

EFEECTO DE LA POSICIÓN EN LA PENDIENTE SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE TRES SECUENCIAS DE SUELOS EN AMBIENTES ÚSTICOS DE COSTA RICA^{1/}

Freddy Sancho^{2/}, Mario Villatoro*

Palabras clave: pendiente, suelos, productividad, ambientes ústicos, Costa Rica.

Keywords: slope, soils, productivity, ustic environments, Costa Rica.

Recibido: 30/09/05

Aceptado: 07/03/06

RESUMEN

Se determinó el efecto de la posición en la pendiente sobre la productividad de suelos en pendientes de tipo compleja. A lo largo de la pendiente se fijaron 4 posiciones, una en la parte superior, 2 a lo largo de la parte media (de mayor inclinación) y otra al pie donde ocurre deposición de sedimentos. Con este fin, se seleccionaron 3 paisajes en las cercanías del Valle Central de Costa Rica: Guachipelín, Rodeo y Puriscal. Los suelos clasificaron como Andic Dystrustepts, Entic Udic Haplusterts, Udic Haplusterts y Typic Haplustands en Guachipelín; Andic Dystrustepts, Typic Dystrustepts y Humic Haplustands en Rodeo y Typic Haplohumults y Andic Haplohumults en Puriscal. Se realizó una caracterización físico-química de los suelos y se sembró maíz (*Zea mays*) durante 2 ciclos de cultivo, evaluando el rendimiento de grano a la cosecha y la producción de biomasa seca 69 días después de la siembra en las 4 posiciones a lo largo de la pendiente. El análisis de varianza solo mostró diferencias entre posiciones en Puriscal. Se realizó una combinación de análisis de varianza de los 3 paisajes y hubo diferencia ($p \leq 0,01$) entre posiciones. Las posiciones lineales, en donde la pendiente era mayor, presentaron

ABSTRACT

Effect of the slope position on productivity of three soil sequences in ustic environments of Costa Rica. The effect of the position on the slope position on soil productivity was determined for complex slope types. Along the slope 4 positions were selected, one in the highest position, two along the middle part (more inclination) and another at the foot, where sediments accumulate. With this goal, three landscapes were selected in the proximities of the Central Valley of Costa Rica: Guachipelín, Rodeo, and Puriscal. The soils classified as Andic Dystrustepts, Entic Udic Haplusterts, Udic Haplusterts, and Typic Haplustands in Guachipelín; Andic Dystrustepts, Typic Dystrustepts, and Humic Haplustands in Rodeo; and Typic Haplohumults and Andic Haplohumults in Puriscal. A physical-chemical soil characterization was carried out and corn (*Zea mays*) was planted during 2 crop cycles, evaluating the grain yield and the dry biomass 69 days after planting, in the 4 positions along the slope. The ANOVA only showed differences among positions in Puriscal. A combine ANOVA was carried out for the 3 landscapes and there was a highly significant difference for the positions.

1/ Este trabajo forma parte de la tesis de MSc. del segundo autor. Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Universidad de Costa Rica. San Jose, Costa Rica.

2/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: fsancho@cia.ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

el menor rendimiento mientras que en promedio la posición deposicional presentó el mayor rendimiento.

The backslope middle part presented the smallest yield while on the average the toe slope had the highest yield.

INTRODUCCIÓN

La productividad de un suelo está influenciada por varios factores, siendo la erosión uno de los más importantes. La erosión de suelos además de remover el material superficial rico en materia orgánica y nutrimentos, también altera otras propiedades debido a la pérdida de arcillas, la disminución de la profundidad efectiva del suelo, la capacidad de retención de agua, y por la degradación de la estructura del suelo (Schertz *et al.* 1984, Lal 1987, Young *et al.* 1985, Tenberg *et al.* 1997). Otros factores que influyen en la productividad de un suelo son el manejo del mismo y el clima (Schertz *et al.* 1984).

La cuantificación de la relación entre la erosión y la productividad se dificulta por la gran diversidad de los suelos tropicales y la falta de estudios sobre el fenómeno. El efecto de la erosión en los suelos varía según el tipo de suelo, tanto a causa de las propiedades intrínsecas de este como por las externas, tal es el caso de la topografía, la cobertura, el clima y el manejo (FAO 2000). Según Daniels *et al.* (1987), muchas investigaciones relacionadas con la productividad de suelos y la erosión han estado basadas en 2 suposiciones: 1. todas las propiedades de los paisajes experimentales eran similares cuando fueron sembradas por primera vez; y 2. la productividad de los paisajes fue uniforme mientras no ocurría erosión. Los mismos autores afirman también que ambas suposiciones son usualmente falsas, debido a que las propiedades de los suelos son muy variables en los paisajes, lo cual ha sido confirmado por otros autores (Kravchenko y Bullock 2000, Langdale 1979, Poudel *et al.* 1999 y Tenberg 1997).

Poudel *et al.* (1999), afirman que los efectos negativos de la erosión son más fuertes y rápidos

en suelos de pendiente, por lo que consideran que este fenómeno es la mayor limitante a la sostenibilidad de los sistemas vegetales en tierras de pendiente. El efecto positivo se presenta en los suelos al pie de la pendiente, que se enriquecen más conforme la erosión aumente y por ende la producción es mayor en esta posición deposicional. Kravchenko y Bullock (2000), observaron este mismo fenómeno en algunos Molisoles de Illinois y Alfisoles de Indiana en EE.UU.

Cuando la erosión es tan fuerte que provoca la remoción completa del horizonte superficial, los efectos sobre el suelo y la productividad son muy obvios, pero con reducciones leves del mismo horizonte el efecto no puede ser reconocido por algunos años (Schertz *et al.* 1984).

Una revisión comprensiva de los métodos utilizados para evaluar el efecto de la erosión de suelos sobre la productividad, ha sido realizada por Stocking (1984), Lal (1987) y Pierce (1991). La remoción artificial de diferentes capas de suelo ha sido usada en numerosos experimentos. Sin embargo, las condiciones de suelo creadas con las remociones manuales, difieren de las condiciones naturales, debido a que la erosión natural generalmente es poco uniforme por la formación de surcos y cárcavas, no se toma en cuenta que la erosión remueve partículas selectivamente de acuerdo a su tamaño y que la labranza continua promueve una mezcla de materiales de la superficie con los horizontes subyacentes. Los estudios realizados a nivel de finca, con suelos sometidos a diferentes niveles de erosión, tienen la ventaja de que representan condiciones típicas, el cultivo está creciendo sobre todo el campo y no sólo en pequeñas parcelas (Meyer 1985). Por otro lado, si realmente queremos valorar de una manera amplia el efecto de la erosión, y no sólo la pérdida de suelo, es necesario

también evaluar la influencia que se ejerce en las zonas de deposición de sedimentos sobre la producción de cultivos.

Los primeros trabajos documentados de pérdida de producción se dan a finales de los años 30 y a inicios de los 40. Desde entonces, se reportaron diversos trabajos del efecto de la erosión sobre la productividad de los suelos en varios estados de EE.UU. Estos estudios mostraron una disminución de la materia orgánica (MO) y de la producción a causa de la erosión, trabajos que fueron respaldados por diversos experimentos de remoción de suelo (Schertz *et al.* 1984).

