998. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal of Applied Ecology* 25:595-607
- Martínez-Yrizar, A., J. M. Maass, L. A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. 1996. Net primary productivity of a tropical deciduous forest ecosystem in Western Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 12:169-175.
- McGill, W. B. y C. T. Figueiredo. 1993. Total Nitrogen *En* M. R. Carter, editor. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science.
- Morgan, R. P. C. 1986. *Soil erosion and conservation*. Longman Scientific and Technical Nueva York, E.U.A.
- Okwach, G. E., R. G. Palis y C. W. Rose. 1992. Sediment concentration and characteristics as affected by surface mulch, land slope and erosion mechanisms. Páginas 91-106 *en* H. Humi y K. Tato, editores. *Erosion, conservation and small-scale farming*. Walsworth Publishing Company Inc. Missouri, E. U. A.
- Palis, R. G., Okwach, G., Rose, C. W. y Saffigna, P. G. 1990. Soil erosion and nutrient loss. II. The effect of surface contact cover and erosion processes on enrichment ratio and nitrogen loss in eroded sediment. *Australian Journal of soil Research* 28:641-658.

- Pennock, D. J. y E. de Jong. 1987. The influence of slope curvature on soil erosion and deposition in Hummock terrain. *Soil Science* **144**:209-217.
- Pimentel, D. y N. Kounang 1998. Ecology of soil erosion in ecosystems. *Ecosystems* **1**:416-426.
- Roy, S. y J. S. Singh. 1994. Consequences of habitat heterogeneity for availability of nutrients in a dry tropical forest. *Journal of Ecology* **82**:503-509.
- SAS Institute Inc. 1996. SAS Institute Inc. Campus Drive. Cary, NC. E. U. A.
- Singer, M. J., Matusda y J. Blackard. 1981. Effects of mulch rate on soil loss by raindrop splash. *Soil Science of American Journal* **45**:107-110.
- Schimel, D., M. A. Stillwell y R. G. Woodmansee. 1985. Biogeochemistry of C, N, and P in a soil catena of the shortgrass steppe. *Ecology* **66**:276-282
- Schmidt, J. 1991. The impact of rainfall on sediment transport by sheetflow. *Catena* **19**:9-17.
- Solís, V. E. 1993. Características fisicoquímicas de un suelo en un ecosistema tropical estacional. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Technicon Industrial System. 1977. Technicon Industrial method No 329-74W/B. individual/simultaneous determinations of nitrogen and/ or phosphorus in BD acid digestion. Technicon Industrial System. New York.
- Thomas, R. L., R. W. Sheard y J. R. Moyer. 1967. Comparison of conventional and automated procedures for nitrogen, phosphorus and potassium analyses of plant tissue using a simple digestion. *Agronomical Journal* **59**:240-243.
- Turner, M. G. 1998. Landscape Ecology living in a mosaic. Páginas 77-122 in Dodson, I. S., T. F. H. Allen, S. R. Carpenter, A. R. Ives, R. L. Jeanne, J. F. Kitchell, N. E. Langston, y M. G. Turner, editores. *Ecology*. Oxford University Press, Inc. Nueva York, E. U. A.
- UIC. 1995. Operation manual for the CM5012 CO₂ Coulometer. UIC. Joilet IL, E.U.A.
- Voroney, R. P., Van Veen, J. A. y Paul, E. A. 1981. Organic C dynamics in grassland soil. 2. Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion. *Canadian Journal of Soil Science* **61**:211-224.
- Wan, Y. y S. A. El-Swaify. 1997. Flow-induced transport and enrichment of erosional sediment from a well-aggregated and uniformly-textured Oxisol. *Geoderma* **75**:251-265.

- Wischmeir, W. H. y D. D. Smith 1978. Predicting rainfall erosion losses -a guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.
- Young, R. A. y C. K. Mutchler. 1969 Effect of slope shape on erosion and runoff. Transactions of the ASAE 12.231-239.

Tabla 3.1 Ubicación y características generales de los sitios de muestreo (Datos a partir de Galicia et al. 1995).

SITIO	PISO	ORIENTACIÓN	POSICIÓN EN LADERA	UNIDAD DE LADERA
1	alto	norte	superficie cumbral	homogénea plana
2	alto	norte	dorso	homogénea plana
3	alto	norte	pie	homogénea plana
4	alto	sur	pie	homogénea plana
5	alto	sur	dorso	homogénea plana
6	alto	sur	superficie cumbral	homogénea plana
7	medio	norte	superficie cumbral	heterogénea inclinada
8	medio	norte	dorso	heterogénea inclinada
9	medio	sur	pie	heterogénea inclinada
10	medio	sur	dorso	heterogénea inclinada
11	medio	sur	superficie cumbral	heterogénea inclinada
12	bajo	sur	superficie cumbral	heterogénea inclinada

Tabla 3.2. Valores de la probabilidad de rechazo de la hipótesis nula con los análisis de varianza para los datos de suelo de 1997 - 1999.

Variable	Tratamiento		Estacionalidad		Tratamiento por estacionalidad	
	F	p	F	p	F	p
Movimiento de suelo	(1,191) 31.57	<0.0001	(7,191) 19.73	<0.0001	(7,191) 13.85	<0.0001
Concentración de C	(1,189) 0.53	0.47	(7,189) 11.20	<0.0001	(7,189) 3.69	0.001
Concentración de N	(1,170) 13.58	0.0003	(7,170) 13.74	<0.0001	(7,170) 4.28	0.0002
Concentración de P	(1,171) 19.85	<0.0001	(7,171) 23.31	<0.0001	(7,171) 6.29	<0.0001
Contenido de C	(1,189) 21.89	<0.0001	(7,189) 146.04	<0.0001	(7,189) 10.20	<0.0001
Contenido de N	(1,171) 14.17	0.0002	(7,171) 10.08	<0.0001	(7,171) 7.76	<0.0001
Contenido de P	(1,171) 22.89	<0.0001	(7,171) 16.04	<0.0001	(7,171) 11.42	<0.0001

Tabla 3.3. Valores de la probabilidad de rechazo de la hipótesis nula con los análisis de varianza para los datos de mantillo de 1997 - 1999.

