

## EFFECTO DE LA COMPACTACIÓN DE SUELOS SOBRE EL RENDIMIENTO DEL MAÍZ EN TRES LOCALIDADES DE COSTA RICA

Warren Forsythe<sup>1/</sup>\*, Freddy Sancho\*, Mario Villatoro

**Palabras clave:** Resistencia a la penetración, densidad aparente, conductividad hidráulica, rendimiento relativo.

**Keywords:** penetration resistance, bulk density, hydraulic conductivity, relative yield.

Recibido: 26/09/05

Aceptado: 29/05/06

### RESUMEN

Diagnosticar las condiciones intermedias de compactación en el suelo es importante para evitar condiciones extremas, las cuales a menudo son visibles en el campo. Esto se puede lograr con curvas de rendimiento de cultivos, en respuesta a grados diferentes de compactación, medidos con parámetros cuantitativos. Se seleccionaron parcelas de terreno de 20x80 m en Guachipelín, el Rodeo y Puriscal en Costa Rica, con un paisaje adecuado para estudiar el efecto de la erosión sobre la producción de maíz, en diferentes zonas de las parcelas, con niveles iniciales de fertilización diferentes. Las zonas contaron con una caracterización de propiedades físicas de los suelos utilizables para medir su compactación. Las regresiones del modelo Royleigh para el rendimiento de maíz vs. RP (resistencia a la penetración), DA (densidad aparente) y HV-1,5MPa (humedad volumétrica a una succión de 1,5 MPa); y las funciones logarítmicas y cuadráticas para CH (conductividad hidráulica), han identificado valores intermedios con funciones diagnósticas potenciales para lugares individuales y sistemas compuestos de compactación. Las parcelas de referencia (rendimiento cero) junto con los datos experimentales contribuyeron con

### ABSTRACT

**Response of corn crop to soil compaction in three areas of Costa Rica.** It is important to be able to diagnose intermediate conditions of soil compaction, in order to avoid arriving at extreme conditions which are often visible in the field. This can be achieved by yield curves of crops, responding to different degrees of compaction, as measured with quantitative parameters. Parcels of land 20x80 m were selected in Guachipelín, Rodeo and Puriscal in Costa Rica. They had landscapes that were suitable for studying the effect of erosion on corn production in different zones of the parcels, which had different initial levels of fertilization. The zones were characterized for soil physical properties usable to measure compaction. Regressions following the Royleigh model for corn yield vs. RP (resistance to penetration), DA (bulk density) and HV-1.5Mpa (volumetric moisture at 1.5Mpa suction), and the logarithmic and quadratic functions of CH (hydraulic conductivity), have identified intermediate values with potential diagnostic function for individual places and composite systems of compaction. Reference plots (zero yields) together with experimental data contributed to

1/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: [wforsythe@ice.co.cr](mailto:wforsythe@ice.co.cr)

\* Centro de Investigaciones agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

regresiones interpoladas confiables ( $r^2 > 0,9$  para 100% de fertilización). Los  $r^2$  para 100% de fertilización fueron mayores que aquellos sin fertilización porque la fertilización reducía el componente de variabilidad debido a la fertilidad. El uso del RR (rendimiento relativo) permitió unir datos de lugares diferentes y las regresiones compuestas resultantes facilitaron la comparación de los lugares. La relación entre los rendimientos con 100% de fertilización de Guachipelín: Rodeo: Puriscal fue 1:0,52:0,47, y se explica mediante la interacción entre el RP, el HV-1,5MPa, el DA, y el CH que dio 1:0,49:0,42, con 4 parámetros; y entre el RP, HV-1,5MPa y CH que dio 1:0,61:0,46, logrado con 3 parámetros.