Sharader *et al.* mencionados por Schertz *et al.* (1984) y Lo (1989), encontraron que mediante la adición de fertilizantes y de un manejo adecuado, los suelos muy deteriorados por la erosión podían recuperar la producción. Por este motivo, en numerosas ocasiones sigue siendo difícil cuantificar el efecto de la erosión ya que el avance tecnológico como el uso de fertilizantes, el mejoramiento genético de plantas y el manejo, enmascaran las disminuciones significativas en productividad, causadas por la erosión del suelo (Kraus y Allmaras 1982, Landsgale y Shrader 1982, Young *et al.* 1985, Barber 1999). No obstante, hoy se reconoce que las relaciones erosión-productividad son muy complejas debido a que involucran diversos aspectos de las relaciones entre el suelo y la planta, así como su manejo bajo climas muy variables (Meyer *et al.* 1985, Lal 1987, Fryrear 1990, Pierce y Lal 1994, Cassel y Pierce 1991). Pero Stone *et al.* (1985), afirman que la posición en la pendiente y la erosión no son

mutuamente excluyentes, por lo que muchos de los datos publicados, relacionados con el efecto de la erosión en la productividad de los suelos, son confundidos con el efecto de la posición en la pendiente en la erosión del suelo.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la posición en la pendiente sobre la productividad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 3 paisajes ubicados en Guachipelín en el Cantón de Escazú, en El Rodeo en el Cantón de Mora, y en Mercedes Sur del cantón de Puriscal. La ubicación y características de los paisajes se detallan en el cuadro 1. Los paisajes seleccionados se ubicaron en las proximidades del Valle Central de Costa Rica, en áreas agrícolas donde la vegetación natural fue removida mucho tiempo atrás y el tipo de actividad agropecuaria ha estimulado el proceso de erosión. La ubicación aproximada de los paisajes se presenta en la figura 1.

Una de las características principales de los paisajes es que presentan un tipo de pendiente denominada compleja o convexa cóncava (Figura 2), la cual se caracteriza por tener una zona plano convexa en la parte superior de la pendiente (posición cima), la cual presenta erosión leve; otra zona de mayor pendiente en la parte media (posiciones lineal alta y lineal baja), donde ocurre la mayor erosión; y una zona plano cóncava en la parte inferior (posición base), que es la zona de deposición por efecto de la erosión

Cuadro 1. Descripción de las localidades seleccionadas para el estudio de impacto de la erosión en la productividad del suelo.

Localidad	Guachipelín	Rodeo	Puriscal
Cantón	Escazú	Mora	Puriscal
Coordenadas geográficas	9° 57' N; 84° 10' O	9° 55' N, 84° 18' O	9° 50' N, 84° 20' O
Pendiente (%)	11	9	22
Zona de vida	bosque húmedo premontano	bosque húmedo tropical	bosque muy húmedo premontano
Altitud (msnm)	± 965	± 500	± 950

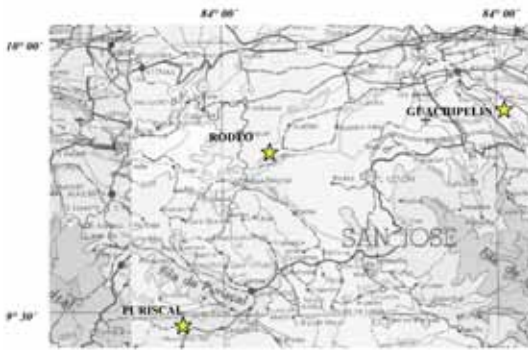


Fig. 1. Ubicación de los 3 paisajes utilizados para el experimento.

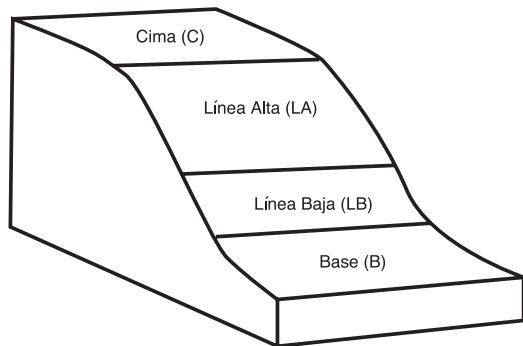


Fig. 2. Representación generalizada de un paisaje de pendiente compleja (Modificado de Jones *et al.* 1989).

a lo largo de la pendiente. Este tipo de pendiente permite evaluar diferentes estados de erosión tal y como lo recomiendan Olson *et al.* (1984) y Ferrens *et al.* (1985).

En cada uno de los paisajes se realizó un levantamiento topográfico detallado creando una cuadrícula cada 10 m cuyo resultado se muestra en la figura 3. En esta misma figura se muestran las 4 posiciones experimentales: Cima (C), Lineal alta (LA), Lineal Baja (LB) y Base de pendiente (B). En forma similar a este experimento, fueron evaluadas posiciones muy similares en otros paisajes por Brubaker *et al.* (1993) y Afyuni *et al.* (1993).

La pendiente en cada uno de los paisajes consistió de un área aproximada de 1600 m² (20 m de ancho x 80 m de largo).

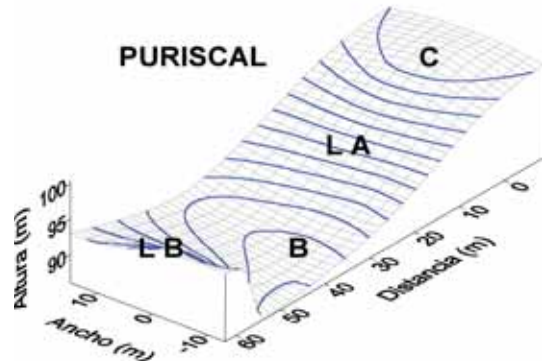
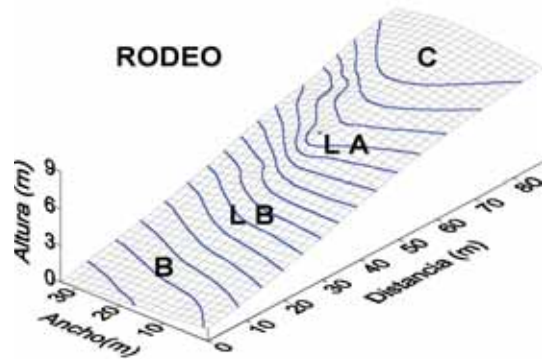
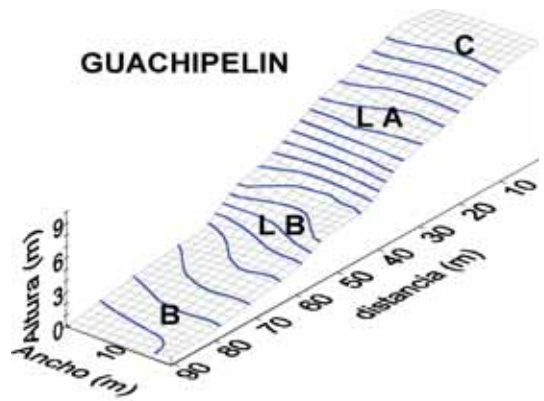


Fig. 3. Topografía de pendiente compleja utilizada para la evaluación de la producción de maíz. Las letras C, LA, LB y B indican posiciones en las cuales se realizaron las evaluaciones.

Durante los años 1997 y 1998 se sembró maíz amarillo (*Zea mays*) híbrido HG-4, a una distancia de siembra de 0,35 m entre plantas y 0,9 m entre hileras, se colocaron 2 semillas por golpe, para una densidad de siembra inicial de aproximadamente 51000 plantas ha⁻¹ asumiendo un 80%

de germinación. Se sembró el maíz siguiendo las curvas en contorno.