Variable	Tratamiento		Estacionalidad		Tratamiento por estacionalidad	
	F	p	F	p	F	p
Movimiento de mantillo	(1,191) 0.56	0.4549	(7,191) 11.65	<0.0001	(7,191) 0.59	0.7656
Concentración de C	(1,189) 2.74	0.0994	(7,189) 55.78	<0.0001	(7,189) 5.32	<0.0001
Concentración de N	(1,190) 1.55	0.2153	(7,190) 33.16	<0.0001	(7,190) 4.66	<0.0001
Concentración de P	(1,190) 2.93	0.0885	(7,190) 31.04	<0.0001	(7,190) 4.98	<0.0001
Contenido de C	(1,189) 0.02	0.8877	(7,189) 11.29	<0.0001	(7,189) 0.65	0.7145
Contenido de N	(1,190) 0.06	0.8062	(7,190) 10.59	<0.0001	(7,190) 0.46	0.8644
Contenido de P	(1,190) 0.25	0.6176	(7,190) 8.99	<0.0001	(7,190) 0.77	0.6110

Tabla 3.4. Datos promedio de 8 fechas para la concentración de Ct, Nt y Pt de los sedimentos de suelo por sitios entre 1997-1999. TCM- Tratamiento con mantillo, TSM-Tratamiento sin mantillo, A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-norte, S-sur, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera. El número entre paréntesis corresponde al error estándar de la media.

SITIOS	$\mu\text{g C g}^{-1}$		$\mu\text{g N g}^{-1}$		$\mu\text{g P g}^{-1}$	
	TCM	TSM	TCM	TSM	TCM	TSM
1-ANP	163433 (48216)	94364 (11132)	7276 (929)	5360 (629)	258 (4)	268 (21)
2-AND	71776 (16365)	39737 (3555)	3273 (1068)	2880 (234)	199 (53)	201 (13)
3-ANP	105285 (4344)	72409 (10506)	7744 (1442)	5640 (1255)	307 (30)	298 (43)
4-ASP	55905 (8348)	61184 (7830)	3056 (236)	4598 (639)	224 (9)	254 (21)
5-ASD	71104 (16209)	68935 (7525)	5040 (902)	4408 (669)	283 (35)	251 (21)
6-ASC	126380 (28049)	75920 (12854)	7362 (1453)	5348 (698)	334 (47)	270 (33)
7-MNC	30087 (4992)	63560 (8123)	2558 (211)	4065 (450)	196 (12)	240 (19)
8-MND	58551 (20348)	68025 (15676)	3144 (771)	5015 (598)	205 (30)	274 (27)
9-MNP	65969 (7027)	29892 (4490)	3805 (982)	2549 (398)	253 (33)	185 (16)
10-MSD	29135 (4176)	31206 (5249)	1974 (274)	1827 (336)	209 (25)	162 (10)
11-MSC	47118 (8073)	35153 (7112)	2730 (639)	1848 (172)	239 (12)	225 (20)
12-BSC	55430 (5311)	54677 (6176)	3553 (308)	3780 (191)	254 (7)	272 (13)

Tabla 3.5. Datos promedio de 8 fechas del contenido de Ct, Nt y Pt de los sedimentos de suelo por sitios entre 1997-1999. TCM- Tratamiento con mantillo, TSM-Tratamiento sin mantillo, A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-norte, S-sur, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera. El número entre paréntesis corresponde al error estándar de la media