## INTRODUCCIÓN

Bajo condiciones extremas, la compactación de suelos puede impedir la penetración de las raíces. No obstante, antes de que se produzca este tipo de condición, se presenta una restricción en el desarrollo de las raíces que no siempre es fácilmente observable. En áreas dedicadas al pastoreo, algunas veces se produce una compactación superficial con la presencia de gleización. Esta gleización se origina por la pobre aireación durante la época lluviosa, que resulta de la saturación de los poros finos que quedan en el suelo producto de la reducción de la porosidad (densificación), y/o de la conversión de los poros a poros finos por el pudelaje (Koenigs 1961, Ghildyal 1978). El pudelaje es la deformación (sin roturación) de suelo húmedo en su estado plástico, como ocurre en el pisoteo, la amasadura, el fanguero o el arado de suelo húmedo. Lo puede acompañar una reducción o aumento de la porosidad. El efecto básico es la conversión de poros a microporos y una subsiguiente reducción sustancial de la conductividad hidráulica. Como consecuencia, durante la época lluviosa, la conductividad hidráulica y la infiltración son lentas, y la zona puede permanecer saturada con o sin agua libre (episaturación) e inducir una aireación pobre. Es importante desarrollar indicadores cuantitativos

reliable interpolated regressions ( $r^2 > 0.9$  for 100% fertilization). The  $r^2$  for 100% fertilization were greater than those obtained without fertilization because fertilization reduced the component of variability due to fertility. The use of RR (relative yield) allowed the uniting of data from different places and the resulting composite regressions facilitated the comparison of the places. The ratio between the yields of the 3 places; with 100% fertilization, at Guachipelín: Rodeo: Puriscal was 1:0.52:0.46 and was explained by the interaction between RP, HV-1.5Mpa, DA and CH which gave 1:0.49:0.42, achieved by four parameters; and between RP, HV-1.5MPa and CH which gave 1:0.61:0.47, achieved by 3 parameters.

de los casos intermedios para no llegar a los casos extremos, los cuales se ven fácilmente en un perfil de suelo. Esto se logra con curvas de respuesta para grados de compactación diferentes. La medición cuantitativa de la compactación de suelo facilita su diagnóstico y manejo.

La compactación de suelos se puede evaluar a través de indicadores debido a que: 1) puede significar una reducción de porosidad (densificación), que se refleja en un aumento de la densidad aparente (DA); 2) hay reducción del tamaño de los poros, lo que se refleja en el aumento de microporos y la reducción de la conductividad hidráulica (CH) o la rata de infiltración estabilizada (RI); y 3) hay un aumento de la resistencia mecánica (dureza) a la penetración por las raíces, lo que se refleja en la resistencia a la penetración (RP) por un penetrómetro a una humedad estándar, generalmente la capacidad de campo (CC).

Forsythe y Schweizer (2001), han demostrado que la RP y la RI son buenos indicadores porque producen curvas de respuesta con  $r^2$  altas, cuando se relacionan con el rendimiento de maíz. Para analizar sus datos usaron el concepto de parcela de referencia, con un valor de RP o de RI correspondiente a cero rendimiento. Generalmente esta información se produce bajo condiciones controladas. Esto introduce un valor extremo bien fundamentado, el cual produce junto

con los datos una regresión interpolada confiable. Las mediciones de resistencia a la penetración se hicieron con un penetrómetro estático, el cual midió el esfuerzo realizado (MPa) para introducir un pistón de acero inoxidable de 5 mm de diámetro hasta 5 mm en el suelo (Taylor y Burnett 1964, Forsythe 1985). Se midieron las humedades a 0,10, 20, y 30 cm de profundidad y también la rata de infiltración utilizando el método de anillos concéntricos (Forsythe 1985). En el presente estudio se evaluó el efecto de la compactación sobre el rendimiento de maíz bajo condiciones no controladas que se presentan en 3 localidades del Valle Central de Costa Rica.

**MATERIALES Y MÉTODOS**

En Guachipelín a 9° 57'N, 84° 10' O, 965 msnm y una pendiente de 11%; Rodeo con 9° 55'N, 84° 18'O, 500 msnm y una pendiente de 9%; y Puriscal con 9° 50'N, 84° 20'O, 950 msnm,

y una pendiente de 22%, se seleccionaron parcelas de terreno de 20x80 m con una topografía compleja (Villatoro 2001). En cada una de las parcelas se definió 4 posiciones en la pendiente: Cima (C) la cual es plano-convexa, Lineal Alta (LA) y Lineal Baja (LB), las cuales tienen pendiente y Base (B), la cual es plano-cóncava. Por su ubicación cada posición ha sufrido diferentes intensidades de erosión.