A los 69 días después de la siembra (DDS) se tomó una submuestra de plantas de maíz en 5 m de hilera por unidad experimental para obtener algunos indicadores de crecimiento tales como: altura de planta, diámetro basal, biomasa aérea (seca) y área foliar pero solamente para el ciclo de 1997. En 1998 además de la cosecha se midió solamente la biomasa (seca) a los 69 DDS. A la cosecha (aprox. 120 DDS) se determinó la biomasa total (en 1998) y el rendimiento de grano con un 12% de humedad (en ambos ciclos).

En cada uno de los paisajes se tomó muestras de suelo a profundidades de 0-20 y 20-40 cm en cada una de las posiciones dentro del paisaje, siguiendo el esquema de la figura 3. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de análisis de suelos del CIA, UCR, secadas en un horno de flujo de aire a 60°C, molidas y pasadas a través de una malla de 2 mm. El pH del suelo fue medido en H₂O con una relación 1:2,5 y el carbono orgánico fue determinado por digestión húmeda, siguiendo el método modificado de Walkey y Black (Nelson y Sommers 1982). El P disponible fue extraído con la solución Olsen modificado y determinado por colorimetría. Ca, Mg, K y Na intercambiables fueron extraídos con NH₄OAc a pH 7 y los cationes en el lixiviado fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica. El Al intercambiable y la acidez total fueron determinados con extracciones de KCl 1M (Thomas 1982). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue determinada por saturación con NH₄OAc a pH 7 y subsecuente reemplazo de NH₄⁺ con extracciones de KCl. El NH₄ fue determinado por colorimetría de flujo de inyección.

Para la caracterización física se tomaron en el campo cilindros de suelo de 48 mm de diámetro interno y 65 mm de longitud. Estos fueron utilizados para medir la densidad aparente y la conductividad hidráulica. La textura se determinó por el método de Bouyoucus,

pero las muestras no fueron secadas al aire para evitar la formación de pseudoarenas en el caso de los suelos con propiedades volcánicas, así que posteriormente se hizo la corrección según el contenido de humedad. La retención de humedad -0,03, -0,1, -0,3, -0,5 y -1,5 MPa se determinó en ollas de presión mediante el uso de anillos de 48 mm de diámetro interno y 10 mm de altura con suelo no disturbado (Klute 1986).

En cada una de las posiciones a lo largo de los paisajes se hizo una calicata para describir el perfil del suelo (Cuadros 2 y 3). Con estas descripciones se procedió con la clasificación taxonómica según el sistema del USDA (2006).

El diseño experimental fue irrestricto con 3 repeticiones en cada una de las variables en ambos ciclos y la posición en la pendiente como único factor. Se promediaron las producciones de grano y de biomasa de ambos ciclos (1997-1998) en cada uno de los paisajes. Se realizó un análisis de varianza en cada uno de los paisajes y luego se combinaron estos análisis como si fuesen datos de series de experimentos similares. El nivel de α siempre fue de 0,05 para todos los casos.

En el caso de los resultados de los análisis químicos y físicos, como no se podían aleatorizar las posiciones en la pendiente y las muestras tomadas en cada posición no podían ser utilizadas como réplicas, no se les hizo ningún análisis estadístico al igual que lo hicieron Olson y Nizeyimana (1987), Jones *et al.* (1989), Brubaker *et al.* (1993) y Afyuni *et al.* (1993).

Otros investigadores (White *et al.* 1984 y Gilliam *et al.* 1984), unieron los datos de los paisajes como si estos fuesen bloques, ya que los suelos son taxonómicamente muy parecidos, y es comprensible una respuesta similar, considerando que el manejo y el clima no se diferenciaban mucho. En el caso de este experimento cada paisaje se consideró como un experimento individual.

Cuadro 2. Horizontes de cada pedón representativo de cada una de las posiciones a lo largo de la pendiente en cada uno de los paisajes utilizados.

Paisaje	Clasific. Taxon.	Posición										
		Cima		Lineal Alta			Lineal Baja			Base		
		Horizonte	Prof. (cm)	Clasific. Taxon.	Horizonte	Prof. (cm)	Clasific. Taxon.	Horizonte	Prof. (cm)	Clasific. Taxon.	Horizonte	Prof. (cm)
Guachipelín	Andic Dystrustepts	Ap	40	Entic Udic Haplusterts	Ap	17	Udic Haplusterts	Ap	12	Typic Haplustands	Ap	15
		AB	57		Bw	50		2A	57		AB	38
		Bw	100		Bss	115		2B	80		B	93
		C	140		C	150+		2BC	110		2A	120
							2C	112+		2B	120+	
Rodeo	Andic Dystrustepts	Ap	12	Andic Dystrustepts	Ap	22	Typic Dystrustepts	Ap	12	Humic Haplustands	Ap	15
		AB	30		Bw	42		Bw	60		A	35
		Bw	60		Bg	80		BCg	90		AB	50
		Bg	90		BC	120+		C	120+		B1	82
		BC	130+								B2	82+
Puriscal	Typic Haplohumults	Ap	17	Typic Haplohumults	Ap	24	Typic Haplohumults	Ap	20	Andic Haplohumults	Ap	26
		AB	30		Bt1	67		Bt1	60		AB	44
		Bt1	64		Bt2	110+		Bt2	105		Bt1	75
		C	64+					C	105+		Bt2	130+

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades de los suelos en los transectos

Paisaje Guachipelín

El paisaje Guachipelín se caracteriza por haber recibido adiciones recientes de cenizas volcánicas, las cuales son las que principalmente han sido sometidas a los procesos de erosión y deposición. Así, el perfil ubicado en la parte más alta de la pendiente (posición

cima) clasificó como Andic Dystrustepts y se caracterizó por tener una capa de aproximadamente de 40 cm de suelo con propiedades ándicas, esto es baja densidad aparente ($<0,9 \text{ g cm}^{-3}$), alta retención de P y un contenido de Al más la mitad del Fe extraído con oxalato de amonio $>2\%$. Los suelos en las posiciones lineales del paisaje (LA y LB) presentan horizontes superficiales de menor grosor, descansando sobre un antiguo suelo Vertisol. Por esta razón, estos suelos muestran horizontes en el subsuelo con un alto contenido

Cuadro 3. Características físicas de los transectos en Guachipelín, Rodeo y Puriscal a profundidades en el suelo de 0-20 y 20-40 cm.

Paisaje	Posic.	Prof. cm	da g cm ⁻³	Textura (%)			Textura	Retención de humedad (%)		
				a	L	A		1,5 MPa	0,03 Mpa	Agua Útil
Guachipelín	C	0-20	0,74	54	32	14	Fa	17,6	35,9	18,3
		20-40	0,77	46	27	27	FA	31,4	44,7	13,2
	L A	0-20	0,79	51	28	22	F	20,8	38,0	17,3
		20-40	0,81	55	27	18	Fa	25,7	40,5	14,8
	L B	0-20	0,94	39	23	37	FA	23,8	37,4	13,5
		20-40	0,87	38	22	40	AF	30,2	44,7	14,5
	B	0-20	0,88	54	27	19	Fa	24,8	37,5	12,7
		20-40	0,99	56	27	17	Fa	36,3	58,6	22,3
Rodeo	C	0-20	0,85	17	19	65	A	28,4	37,6	9,2
		20-40	1,13	10	19	71	A	39,3	45,3	5,9
	L A	0-20	1,03	12	21	67	A	32,7	40,5	7,8
		20-40	1,16	8	24	69	A	40,5	46,4	5,9
	L B	0-20	0,93	14	21	65	A	30,6	42,7	12,1
		20-40	0,99	7	23	70	A	33,7	41,9	8,3
	B	0-20	0,86	40	34	26	FA	30,1	46,2	16,1
		20-40	0,88	23	29	48	F	37,3	61,3	24,0
Puriscal	C	0-20	0,90	30	24	46	A	27,0	40,6	13,5
		20-40	0,93	21	21	58	A	34,1	40,9	6,8
	L A	0-20	1,04	26	27	47	A	33,1	45,4	12,3
		20-40	1,06	18	25	57	A	38,8	47,9	9,1
	L B	0-20	0,96	22	24	53	A	30,0	39,5	9,5
		20-40	0,88	18	22	60	A	30,0	39,0	9,1
	B	0-20	1,01	27	29	43	A	34,6	44,0	9,3
		20-40	0,84	25	29	46	A	32,4	46,1	13,7