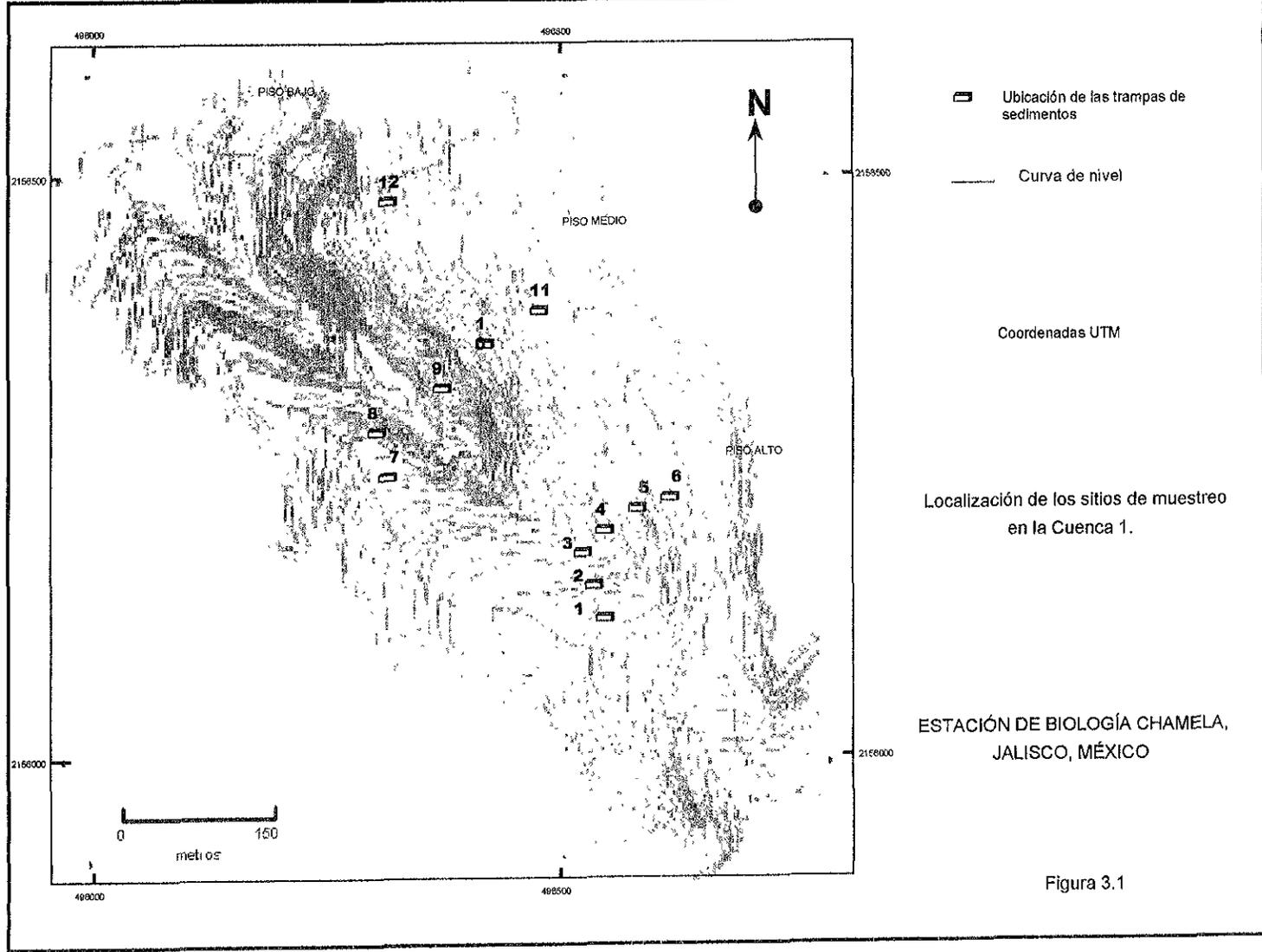
SITIOS	CARBONO (q)		NITRÓGENO		FÓSFORO (q)	
	TCM	TSM	TCM	TSM	TCM	TSM
1-ANP	1.8 (0.1)	2.23 (.29)	0.07 (0.007)	10.2 (1.8)	0.003 (0.0005)	0.6 (0.1)
2-AND	14 (2)	81.4 (10)	0.6 (0.1)	6.2 (0.9)	0.04 (0.008)	0.4 (0.07)
3-ANP	4.4 (0.4)	95.2 (6.6)	0.3 (0.2)	7 (0.6)	0.01 (0.002)	0.4 (0.04)
4-ASP	18.2 (1.9)	123.6 (12)	0.9 (0.09)	8.8 (0.9)	0.07 (0.007)	0.6 (0.07)
5-ASD	43.1 (7)	131.2 (10.1)	2.3 (0.4)	7.8 (0.6)	0.2 (0.04)	0.5 (0.04)
6-ASC	5.1 (0.3)	31.9 (4.4)	0.3 (0.02)	2 (0.4)	0.01 (0.0008)	0.1 (0.02)
7-MNC	29.4 (4)	101.8 (12.1)	2.1 (0.3)	6.3 (0.7)	0.2 (0.03)	0.5 (0.06)
8-MND	26.8 (4.1)	464 (41)	1.2 (0.1)	31.1 (2.5)	0.07 (0.007)	1.6 (0.1)
9-MNP	7.8 (1)	224 (14.2)	0.5 (0.1)	32.5 (3.2)	0.04 (0.007)	1.8 (0.1)
10-MSD	13 (1.4)	102 (9.2)	1.1 (0.03)	5.5 (0.5)	0.08 (0.007)	0.4 (0.04)
11-MSC	5.7 (0.8)	13.8 (0.9)	0.3 (0.06)	0.6 (0.04)	0.02 (0.003)	0.07 (0.005)
12-BSC	13.8 (1.6)	143.5 (26.7)	0.8 (0.1)	8.3 (1.09)	0.05 (0.007)	0.6 (0.07)

Tabla 3.6. Datos promedio de 8 fechas para la concentración de Ct, Nt y Pt del mantillo por sitios entre 1997-1999. TCM- Tratamiento con mantillo, TSM-Tratamiento sin mantillo, A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-norte, S-sur, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera. El número entre paréntesis corresponde al error estándar de la media.

SITIOS	$\mu\text{g C g}^{-1}$		$\mu\text{g N g}^{-1}$		$\mu\text{g P g}^{-1}$	
	TCM	TSM	TCM	TSM	TCM	TSM
1-ANP	364514 (35192)	321112 (41485)	16470 (2090)	17074 (1569)	1290 (135)	1241 (113)
2-AND	325216 (45038)	250386 (61854)	22140 (2941)	17136 (3497)	1464 (128)	1325 (218)
3-ANP	360,377 (31582)	280413 (36741)	28150 (2252)	18857 (2084)	1647 (101)	1377 (135)
4-ASP	289946 (46882)	289920 (33349)	16960 (1817)	17410 (1796)	1378 (103)	1238 (99)
5-ASD	336700 (35997)	274342 (32794)	18467 (1855)	16509 (1793)	1488 (135)	1343 (118)
6-ASC	348117 (21065)	358785 (28310)	22895 (2613)	21463 (2284)	1476 (139)	1403 (104)
7-MNC	324557 (51959)	291585 (34873)	18700 (2158)	15557 (926)	1580 (123)	1305 (63)
8-MND	364918 (34084)	295396 (28341)	19300 (2102)	17137 (1118)	1455 (59)	1232 (74)
9-MNP	300346 (47084)	220008 (45395)	20150 (1456)	13450 (2134)	1546 (58)	1211 (82)
10-MSD	291579 (40157)	312720 (45016)	16950 (2870)	16654 (1183)	1503 (160)	1334 (76)
11-MSC	306812 (45058)	240402 (44125)	16830 (1432)	14469 (1709)	2205 (719)	1324 (86)
12-BSC	272277 (46974)	256761 (52132)	13354 (1766)	11000 (1644)	1338 (101)	1161 (128)

Tabla 3.7. Datos promedio de 8 fechas para el contenido de C, N y P en el mantillo por sitios entre 1997-1999. TCM- Tratamiento con mantillo, TSM-Tratamiento sin mantillo, A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-norte, S-sur, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera. El número entre paréntesis corresponde al error estándar de la media.