En Guachipelín, la posición C tenía un suelo Andic Dystrustepts, LA un Entic Udic Haplusterts, LB un Udic Haplusterts y B un Typic Haplustands. En el Rodeo, C tenía un Andic Dystrustepts, LA un Andic Dystrustepts, LB un Typic Dystrustepts y B un Humic Haplustands. En Puriscal, C tenía un Typic Haplohumults y LA un Andic Haplohumults, LB un Typic haplohumults y B un Andic Haplohumults.

El cuadro 1 muestra la precipitación, la evapotranspiración potencial (ETP) y el balance hídrico atmosférico (lluvia-ETP) del aeropuerto Juan Santamaría, con datos climáticos cercanos a los

Cuadro 1. Datos climáticos de la Estación Meteorológica El Coco (10° 00' Norte, 84°12' Oeste, y 932 msnm).

Mes	Precipitación,1966-1996 mm.	Precipitación,1997 mm.	ETP de 24 años mm.*	Balance hídrico atmosférico 1997 mm.
Ene	7,2	25,95	128	-102,05
Feb	12,5	1,2	131	-129,8
Mar	14,3	5,3	155	-149,7
Abr	79,7	80,5	153	-72,5
May	272,4	271,7	136	135,7
<b>Jun</b>	<b>267,9</b>	<b>232,25</b>	<b>140</b>	<b>92,25</b>
<b>Jul</b>	<b>178,5</b>	<b>57,4</b>	<b>159</b>	<b>-101,6</b>
<b>Ago</b>	<b>255,4</b>	<b>74,05</b>	<b>156</b>	<b>-81,95</b>
<b>Set</b>	<b>343,5</b>	<b>391,4</b>	<b>144</b>	<b>247,4</b>
Oct	340,3	220	141	79
Nov	147,1	341,85	129	212,85
Dic	29	5,7	142	-136,3

Nota: Los datos en negrita son los meses de desarrollo del maíz.

\* Datos de Hancock y Hargreaves (1977).

lugares de estudio. Como la varianza de la ETP es mucho menor que aquella de la lluvia, se acostumbra comparar su promedio con la lluvia del cualquier año (Hancock y Hargreaves 1977). Para cada lugar se identificaron franjas en contorno de 3,6x45 m para cada posición en la pendiente. En cada franja se realizó una caracterización completa de las propiedades químicas y físicas. Entre las físicas se estudiaron la RP a capacidad de campo en 10 lugares distribuidos en la franja, a 10 y 30 cm de profundidad; la DA por el método de volúmenes cilíndricos conocidos (5 cm de diámetro y 5 cm de altura), en 5 lugares a 10 y 30 cm de profundidad; las curvas de desabsorción de muestras no alteradas de 5 cm de diámetro y 1 cm de altura (Forsythe 1985), en 5 lugares a 10 y 30 cm de profundidad; y la CH de volúmenes conocidos (mencionados anteriormente), en 3 lugares a 10 y 30 cm de profundidad (Forsythe 1985, Villatoro 2001). En cada una de las posiciones se sembró 3 repeticiones de parcelas de maíz amarillo (*Zea mays*) HG-4 de 3,6x5 m, en las cuales el tratamiento principal fue la aplicación de 3 niveles de fertilización. Los niveles fueron 0, 50, y 100% de una fertilización completa, que se basó en la aplicación de 120-60-60 de N-P-K. Después de un tratamiento con glisofato, la siembra de maíz se realizó con macana a una densidad aproximada de 51000 plantas ha<sup>-1</sup>, las labores de cultivo fueron hechas tal y como las realizan los agricultores de la zona (control de malezas, siembra, aporca manual en Rodeo, cosecha). Se cosechó un área de 9 m<sup>2</sup> de una unidad experimental para determinar cuando el grano estaba al 12%.

El modelo de regresión de Royleigh ha dado como resultado una curva de respuesta confiable para muchos de los datos tratados, debido a los valores altos de r<sup>2</sup>. El modelo tiene la forma  $y = Ax^B e^{Cx^2}$ . La forma "linearizada" de Royleigh es  $\ln y = \ln A + B \ln x + C x^2$ . Si se compara con la relación lineal de un plano de respuesta  $y_1 = \text{constante} + B x_1 + C x_2$ , entonces  $y_1 = \ln y$ , la constante =  $\ln A$ ,  $x_1 = \ln x$ , y  $x_2 = x^2$  (Snedecor y Cochran 1980). Los datos de x y de y se transforman según las relaciones indicadas. Se realizó un análisis de regresión lineal con los valores transformados (Statistix 7 2000), el cual produce valores de  $\ln A$ , B, C y r<sup>2</sup>.