Posic.= posición, Prof= profundidad, da=densidad aparente, F= Franco, A=Arcilla, a=arena, L=limo.

de arcillas, particularmente del tipo 2:1, que permiten la formación de superficies de rozamiento y la apertura de grietas que permanecen durante toda la estación seca. Por el poco grosor de las capas volcánicas, las propiedades del mismo están definidas básicamente por los materiales arcillosos del

suelo clasificando así como Udic Haplusterts. Los materiales volcánicos removidos de las posiciones superiores fueron depositados en el pie de monte (base). Por esta razón, se observaron propiedades ándicas a profundidades mayores de 1,20 m y el suelo se clasificó como Typic Haplustands.

Los suelos de este paisaje fueron formados sobre posiciones depresionales antiguas bajo un régimen de humedad ústico. Posteriormente por tectonismo, muchas de esas posiciones depresionales, en las cuales se formaron y acumularon grandes cantidades de arcillas del tipo 2:1, se convirtieron en terrenos de ladera (Bergoeing 1998). Este fenómeno marca una gran diferencia entre la fertilidad natural del suelo en Guachipelín con los otros paisajes estudiados.

En este paisaje a pesar de que existen diferencias en la génesis de los suelos, debida a la posición en la pendiente y la erosión, estas diferencias no son observadas con el análisis de las propiedades físicas hechas en muestras de 0-20 y 20-40 cm (Cuadro 3), por cuanto las diferencias reales se presentan a profundidades mayores. Quizás el único parámetro que muestra en algo el efecto de la erosión es el mayor contenido de arcillas en los suelos de la posición lineal baja.

Las propiedades químicas de los suelos de este paisaje (Cuadro 4) también se ven afectadas por la agricultura intensiva y la frecuente adición de fertilizantes, tanto químicos como orgánicos. Los contenidos de MO estuvieron altos (>5%) en todas las posiciones en ambos ciclos (Cuadro 4). Los niveles de P estaban bajos, lo cual es de esperar de un suelo volcánico por su alta capacidad de fijación, este tiende a ser mayor en las zonas erodadas, quizás por el movimiento superficial (en agua de escorrentía y partículas erodadas) como lo observaron Lal (1976), Stone *et al.* (1985) y De Boodt *et al.* (1979). Los niveles de K fueron altos en relación con el ámbito suficiente para suelos, el cual oscila entre 0,2 y 0,6 cmol(+) l⁻¹ y en ambos ciclos este ámbito se supera principalmente en los primeros 20 cm de suelo y en las posiciones de cima y lineal baja.

Las bases (Ca, Mg, K, Na) y la CIC estaban altas producto de la actividad agrícola. Por otro lado, la acidez es bastante baja y el pH es normal para suelos en producción y sin necesidad de aplicarle enmiendas.

Paisaje Rodeo

En los suelos del paisaje Rodeo también se presentó la influencia de cenizas volcánicas sobre antiguos suelos bastante meteorizados y de baja fertilidad. Así, las 2 primeras posiciones (cima y lineal alta) presentaron horizontes superficiales con propiedades ándicas que les permite clasificarse como Andic Dystrustepts. El suelo en la posición lineal baja, por efecto de la erosión ya perdió esta capa de materiales volcánicos y clasificó como Typic Dystrustepts. Por el contrario, todos los materiales erosionados se han depositado en la base de la pendiente y por esta razón el pedón típico en este sector tiene propiedades ándicas y un alto contenido de MO en más de 1 m de profundidad y clasificó como Humic Haplustands.

La evaluación de las propiedades físicas en los primeros 40 cm del suelo permitió la diferenciación entre las posiciones de cima, lineal alta y lineal baja de la posición de la base. Esta última presentó una menor densidad aparente, menor contenido de arcillas y mayor capacidad de retención de humedad. La menor adición de fertilizantes químicos u abonos orgánicos, que ha caracterizado la agricultura en este paisaje, permitió observar diferencias en las propiedades químicas evaluadas. Los contenidos de P aumentaron en forma general conforme se desciende a la zona de deposición, lo cual se puede atribuir a un movimiento de partículas de suelo por escorrentía a favor de la pendiente favoreciendo la acumulación de este en la base. Esta posición mostró un mayor contenido de MO (Cuadro 4), Ca, Mg, capacidad de intercambio y una menor acidez en ambos ciclos. Esto podría explicarse por el efecto de acumulación de nutrimentos en esta posición.

Paisaje Puriscal

El paisaje de Puriscal por su ubicación geográfica ha sido menos influenciado por la actividad volcánica de la Cordillera Central, no obstante hasta aquí también llegaron las nubes

Cuadro 4. Algunas características químicas seleccionadas para los suelos de los paisajes estudiados. Los muestreos se realizaron a 2 profundidades (0-20 y 20-40 cm) al inicio de la siembra durante 1997 y 1998.