SITIOS	CARBONO (g)		NITRÓGENO (g)		FOSFORO (g)	
	TCM	TSM	TCM	TSM	TCM	TSM
1-ANP	54.7 (2.4)	49.3 (2.4)	2.2 (0.1)	2.6 (0.1)	0.2 (0.006)	0.2 (0.006)
2-AND	63.6 (2.2)	65.9 (9.3)	4.1 (0.1)	3.5 (0.4)	0.3 (0.006)	0.3 (0.03)
3-ANP	58.1 (2)	49.5 (1.6)	4.1 (0.1)	3.5 (0.1)	0.3 (0.009)	0.3 (0.01)
4-ASP	76.6 (4.8)	74.4 (4.6)	4.2 (0.2)	4.2 (0.2)	0.3 (0.02)	0.3 (0.02)
5-ASD	89.6 (2.4)	118.6 (8.9)	4.8 (0.1)	5.6 (0.3)	0.3 (0.009)	0.5 (0.03)
6-ASC	52.7 (1.8)	67.2 (4.3)	3.9 (0.2)	3.9 (0.2)	0.2 (0.01)	0.3 (0.02)
7-MNC	60 (3.1)	41.6 (1.3)	4.0 (0.3)	2.5 (0.1)	0.3 (0.02)	0.2 (0.006)
8-MND	145.9 (3.4)	163.9 (5.1)	7.6 (0.1)	9.6 (0.3)	0.6 (0.009)	0.7 (0.02)
9-MNP	103.4 (6.3)	60.2 (5.4)	5.7 (0.2)	3.5 (0.3)	0.4 (0.02)	0.3 (0.02)
10-MSD	38.8 (0.7)	53.5 (1.6)	2.3 (0.1)	2.9 (0.1)	0.2 (0.006)	0.2 (0.007)
11-MSC	39.9 (1.2)	41.7 (2.6)	2.6 (0.1)	2.7 (0.1)	0.4 (0.04)	0.2 (0.01)
12-BSC	45.3 (1.8)	25.5 (1.2)	2.1 (0.1)	1.5 (0.1)	0.2 (0.007)	0.1 (0.006)



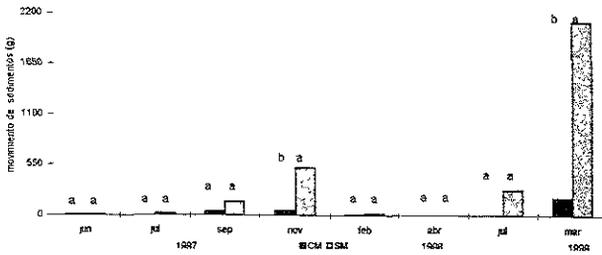


Figura 3.2 Dinámica estacional de la pérdida de suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM). Las letras distintas indican diferencias significativas $p<0,05$

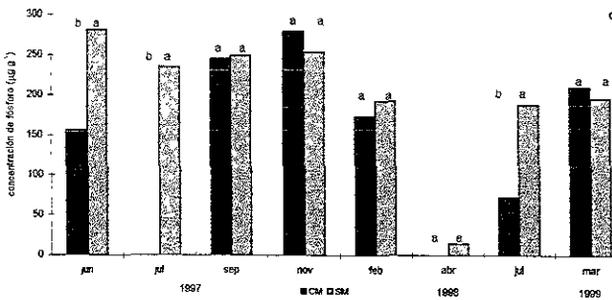
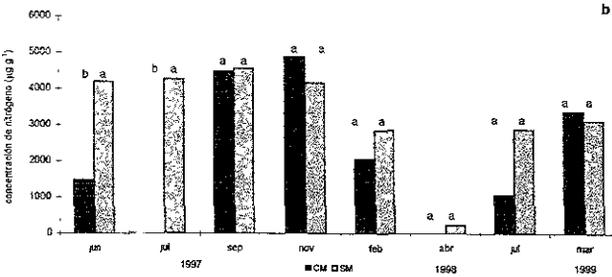
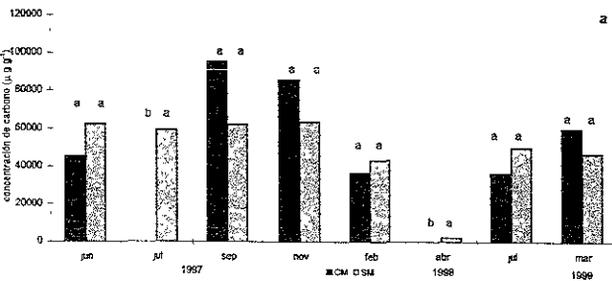


Figura 3.3 Dinámica estacional de la concentración de nutrientes totales en los sedimentos del suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM). a) concentración de carbono, b) concentración de nitrógeno y c) concentración de fósforo. Las letras distintas indican diferencias significativas $p<0,05$