El rendimiento relativo (RR) se calculó dividiendo los rendimientos entre el máximo, esto facilitó unir los datos (Soil Test Work Group 1956) y producir curvas de respuesta compuestas para 2 y 3 lugares. También reduce el efecto que tienen los demás factores limitantes sobre la curva de respuesta absoluta. En las parcelas de referencia la resistencia a la penetración (RP) tuvo un valor de 2,75 MPa (Taylor y Burnett 1964). Este valor es el resultado de experimentos con varios cultivos y suelos, y tiene un rango máximo de 2,5–3,0 MPa. Los valores de la densidad aparente (DA), correspondientes a cero penetración de raíces y tomados como valores de cero rendimiento, varían en la literatura desde 1,09 Mg m<sup>-3</sup> para un Andisol hasta 1,8 para un suelo aluvial (Forsythe y Schwiezer 2001). Pierce *et al.* (1983), mencionan un método de identificar la DA limitante según la textura y el porcentaje de arcilla. De acuerdo con los datos de textura se escogió un valor de 1,55 Mg m<sup>-3</sup> para la parcela de referencia de DA. Un valor de 0 (0,001) cm h<sup>-1</sup> para el valor limitante de la conductividad hidráulica (CH), el cual se aproxima a un valor equivalente a cero en una escala logarítmica. El volumen de microporos está indicado por la humedad volumétrica a 1,5 MPa de succión (HV-1,5 MPa), la cual corresponde al volumen de poros  $\leq 0,2 \mu\text{m}$  de diámetro. Se asume que si toda la porosidad de un suelo (aquí 65% representa el grupo de suelos tratados) está ocupada por microporos, el rendimiento es cero porque esto significa cero porosidad dedicada a la aireación, aún cuando el suelo está al punto de marchitez permanente (PMP). Para escoger el mejor índice de microporos se hizo curvas de respuesta (RR-HV) con regresiones exponenciales, con los datos unidos de Guachipelín-Puriscal sin fertilizante usando HV a 0,03 MPa (r<sup>2</sup>=0,62 obtenido), a 0,1 MPa (r<sup>2</sup>=0,68 obtenido), a 0,3 MPa (r<sup>2</sup>=0,72 obtenido), a 1,5 MPa (r<sup>2</sup>=0,75 obtenido), y a 1,5 MPa con 100% de fertilizante (r<sup>2</sup>=0,95 obtenido). Por lo tanto, se escogió HV a 1,5 MPa como índice. Este índice es el espacio aéreo disponible para la aireación, cuando el suelo está a PMP, en lugar del índice tradicional del espacio aéreo cuando el suelo está a CC (0,03MPa). Feng *et al.* (2002) produjeron y también citaron datos de rata de difusión de oxígeno, que indican que la aireación limitante al crecimiento puede ocurrir hasta el PMP.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El cuadro 1 muestra que en 1997, los meses de julio y agosto tuvieron un balance hídrico atmosférico negativo, lo cual es poco usual pero se atribuye al fenómeno de El Niño; esto causó un secamiento del suelo y una reducción en el rendimiento del maíz. El cuadro 2 muestra los datos de rendimiento y el RR en 1997, para los tratamientos de fertilización y los valores de RP, DA, CH, y HV-1.5MPa para las franjas de posiciones.

Las Figuras 1a-5a y 6a-6c muestran r<sup>2</sup> altos cuando se usó el modelo de regresión Royleigh y las figuras 5a-5c muestran valores altos con el modelo cuadrático. En todos los casos, los datos sin fertilización tienen r<sup>2</sup> menores que aquellos con fertilizante. Los grados de asociación mayores, obtenidos con los tratamientos fertilizados se debieron a la disminución de la varianza debida a la fertilidad. El descenso en el rendimiento para los valores de RP y DA bajos se atribuyó al pobre contacto entre las raíces y el suelo. Las Figuras 5a-6c sugieren que la CH y la HV-1,5

MPa son indicadores de la influencia de poros grandes y microporos, respectivamente, que correlacionan con el RR. El flujo de agua a CC (estimado entre 0,005 y 0,03 MPa de succión, las cuales corresponden a poros de 60-10 µm de diámetro) tiene un orden de magnitud de mm día<sup>-1</sup>. La velocidad en un suelo saturado tiene el orden de magnitud de mm h<sup>-1</sup> y se atribuye a poros de ≥50 µm de diámetro.