Paisaje	Posic.	Prof. cm.	pH	N	MO	P	Ca	Mg	K	Acidez	Suma de bases	CIC.	Sat. acidez
				%	mg kg ⁻¹	cmol(+) l ⁻¹			%				
1997													
Guachipelín	C	0-20	5,8	0,67	11,3	5,9	9,6	1,9	1,37	0,26	13,50	45,05	2
		20-40	5,8	0,51	10,6	2,9	7,9	2,0	1,49	0,29	11,87	47,54	2
	L A	0-20	5,7	0,41	8,7	5,4	8,5	1,9	0,87	0,23	11,70	43,52	2
		20-40	6,0	0,35	7,9	3,6	6,5	1,2	0,75	0,26	8,85	39,82	3
	L B	0-20	5,6	0,31	7,5	5,9	12,4	3,2	1,79	0,29	17,88	45,07	2
		20-40	5,6	0,28	7,8	4,6	9,1	3,0	1,59	0,32	14,27	48,91	2
B	0-20	6,1	0,34	9,5	4,5	13,5	3,0	1,11	0,23	18,06	43,90	1	
	20-40	5,9	0,22	7,0	4,2	7,3	1,9	0,96	0,26	10,55	41,53	2	
Rodeo	C	0-20	5,3	0,12	4,1	5,5	3,0	0,8	0,52	0,44	4,61	24,51	9
		20-40	5,5	0,04	1,5	3,7	2,9	1,0	0,26	0,23	4,43	17,42	5
	L A	0-20	5,2	0,13	4,8	6,6	4,1	1,4	0,31	0,52	6,08	25,37	8
		20-40	5,2	0,02	1,5	4,4	2,5	0,8	0,22	0,35	3,79	19,71	8
	L B	0-20	5,2	0,13	5,2	8,9	3,9	0,9	0,45	0,61	5,53	25,71	10
		20-40	5,4	0,04	2,1	5,2	2,4	0,6	0,11	0,52	3,36	25,41	13
B	0-20	5,7	0,33	11,1	10,1	6,8	1,0	0,59	0,73	8,66	38,45	8	
	20-40	5,4	0,21	8,5	3,5	3,9	0,6	0,41	0,49	5,14	31,79	9	
Puriscal	C	0-20	5,3	0,23	5,8	8,8	4,9	3,5	0,93	0,32	9,55	28,05	3
		20-40	5,5	0,06	2,4	6,8	3,0	3,6	0,77	1,05	7,51	26,77	12
	L A	0-20	5,2	0,16	5,3	7,9	4,8	2,3	0,24	0,79	7,58	30,65	9
		20-40	5,1	0,08	2,5	5,8	6,0	1,4	0,06	1,02	7,66	29,34	12
	L B	0-20	5,0	0,17	5,5	3,1	4,4	1,6	0,12	2,04	6,30	30,34	24
		20-40	5,0	0,10	3,6	3,3	3,0	0,8	0,07	2,33	4,13	28,04	36
B	0-20	5,4	0,35	9,7	4,3	9,6	4,2	0,23	0,41	14,20	43,52	3	
	20-40	5,6	0,30	9,5	2,5	12,0	3,0	0,16	0,64	15,43	44,94	4	
1998													
Guachipelín	C	0-20	6,0		8,9	8,6	6,9	1,3	0,95	0,26	9,17	39,49	3
		20-40	6,0		11,3	0,8	5,2	1,1	0,57	0,32	6,85	52,51	5
	L A	0-20	6,0		8,7	4,9	6,7	1,3	0,81	0,31	8,92	42,05	3
		20-40	6,1		5,9	2,4	6,2	1,9	0,41	0,26	8,65	47,52	3
	L B	0-20	6,0		7,5	2,2	8,0	2,3	0,97	0,27	11,33	43,11	2
		20-40	6,0		5,4	4,8	6,4	2,0	0,91	0,31	9,42	48,35	3
B	0-20	6,3		5,3	4,7	7,8	2,5	0,83	0,19	11,18	39,71	2	
	20-40	6,2		9,6	5,7	6,2	1,6	0,59	0,31	8,41	46,76	4	
Rodeo	C	0-20	5,4		5,9	4,4	3,0	0,8	0,57	0,55	4,43	25,58	11
		20-40	5,5		3,5	5,9	2,3	0,6	0,39	0,29	3,32	19,96	8
	L A	0-20	5,2		5,4	2,4	2,4	0,9	0,49	0,58	3,88	24,05	13
		20-40	5,4		1,8	3,9	1,9	0,6	0,18	0,29	2,72	17,96	10
	L B	0-20	5,4		6,7	4,1	3,1	1,2	0,62	0,47	5,01	25,73	9
		20-40	5,2		4,5	3,3	2,1	0,7	0,25	0,64	3,05	22,40	17
B	0-20	5,5		11,1	13,0	3,8	1,2	0,74	0,56	5,81	37,50	9	
	20-40	5,3		13,7	5,7	3,9	0,9	0,22	0,61	5,06	46,00	11	
Puriscal	C	0-20	5,2		5,5	5,5	3,7	4,3	0,36	0,50	8,44	30,81	6
		20-40	4,8		3,4	4,9	2,0	2,2	0,24	2,32	4,48	23,15	34
	L A	0-20	5,3		6,6	5,9	4,0	2,1	0,11	0,82	6,36	32,88	11
		20-40	5,4		4,0	5,4	4,1	1,6	0,03	0,95	5,78	29,35	14
	L B	0-20	5,0		7,4	4,2	3,2	1,9	0,11	1,30	5,26	32,26	20
		20-40	5,1		3,6	3,0	2,8	1,1	0,35	1,98	4,38	28,86	31
B	0-20	5,3		6,6	4,8	6,2	4,3	0,30	0,31	10,91	40,73	3	
	20-40	5,5		7,4	2,7	6,9	2,9	0,24	0,29	10,11	43,67	3	

de ceniza volcánica, siendo en este caso cenizas de textura más ligera. Los suelos en general son muy meteorizados, con niveles muy bajos de bases cambiables y contenidos de arcilla altos. La presencia de horizontes argílicos con muy baja saturación de bases clasifica a estos suelos como Typic Haplohumults. Sólo en la posición inferior de este paisaje la redistribución por erosión de materiales volcánicos produce la acumulación de estos materiales en los horizontes superficiales de suelo clasificando como Andic Haplohumults.

En este paisaje la caracterización física de los primeros 40 cm del suelo permitió observar un menor contenido de arcillas en los suelos de las posiciones de cima y de base. La posición de cima no se diferenció físicamente, en forma clara, de las lineal alta y lineal baja, salvo que la capacidad de retención de agua de los primeros 20 cm fue muy alta, incluso similar a la de 20-40 cm de la posición de base.

Las mayores diferencias en propiedades químicas estuvieron relacionadas con una mayor concentración de MO y bases cambiables (Ca y Mg) en la posición de base, así como el afloramiento de capas de arcilla con una fuerte acidez en las posiciones lineal alta y lineal baja reflejadas también en el subsuelo de la posición de cima. El P estuvo ligeramente más alto en las posiciones de cima y lineal alta. El efecto de acumulación en la posición de base no se observó salvo en la MO, la cual es mayor en esta posición. No obstante, los contenidos de P estuvieron siempre por debajo de lo crítico (<10 ppm).

A pesar de que la fertilidad del suelo de Puriscal es mejor que la de Rodeo, el efecto de la pendiente y la erosión fue más severo. El agua al igual que en Rodeo se acumulaba más en la posición de base de pendiente, lo cual se observó en el campo cada vez que se visitaba los paisajes.

Al evaluar el efecto de la erosión sobre la productividad, resulta adecuado observar los cambios en las propiedades del suelo y la posición en la pendiente, ya que puede ser engañoso guiarse solo por la producción obtenida. Incluso algunos investigadores (Stone *et al.* 1985, Kravchenko y Bullock 2000), consideran que la posición en la

pendiente es un mejor parámetro para predecir la producción que la fase de la erosión. Si bien las posiciones en mayor pendiente están más propensas a la erosión, esta no ocurre homogéneamente en el suelo.

Al observar el cambio en el contenido de arcilla, a lo largo de la pendiente en cada uno de los paisajes (Cuadro 3), se observa que las posiciones donde hubo mayor pérdida de suelo (lineal alta y lineal baja) tienden a presentar un mayor contenido de esta. Probablemente debido al afloramiento de horizontes enterrados, los cuales han sido iluviados. En cuanto a la MO, por el contrario, tiende a ser menor en las partes erodadas (con pérdida de suelo) y mucho mayor en la zona de deposición, contrario a lo que otros investigadores encontraron (Stone *et al.* 1985), pero similar con resultados obtenidos por Schertz *et al.* (1984), Flörchinger *et al.* (1998); Martel y MacKensie (1980) en estudios muy similares.

El pH en los 3 paisajes tiende a ser mayor en la zona de baja erosión y de deposición, contrario a las zonas erodadas, debido quizás a un mayor lavado de bases en las zonas erodadas, lo cual se observa con mayor claridad en los paisajes de Rodeo y Puriscal. La CIC tiende a ser mayor en la zona de deposición, a excepción de Guachipelín donde más bien los valores fueron relativamente homogéneos a lo largo de la pendiente, lo cual se podría explicar por la relativa homogeneidad del suelo, en comparación con los otros paisajes. En cuanto a la capacidad de retención de agua, esta tiende a ser mayor en la zona de deposición, posiblemente a causa de la presencia de mayor cantidad de MO, lo cual ayuda a aumentar esta capacidad.