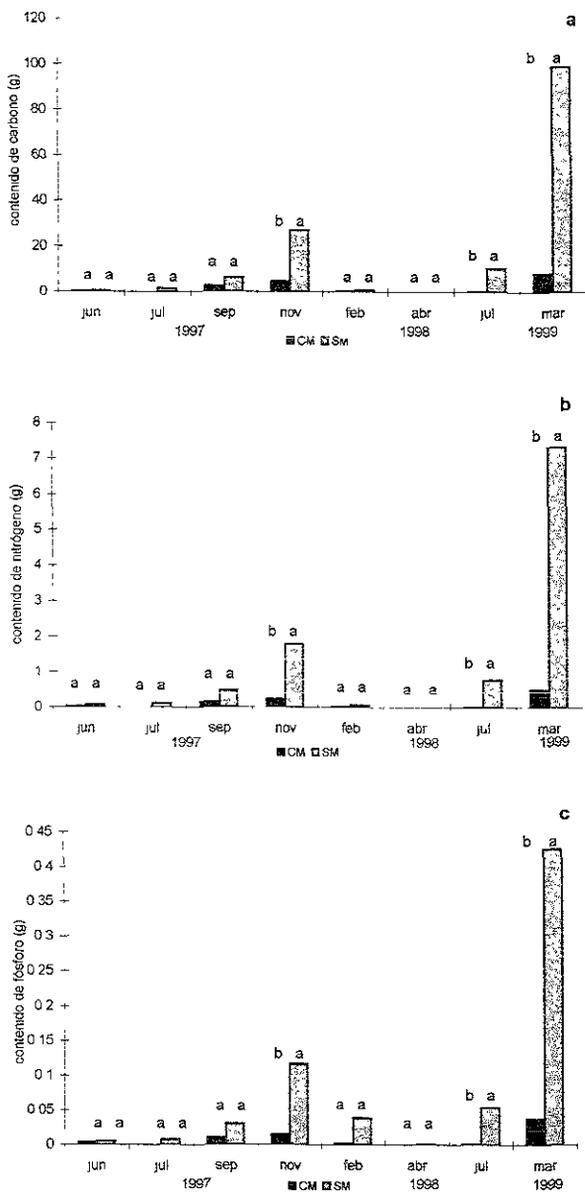


Figura 3.4 Dinámica estacional de la pérdida de nutrientes en los sedimentos del suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM): a) carbono total, b) nitrógeno total y c) fósforo total. Las letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.05$.

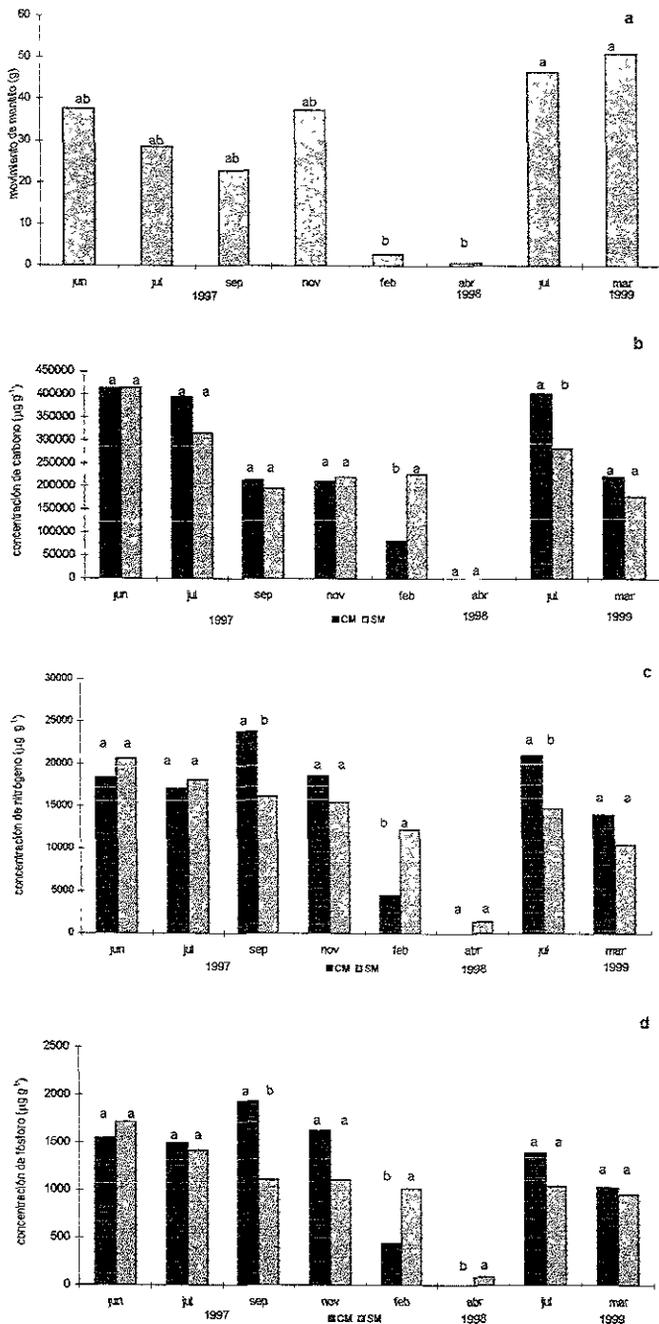


Figura 3.5 Patrón temporal del movimiento y concentración de nutrientes totales en el manto: a) movimiento de manto, b) concentración de carbono por tratamiento, c) concentración de nitrógeno por tratamiento y d) concentración de fósforo por tratamiento. CM- tratamiento con manto, SM- tratamiento sin manto. Las letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.05$.