Las figuras 1b, 3b, 5a, y 6a son curvas de regresiones compuestas en términos de RR y los parámetros RP, DA, CH y HV-1,5MPa., de Guachipelín-Rodeo-Puriscal y facilitan la comparación de los lugares. El uso de RR permite unir los datos de los 3 lugares. El cuadro 3 muestra un análisis del efecto de las combinaciones de los parámetros sobre las relaciones de 3 componentes de los rendimientos relativos de los lugares. La columna B en el cuadro 3, muestra la relación entre los rendimientos para los 3 lugares, ajustando el rendimiento de Guachipelín a 1 y usándolo como referencia. La relación de los 3 componentes es 1:0,52:0,46. La combinación de los efectos de RP, HV-1,5MPa, y CH se observa en la

Cuadro 2. Tratamientos de fertilización, producción de maíz, kg ha<sup>-1</sup>, rendimiento relativo (RR) y caracterización de suelo. Promedio de 10 y 30 cm de profundidad para 1997.

Lugar	Franja	0%Fert.	RR	50%Fert.	RR	100%Fert.	RR	RP,MPa	DA, Mg m <sup>-3</sup>	CH, cm h <sup>-1</sup>	HV-1,5MPa.
Guachipelín	C	2781	0,65	5061	0,91	4841	0,84	0,69	0,75	4,6	24,51
	LA	2441	0,57	3292	0,59	4776	0,83	0,94	0,8	1,8	23,24
	LB	3859	0,9	5561	1	5123	0,89	1,07	0,9	1,8	27
	B	4310	1	4485	0,81	5729	1	1,16	0,93	2,9	30,56
	Referencia	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	2,75	1,55	0,001	65
Rodeo	C	920	0,34	2212	0,62	2313	0,64	1,33	0,99	5,2	33,84
	LA	1737	0,64	2513	0,71	1365	0,38	1,7	1,09	0,05	36,58
	LB	1594	0,59	2259	0,64	3354	0,92	0,98	0,96	0,28	32,15
	B	2721	1	3551	1	3637	1	1,42	0,81	1,6	33,72
	Referencia	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	2,75	1,55	0,001	65
Puriscal	C	1617	1	2112	0,7	3471	1	1,44	0,91	5,1	30,56
	LA	80	0,05	1149	0,38	1517	0,44	1,42	1,05	0,51	35,95
	LB	8	0,01	810	0,27	1438	0,41	2,08	0,92	1,9	29,98
	B	1257	0,78	3013	1	3015	0,87	1,51	0,92	8,1	33,53
	Referencia	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	2,75	1,55	0,001	65

columna K y las proporciones 1:0,61:0,47 se aproximan a las de la columna B con  $\Sigma d^2=0,0082$ , donde d es la desviación entre los componentes correspondientes. Las proporciones en la columna O, incluyen además el efecto de la DA y se aproximan a las de la columna B con  $\Sigma d^2=0,0020$  pero con 4 parámetros. Las proporciones en la columna Q incluyen el efecto de DA, HV-1,5MPa, y CH pero no se aproximan las de la columna B, tan bien como las de la columna K, debido a una  $\Sigma d^2=0,0441$ . Parece que la combinación de RP, HV-1,5MPa, y CH caracterizan bien la condición física compuesta del suelo sin considerar la DA; además, la RP es más fácil de medir que la DA. Las figuras 2a,b,c, 4a,b, 6b,c muestran curvas de respuesta de lugares individuales. Las figuras 2a,b,c, 4a,b