Rendimiento y biomasa de maíz

Las producciones de grano, medidas en las pendientes en los paisajes Guachipelín, Rodeo y Puriscal, se muestran en el cuadro 5. Además, se muestra las medias generales obtenidas de acuerdo a la posición en la pendiente.

El régimen de lluvias imperante en América Central durante 1997 y 1998, se caracterizó por la

Cuadro 5. Rendimiento de grano y biomasa seca de maíz en 4 posiciones a lo largo de la pendiente en 3 paisajes en Costa Rica (1997 y 1998).

Paisaje	Posición	Rendimiento (t ha ⁻¹)			Biomasa (t ha ⁻¹)		
		1997	1998	Media	1997	1998	Media
Guachipelín	C	2,78	3,94	3,36	3,63	2,82	3,23
	L A	2,44	4,27	3,35	5,89	3,45	4,67
	L B	3,86	5,06	4,46	5,23	3,51	4,37
	B	4,31	3,61	3,96	5,28	2,81	4,05
Rodeo	C	0,92	1,26	1,09	1,56	1,65	1,61
	L A	1,73	0,79	1,26	1,92	1,33	1,63
	L B	1,60	0,17	0,88	5,54	1,07	3,31
	B	2,72	3,14	2,93	3,01	2,74	2,88
Puriscal	C	1,62	2,50	2,06	1,11	2,61	1,86
	L A	0,08	0,14	0,11	0,38	0,85	0,62
	L B	0,01	0,13	0,07	0,26	0,73	0,49
	B	1,26	2,64	1,95	2,25	3,08	2,66
Media General	C	1,77	2,57	2,17	2,10	2,36	2,23
	L A	1,42	1,73	1,57	2,73	1,88	2,30
	L B	1,82	1,78	1,80	3,68	1,77	2,72
	B	2,76	3,13	2,95	3,51	2,88	3,19

influencia muy marcada del fenómeno conocido como “El Niño” o fenómeno ENOS (El Niño Oscilación del Sur). Las producciones de grano y biomasa variaron en gran medida por el efecto clima de un año a otro (Cuadro 5). La precipitación total durante 1997, no sólo fue menor al promedio sino que su distribución fue muy irregular. Para el año 1998, la lluvia alcanzó registros muy superiores a la media y se presentaron varias tormentas tropicales, incluyendo al huracán “Mitch” al final de la temporada lluviosa. Estas razones permiten explicar las diferencias, aunque no estadísticamente significativas, entre los rendimientos de maíz obtenidos en 1997 y 1998.

En otros estudios realizados en la franja maicera y al Este de EE.UU. la producción varió de un ciclo al siguiente, por efecto de diferencias en la precipitación y por ende del agua en el suelo. Este factor ya ha sido reportado por algunos autores como uno de los más importantes en la producción en condiciones de pendiente (Brubaker

et al. 1993, Stone *et al.* 1985, Hanna *et al.* 1982, Daniels *et al.* 1985).

Timlin *et al.* (1998), Stone *et al.* (1985) y Gantzer y McCarty (1987), determinaron que las propiedades del suelo correlacionaron mejor con la producción durante el ciclo seco que durante el de mayor precipitación, a pesar de que en este último el rendimiento fue más elevado. Esto indica que la precipitación influye en forma importante sobre la productividad ocasionando diferencias entre ciclos de cultivo.

Entre los 3 paisajes, se obtuvo mayor rendimiento de maíz y de biomasa en Guachipelín (Cuadro 5), lo cual es fácilmente explicado por la mayor tradición agrícola de la zona, con prácticas de adición de fertilizantes y abonos, además de ser un suelo relativamente profundo y de baja pendiente. No obstante no hubo diferencia en el rendimiento ni en la biomasa entre las posiciones en la pendiente. El Rodeo fue el segundo más alto en producción tanto de grano como de biomasa.

El comportamiento de acuerdo a la posición en cada paisaje se observa más claro en la figura 4.

A pesar de que en el paisaje del Rodeo no hubo diferencia significativa entre producción de grano y de biomasa en las posiciones, sí se presentó un comportamiento de producción más cercano a lo que se esperaría en una pendiente tipo compleja, incluso se observa como la producción promedio en la posición base de la pendiente siempre fue mayor que en las otras posiciones. De hecho, hubo diferencias entre posiciones cuando se evaluó la producción de grano ($p < 0,066$) y de biomasa ($p < 0,088$).

Las producciones en Puriscal fueron las más bajas. Incluso, el efecto de la pendiente fue más evidente en este paisaje, donde las producciones más bajas fueron en las posiciones lineal alta y lineal baja y se repitió de un ciclo al otro.

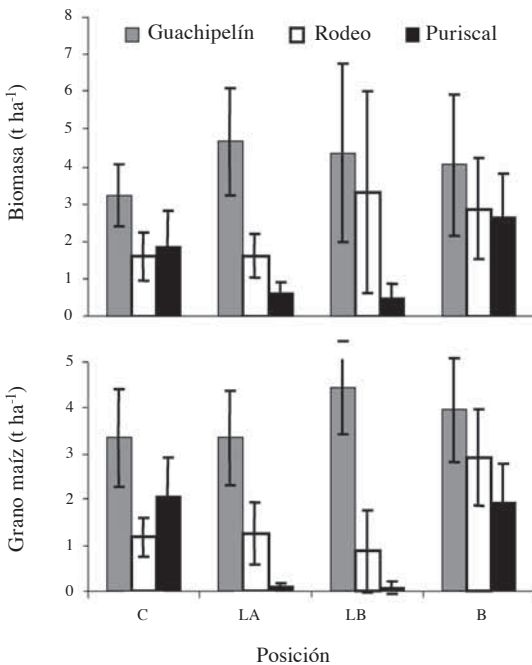


Fig. 4. Producción de grano y de biomasa de maíz ($t\ ha^{-1}$) promedio de los ciclos 1997 y 1998 en cada una de las posiciones (Cima, Lineal Alta, Lineal Baja y Base) de Guachipelín, Rodeo y Puriscal. Las barras verticales representan una desviación estándar.

Hubo diferencia ($p < 0,03$) entre producción de grano y entre biomasa, y como es de esperar las posiciones lineal alta y lineal baja presentaron prácticamente un contraste con las posiciones de cima y de base de la pendiente. A pesar de que la DMS al 5% no separa las medias, el andeva sí demuestra diferencias significativas.

Si se considera los 3 paisajes juntos, la tendencia de la mayor productividad en el suelo de la base de la pendiente fue clara (Cuadro 5), a pesar de que algunas otras posiciones presentaron producciones relativamente altas, tal fue el caso del Rodeo en la posición lineal baja y Puriscal en la cima. También, las posiciones lineal alta y baja en general presentan una productividad menor. No obstante, Gilliam *et al.* (1984) encontraron, en algunas ocasiones, mayor producción en posiciones cercanas a la parte superior de la pendiente que en este caso sería la lineal alta.

Estadísticamente, al evaluar el efecto de la posición en la pendiente en los 3 paisajes, en forma combinada de acuerdo a producción de grano y biomasa, las diferencias entre posición fueron altamente significativas. Si se asumiera que el grado de erosión en las posiciones lineal alta y baja es similar y mayor que en la cima y la base de la pendiente, las variables de producción de grano y de biomasa reforzarían esta afirmación. No obstante, atribuir tal efecto solo a la erosión, resulta muy atrevido, en vista de que pueden estar asociadas otras variables tales como hidrología en el subsuelo, exposición al sol, viento, microorganismos en el suelo y factores específicos de la posición. En general, los investigadores (Langdale *et al.* 1979, Spomer y Piest 1982, Cihra 1984 y Jones *et al.* 1989), han encontrado la zona de pie de pendiente como una de las de mayor producción. No obstante, esta afirmación puede no aplicarse a regiones perúdicadas, donde la humedad es alta a lo largo de la pendiente y además en la posición de base el exceso de agua sería una restricción al crecimiento normal de un cultivo como el maíz.