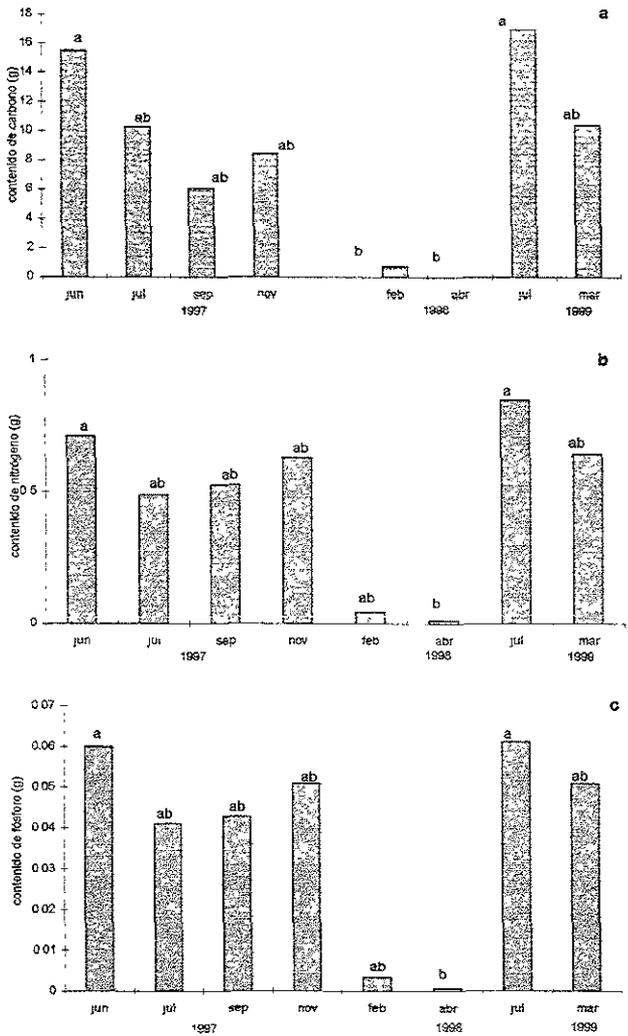


Figura 36 Patrón temporal del contenido de nutrientes en el manto: a)carbono total, b) nitrógeno total y c) fósforo total. Las letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.05$.

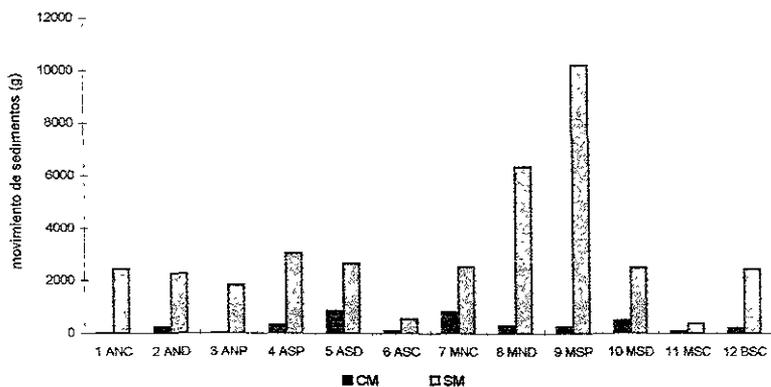


Figura 3.7 Variación espacial de la pérdida total de suelo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM) Las letras indican. A- piso alto, M-piso medio, B- piso bajo, S- orientado al sur, N-orientado al norte, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera.

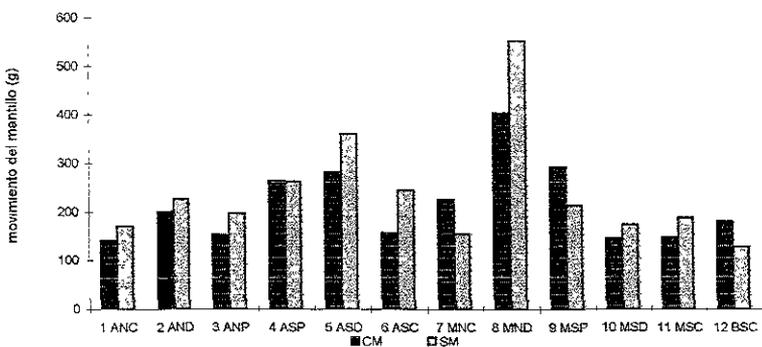


Figura 3.8 Variación espacial del movimiento total del mantillo en el tratamiento con mantillo (CM) y el tratamiento sin mantillo (SM) Las letras indican: A- piso alto, M-piso medio, B- piso bajo, S- orientado al sur, N-orientado al norte, C-superficie cumbre, D-dorso, P-pie de ladera

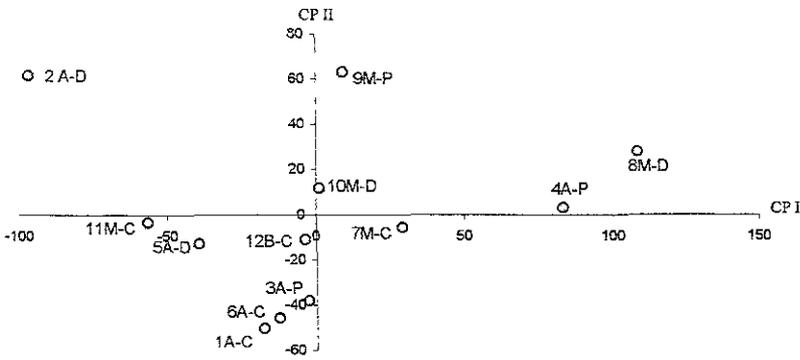


Figura 3.9 Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de pérdida de suelo en 12 sitios bajo el tratamiento con mantillo. Porcentaje de varianza explicada CP I 68% y CP II 30% Las letras indican A- piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, C-superficie cumbrial, D-dorso. P-pie de ladera

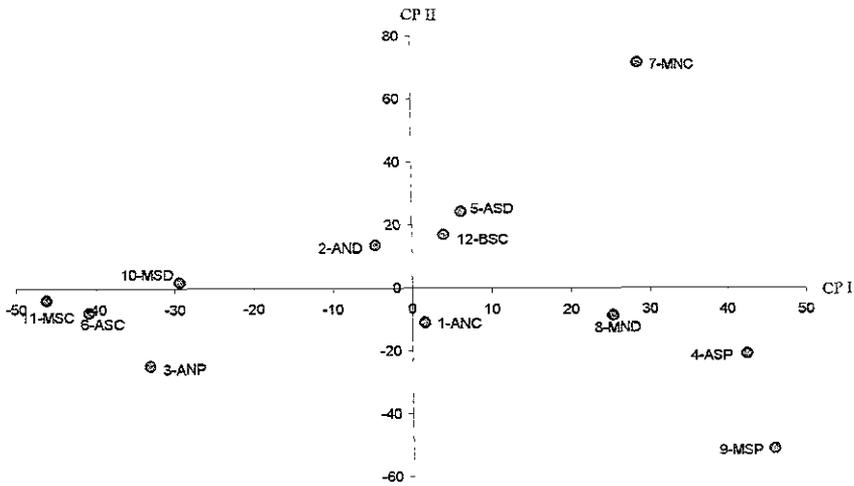


Figura 3.10. Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de movimiento de mantillo en 12 sitios bajo el tratamiento con mantillo. Porcentaje de varianza explicada CP I 41% y CP II 37%. Las letras indican: A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-orientado al norte, S-orientado al sur, C-superficie cumbrial, D-dorso. P-pie de ladera