Hubo un comportamiento al aumento en la producción conforme la fertilidad aumentaba en los primeros 20 cm del suelo (considerando la

capacidad de intercambio catiónica) y la profundidad efectiva también lo hacía (Cuadro 6). En el caso de Puriscal, en la posición lineal baja, el criterio para establecer la profundidad efectiva de ese suelo fue la acidez, y en el resto de los casos, cuando se inicia el horizonte C.

Un comportamiento muy similar en los datos se observó al utilizar el contenido de MO en los primeros 20 cm de suelo (datos no mostrados).

El aumento en producción de grano fue de mayor proporción al aumentar la CICE (de los primeros 20 cm de suelo), que cuando la profundidad efectiva aumenta a más de 100 cm, donde más bien la media disminuye ligeramente. Esto demuestra un mayor impacto, debido a la fertilidad de los primeros 20 cm de suelo que a la profundidad efectiva.

En general, se puede asociar las posiciones lineal alta y baja, como las posiciones de menor profundidad efectiva, debido a las mayores pérdidas de suelo. Esto se hace más evidente en suelos de mayor pendiente como Puriscal. En el caso de Guachipelín, su buena fertilidad compensa en gran medida la disminución del suelo útil. De acuerdo al cuadro 6, tiene mayor efecto en la producción el aumento en las bases disponibles que el aumento de profundidad cuando esta tiene al menos 50 cm de suelo útil.

Además, se realizaron correlaciones de algunos parámetros químicos y físicos medidos en los primeros 20 cm de suelo (datos no mostrados), utilizando los resultados de los 2 años de cultivo. Hubo propiedades del suelo que correlacionaron mejor en un paisaje que en los

otros 2. En estos casos, las restricciones para la productividad del suelo varían de acuerdo a la localización de los suelos tanto dentro de la misma pendiente como geográficamente.

Las propiedades químicas con mejor correlación positiva con la producción de grano en los 3 paisajes juntos fueron: pH, Ca, K, CIC y MO y con correlación negativa: acidez y porcentaje de saturación de acidez (en todos los casos con $p < 0,02$).

Entre las propiedades físicas, la capacidad de almacenamiento de agua y el porcentaje de arenas tuvieron correlaciones positivas muy altas con la producción de grano ($p < 0,005$), y una correlación negativa igualmente alta con la densidad aparente y el porcentaje de arcillas ($p < 0,005$). El porcentaje de poros grandes y el porcentaje de limo tuvieron correlaciones positivas aceptables ($p < 0,05$).

En vista de que algunas propiedades químicas y físicas correlacionaron bien con la producción, además de la profundidad del suelo efectivo, el cual está asociado indirectamente con la posición en la pendiente, se demuestra que la productividad del suelo está ligada a una interrelación de estos factores.

Los resultados del presente trabajo permitieron demostrar algunas de las relaciones entre la posición en la pendiente y la producción de maíz para condiciones tropicales, coincidiendo con otros resultados obtenidos en climas templados (Afyuni *et al.*, 1993). Los rendimientos y la biomasa de maíz fueron mayores en la zona de deposición, seguidos por la producción en la cima donde se presenta una menor erosión en pérdida de suelo.

Cuadro 6. Producción media de grano ($t\ ha^{-1}$) utilizando todos los datos de 1997-1998 en los 3 paisajes. El valor entre paréntesis indica la cantidad de datos que conforman la media.

CICE ($cmol(+) l^{-1}$)	Profundidad efectiva del suelo (cm)		
	0-49	50-99	>100
0-6	0,13 ₍₁₎	1,37 ₍₇₎	-
6-12	0,01 ₍₁₎	2,28 ₍₃₎	2,25 ₍₆₎
12-18	-	-	3,48 ₍₆₎

Los paisajes seleccionados permitieron evaluar el rendimiento y la producción de biomasa de maíz, sobre suelos de pendiente compleja de una manera muy puntual. Sin embargo, es necesario desarrollar modelos, que usando un enfoque espacial permitan realizar balances de productividad a nivel de microcuena. Por eso, los datos proporcionados en el presente trabajo, serán de mucho valor en la validación de modelos que describan de una mejor manera las relaciones entre las propiedades de los suelos y la productividad en regiones tropicales.

En este trabajo no se evaluó el efecto indirecto de la erosión (fuera de la finca); sin embargo, está bien documentado que las partículas removidas llegan hasta los ríos resultando sumamente costoso la recuperación del suelo, además que estos sedimentos pueden causar problemas de inundaciones, sedimentación en proyectos hidroeléctricos o de riego, calidad de aguas y hasta catástrofes por movimientos en masa de suelo por sobrecarga hidráulica. Es por eso que se considera que estos efectos deberían ser evaluados en investigaciones posteriores.

CONCLUSIONES

- Las posiciones lineales alta y baja fueron las de menor producción de grano en comparación con las posiciones de cima y de la base, lo cual confirma el efecto de la erosión sufrida en esas posiciones sobre la producción de cultivo del maíz.
- La respuesta en producción de maíz fue diferente entre paisajes, debido a factores como material parental e historial de manejo del sitio.
- El efecto de la posición en la pendiente sobre la productividad estuvo ligado a la inclinación de la pendiente. De esta manera, conforme la pendiente aumenta se produce una mayor erosión y por lo tanto una mayor relación entre la posición en la pendiente y productividad.
- Muchas de las propiedades químicas (pH, Ca, K, CICE, MO, acidez y saturación de

acidez) y físicas (textura, porosidad y retención de humedad) por si mismas pueden ser utilizadas para explicar los cambios en producción en los suelos estudiados.

LITERATURA CITADA

- AFYUNI M.M., CASSEL D.K., ROBARGE W.P. 1993. Effect of landscape position on soil water and corn silage yield. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 57:1573-1580.
- BARBER R. 1999. Manejo integrado de cultivos y tierras en zonas de ladera de América Central: conceptos, estrategias y opciones técnicas. *Gestión integrada de cultivos. FAO. Vol. 2.* 57 p.
- BERGOEING J.P. 1998. Geomorfología de Costa Rica. Instituto Geográfico Nacional. San José, Costa Rica.
- BRUBAKER S.C., JONES A.J., LEWIS D.T., FRANK K. 1993. Soil properties associated with landscape position. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 57:235-239.
- CASSEL D.K., FRYREAR D.W. 1990. Evaluation of soil productivity changes due to accelerated erosion. *In: W.E. Larson (ed). Research issues in soil erosion/productivity.* University of Minnesota, St. Paul. p.41-54.
- CENTRO CIENTIFICO TROPICAL. 1992. La depreciación de los recursos naturales en Costa Rica y su relación con el sistema de Cuentas Nacionales. Instituto de Recursos Mundiales. San José, Costa Rica: CCT. p. 132-140.
- CIHA A.J. 1984. Slope position and grain yield of soft white winter wheat. *Agron. J.* 76:193-196.
- CROSSON P. 1985. National cost of erosion effects on productivity. ASAE Publication 8-8. Michigan, USA. p. 254-265.
- DANIELS R.B., GILLIAM J.W., CASSEL D.K., NELSON L.A. 1985. Soil erosion class and landscape position in the North Carolina Piedmont. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49:991-995.
- FAO. 2000. Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos. Food Agricultural Organization. Roma. p 5-12.
- FERRENS S.J., FOSTER G.R., BEASLEY D.B. 1985. Erosion's effects on productivity along nonuniform slopes. *In: American Society of Agricultural*