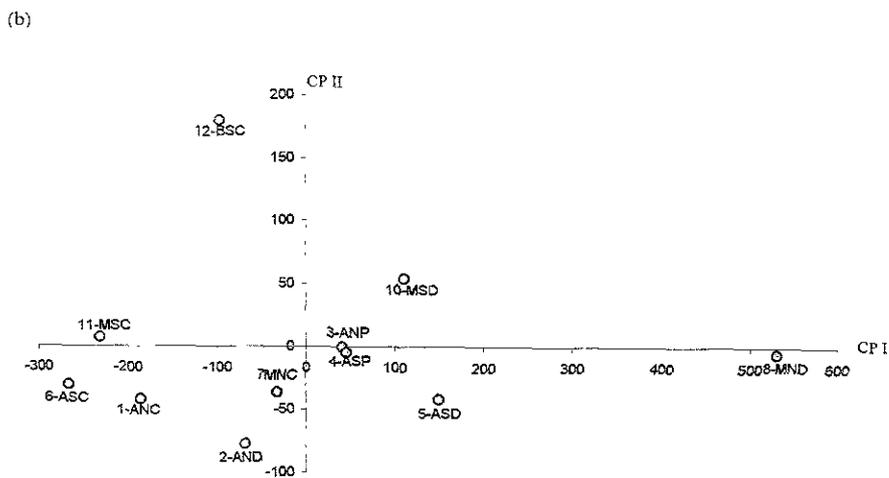
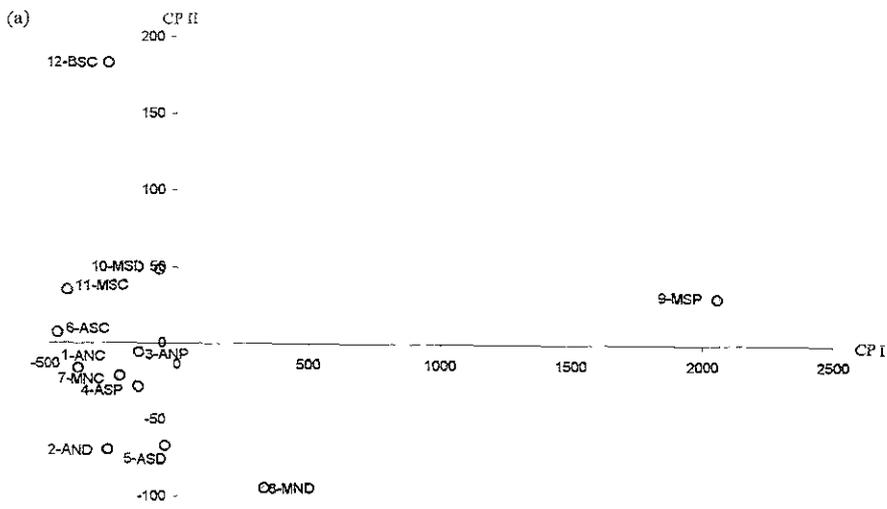


Figura 3 11 a) Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de pérdida de suelo en 12 sitios bajo el tratamiento sin mantillo. Porcentaje de varianza explicada CP I 98% y CP II 1%, b) Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos de pérdida de suelo en 11 sitios bajo el tratamiento sin mantillo en el periodo 1997-1999. Porcentaje de varianza explicada CP I 86% y CP II 8%. Las letras indican: A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-orientado al norte, S-orientado al sur, C-superficie cumbrial, D-dorso, P-pie de ladera.

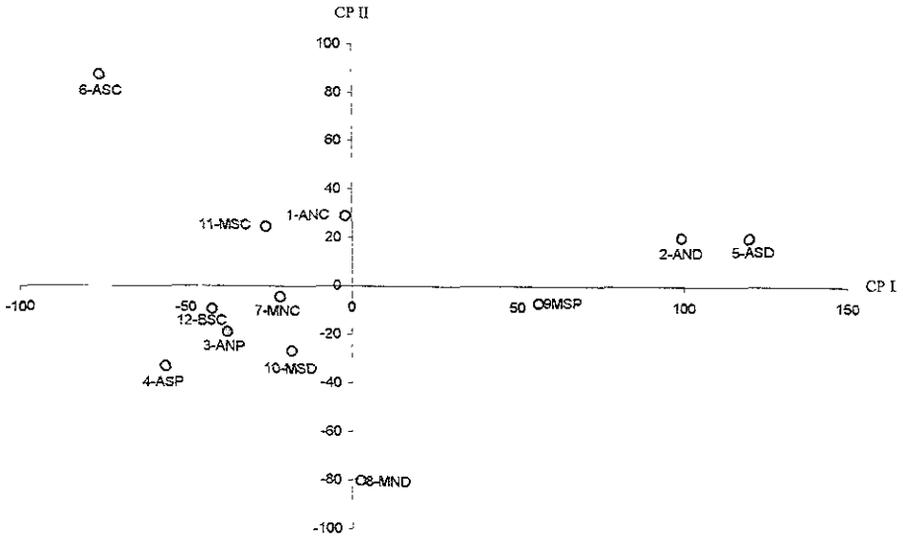


Figura 3 12 Ordenamiento espacial con análisis de componentes principales para los datos del movimiento de mantillo en 12 sitios bajo el tratamiento sin mantillo. Porcentaje de varianza explicada CP I 56% y CP II 25%. Las letras indican: A-piso alto, M-piso medio, B-piso bajo, N-orientado al norte, S-orientado al sur, C-superficie cumbral, D-dorso P-pie de ladera.