- Engineers. Erosion and Soil Productivity. Michigan, ASAE. p. 201-214.
- FLÖRCHINGER F.A., LEIHNER D.E., STEINMÜLLER N., MÜLLER-SÄMANN K., EI-SHARKAWY M.A. 2000. Effects of artificial topsoil removal on sorghum, peanut, and cassava yield. *Journal Soil and Water Conserv.* 55(3).
- GANTZER C.J., McCARTY T.R. 1987. Predicting corn yields on a claypan soil using a soil productivity index. *Transactions-of-the-ASAE,-American-Society-of-Agricultural-Engineers.* Soil Conservation, Agron. Dep., Univ. Missouri, Columbia, MO, USA. 30(5):1347-1352.
- GILLIAM J.W., CASSEL D.K., DANIELS R.B., STONE J.R. 1984. Interrelationships among soil erosion, landscape position and soil productivity in the North Carolina Piedmont. *In: Erosion and soil productivity. Proceedings of the National Symposium on Erosion and Soil Productivity.* ASAE. Louisiana, p 75-82.
- HANNA A.Y., HARLAN P.W., LEWIS D.T. 1982. Soil available water as influenced by landscape position and aspect. *Agron. J.* 74:999-1004.
- IICA (INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACIÓN PARA LA AGRICULTURA). 1989. Compendio de Agronomía Tropical. Costa Rica, San José. Tomo 2, p. 121-126.
- JONES A.J., MIEKE L.N., BARTLES C.A., MILLER C.A. 1989. Relationship of landscape position and properties to crop production. *Journal of Soil and Water Conservation* 44:328-332.
- KLUTE A. 1986. Water retention: Laboratory methods. *In: Klute, A. (ed.). Methods of soil analysis; Part 1.* American Society of Agronomy, Madison.
- KRAVCHENKO A., BULLOCK D.G. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92:75-91.
- KRAUSS H.A., ALLAMARAS R.R. 1982. Technology masks the effect of soil erosion and wheat yields; a case study in Whiteman County, Washington. *In: B.L. Schmith (ed). Determinants of soil loss tolerance.* ASA Publication 45. ASA, SSSA, Madison, Wisconsin. p. 75-89.
- LAL R. 1976. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria, IV. Nutrient element losses in runoff and eroded sediments. *Netherlands Geoderma* 16:403-417.
- LAL R. 1987. Effect of soil erosion on crop production. *CRC Critical Review in Plant Science* 5(4):303-367.
- LANGDALE C.W., BOX J.E., LEONARD R.A., BARNETT A.P., FLAMING W.G. 1979. Corn yield reduction on eroded southern piedmont soils. *Journal of Soil and Water Conservation* 34:226-228.
- LANGDALE C.W., SHARDER W.D. 1982. Soil erosion effects on soil productivity of cultivated cropland. *In: Determination of soil loss tolerance.* ASA, SSSA. p. 41-51.
- LO K.F.A. 1989. Erosion-productivity interrelationships for tropical soils. *Soils and fertilizers in Taiwan.* Society of Soil & Fertilizer Sciences of Republic of China. p. 19-30.
- MARTEL Y.A., MACKENZIE A.F. 1980. Long-term effects of cultivation and land use on soil quality in Quebec. *Canadian Journal of Soil Science* 60: 3, 411-420.
- MEYER L.D., BAUER A., HEIL R.D. 1985. Experimental approaches for quantifying the effect of soil erosion on productivity. *In: Follet, R. F. y Steward B.A. (eds). Soil erosion and crop productivity.* Wisconsin, American Society of Agronomy, CSSA, SSSA. p. 213-234.
- NELSON D.W., SOMMERS L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In: Page A.L. (ed). Methods of soil analysis. Part 1.* Agronomy Monograph 9. ASA y SSSA, Madison. p. 581-594.
- OLSON K.R., NIZEYIMANA E. 1987. Effects of soil erosion on corn yields of seven Illinois soils. *J. Prod. Agric.* 1:13-19.
- PIERCE F.J. 1991. Erosion productivity impact prediction. *In: Lal, R and Pierce F.J. (eds). Soil management for sustainability.* Soil and water conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 35-52.
- PIERCE F.J., LAL R. 1994. Monitoring the impact of soil erosion on crop production. *In: R. Lal (ed). Soil erosion research methods.* Soil and water conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 235-263.
- POUDEL D.D., MIDMORE D.J., WEST L.T. 1999. Erosion and productivity of vegetable systems on sloping volcanic ash derived Philippine soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 69:1376-1376.
- SCHERTZ D.L., MOLDENHAUER W.C., FRANZMEIER D.P., SINCLAIR H.R. 1984. Field evaluation of the effect of soil erosion on crop productivity. *In: Erosion and soil productivity. Proceeding of the National Symposium on Erosion and Soil Productivity.* ASAE. Louisiana. p. 9-17.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF. 1993. Soil survey manual. USDA Handbook N° 18. Washington D.C.

- SPOMER R.G., PIEST R.F. 1982. Soil productivity and erosion of Iowa loss soils. *Trans. ASAE*. 25:1295-1299.
- STOCKING M., PEAKE L. 1985. Erosion indices loss in soil productivity: trends in research and international cooperation. Paper to the IV International Conference on soil conservation. Venezuela. 52 p.
- STONE J.R., GILLIAM J.W., CASSEL D.K., DANIELS R.B., NELSON L.A., KLEISS H.J. 1985. Effects of erosion and landscape position on the productivity of Piedmont soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 49:987-991.
- DE BOODT M., VAN DEN BERGHE C., GABRIELS D. 1979. Fertilizer losses associated with soil erosion. Soil physical properties and crop production in the tropics. p. 455-464.
- TENGBERG A., STOCKING M.A., VEIGA M. da., DA VEIGA M. 1997. The impact of erosion on the productivity of a Ferralsol and a Cambisol in Santa Catarina, southern Brazil. *Soil use and management* 13: (2): 90-96.
- THOMAS G.W. 1982. Exchangeable cations. *In*: Page A.L. (ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy Monograph 9. ASA y SSSA, Madison.* p. 159-165.
- TIMLIN D.J., PACHEPSKY YA, SNYDER V.A., BRYANT R.B. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 62:764-773.
- USDA. 2006. *Keys to soil taxonomy.* 10th ed. Natural resources conservation service. USA. 341 p.
- WHITE A.W., BRUCE R.R., THOMAS A.W., LANGDALE G.W., PERKINS H.F. 1984. Characterizing productivity of eroded soils in the southern piedmont. *In*: *Erosion and soil productivity. Proceeding of the national symposium on erosion and soil productivity.* ASAE. Louisiana, p. 83-95.
- WILLIAMS R.D., NANEY J.W., AHUJA L.R. 1985. Soil properties and productivity changes along a slope. *Erosion and soil productivity.* ASAE Publication 8-8. Michigan, USA. p. 96-106.
- YOUNG D.L., TAYLOR D.B., PAPENDICK R.I. 1985. Separating erosion and technology impacts on winter wheat yields in the Palouse: Statistical approach. *ASAE Publication 8-8. Michigan, USA.* p.130-142.