4.1 DISCUSIÓN GENERAL

La dinámica estacional del sistema y la variación de la precipitación entre años permitieron evaluar el funcionamiento biogeoquímico del suelo con patrones de lluvia contrastantes. Las variaciones entre años en la cantidad y la distribución de la precipitación afectaron el patrón temporal de los nutrientes en el suelo. En 1997 con una precipitación típica en cantidad y distribución, los pulsos de mineralización e inmovilización de nutrientes se presentaron al interior de la estación húmeda. Sin embargo, en el año de 1998 la distribución de las lluvias permitió que la concentración de Ct, Cmic y Nmic al interior de la época húmeda fuera mayor que en la época seca. La concentración de Nt y la concentración de NH_4^+ y NO_3^- en el suelo presentó variaciones estacionales como resultado de la desnitrificación y lixiviación o por la captura por las plantas (Groffman et al. 1993, Turner et al. 1997).

La dinámica estacional de la pérdida de sedimentos no presentó diferencias entre años. Los meses de mayor producción de sedimentos en ambos años correspondieron al final de la época de lluvias representando hasta el 88% de la pérdida total de sedimentos presente en el año acorde a la cantidad de precipitación, así como al efecto de la humedad antecedente del suelo. Asimismo, estos meses del final de la época húmeda fueron los que presentaron diferencias entre tratamientos. La variación estacional en el contenido de Ct, Nt y Pt en el suelo siguió los cambios estacionales en el sistema, en donde los meses finales de cada período (noviembre 1997 y marzo 1999) presentaron la mayor pérdida de estos nutrientes, explicados básicamente por la cantidad de sedimentos transportados. La concentración y el contenido de nutrientes en el mantillo mostró un comportamiento acoplado a la pérdida de masa como resultado del proceso de descomposición.

En el presente estudio, la heterogeneidad espacial del paisaje afectó no solo la distribución de los nutrientes en el suelo sino también su dinámica. El hecho de que los factores biogeoquímicos muestren una respuesta significativa a las unidades del relieve puede implicar una distribución zonal a la escala considerada, en donde la distribución espacial de los nutrientes en el suelo así como del proceso de erosión siguen la estructura jerárquica del relieve. Estas unidades pueden ser consideradas como unidades de respuesta biogeoquímica con diferente nivel de especialización, con una tendencia a aparecer en zonas definidas por combinaciones de variables topográficas. El ambiente físico depende en gran parte de las diferencias de los parámetros hídricos que

controlan el movimiento de agua en una pendiente así como de la distribución del agua en el suelo, la cual está fuertemente relacionada al relieve. Asimismo, la topografía es un factor importante que afecta la distribución y características de los suelos. Los procesos que ocurren en las posiciones altas frecuentemente influyen en las características y condiciones del suelo en las posiciones bajas.

La efectividad de la presencia del mantillo como un mecanismo eficiente de protección contra la erosión se reduce cuando aumenta la inclinación de la pendiente como resultado de la interacción entre la inestabilidad y susceptibilidad de los sitios. Haciendo necesario considerar la importancia de la cobertura del dosel no solo como protector contra el impacto directo de la lluvia, sino también como un medio para estabilizar las partículas del suelo por el efecto de las raíces, además de la cantidad y calidad del material vegetal depositado. Lo cual sin duda influye la interacción suelo-planta.

La dinámica espacial de la pérdida de sedimentos fue espacialmente heterogénea y dependiente del tratamiento. El hecho de que en el tratamiento con mantillo no se observara un patrón relacionado con la estructura jerárquica del relieve sugiere que la capa del mantillo produjo cambios en los patrones de pérdida de sedimentos al modificar las variables que las controlan. Esto queda más claro si observamos que en el tratamiento sin mantillo, sí se observó un patrón relacionado con la estructura jerárquica del relieve. Los sitios ubicados en la superficie cumbre se separaron de los sitios ubicados en el dorso y pie de ladera, sugiriendo que operan diferentes procesos al interior de la ladera. Las zonas de superficie cumbre son afectadas por erosión laminar y el efecto de "salpicadura" por el impacto directo de las gotas de lluvia, mientras que en los sitios en dorso y pie de ladera, el efecto es por gravedad, afectado por el ángulo de la pendiente y la forma o microforma de la ladera.

No obstante que los mecanismos específicos que determinan los patrones de la variabilidad temporal y espacial difieren substancialmente, emergen patrones generales. En cada sitio, la variabilidad de por lo menos un subgrupo de los parámetros fue asociado con procesos particulares del paisaje a cada jerarquía: por ejemplo, a nivel de piso altitudinal los parámetros importantes fueron el almacén de MOS, el porcentaje de humedad, la tasa de descomposición y la productividad.

La falta de un patrón espacial evidente para la concentración de nutrientes en el mantillo sugiere que para encontrar dicho patrón es necesario integrar la heterogeneidad

espacial de la composición de especies, por que éstas influyen diferencialmente en la contribución de la hojarasca al mantillo determinando su composición, calidad y producción.

Los patrones de variabilidad que observamos pueden ser solo un subgrupo de posibles patrones. Los patrones que se encuentran en un sistema dependen de la escala de observación (Levin 1992). Puede esperarse entonces que los factores que controlan la heterogeneidad puedan también variar con la escala, las observaciones hechas con diferentes escalas espaciales y temporales pueden o no seguir el mismo patrón.

4.2. LITERATURA CITADA

- Groffman, P. M., C. W. Rice, y J. M. Tiedje. 1993. Denitrification in a tallgrass prairie landscape. *Ecology* **74**:855-862.
- Levin, S. A. 1992. The problem of pattern and scale in ecology. *Ecology* **73**:1943-1967.
- Turner, C. L., J. M. Blair, R. J. Scharz y J. C. Neel. 1997. Soil N and plant responses to fire, topography and supplemental N in tallgrass prairie. *Ecology* **76**:1832-1843.