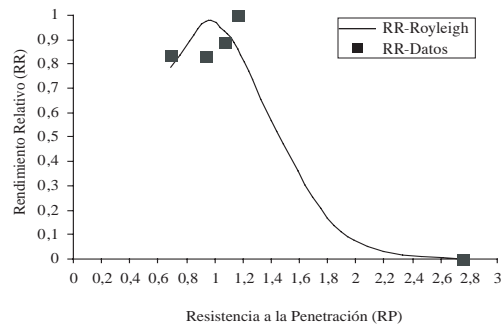


Fig. 2a. RR del maíz en relación con la RP para Guachipelín, 1997. 100% fertilizante. Regresión Royleigh  $y=4,114x^{2.6}e^{-1.45x^2}$   $r^2 = 0,99$ .  $r^2$  sin fertilizante=0,99.  $r^2$  del modelo lineal = 0,87. RP, promedio de 10 y 30 cm de profundidad a capacidad de campo. MPa.

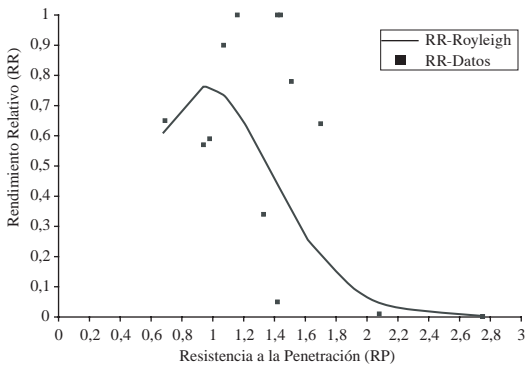


Fig. 1a. RR del maíz en relación con la RP para Guachipelín-Rodeo-Puriscal, 1997. Sin fertilizante. Regresión Royleigh  $y=3,159x^{2.6}e^{-1.43x^2}$ .  $r^2=0,90$ . RP, promedio de 10 y 30 cm de profundidad a capacidad de campo. MPa.

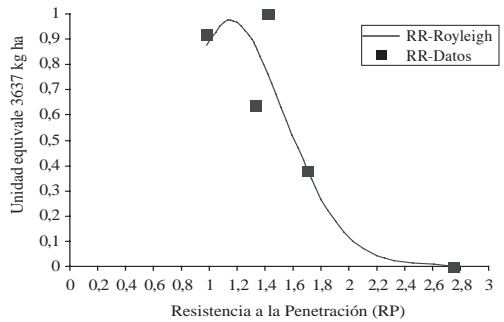


Fig. 2b. RR del maíz en relación con la RP para Rodeo, 1997. 100% de fertilizante. Regresión Royleigh  $y=5,139x^{4.58}e^{-1.74x^2}$   $r^2=0,99$ .  $r^2$  sin fertilizante=0,97.  $r^2$  del modelo lineal=0,80. RP, promedio de 10 y 30 cm de profundidad a capacidad de campo. MPa

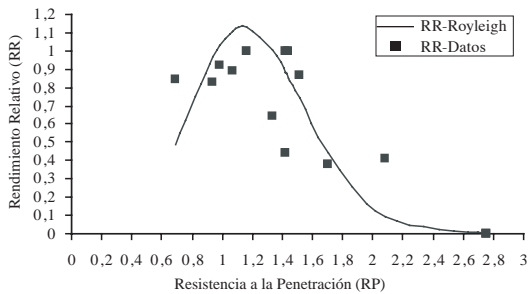


Fig. 1b. RR del maíz en relación con la RP para Guachipelín-Rodeo-Puriscal, 1997. 100% fertilizante. Regresión Royleigh  $y=5,9x^{4.51}e^{-1.73x^2}$ .  $r^2=0,97$ . RP, promedio de 10 y 30 cm de profundidad a capacidad de campo. MPa.

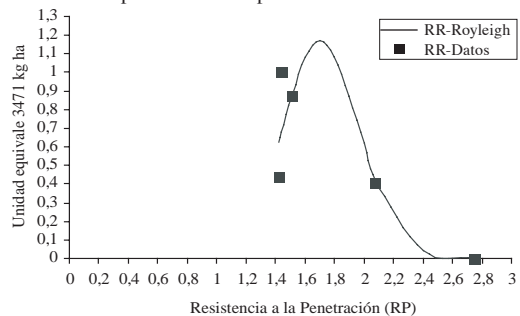


Fig. 2c. RR del maíz en relación con la RP para Puriscal, 1997. 100% fertilizante. Regresión Royleigh  $y=0,612x^{21.48}e^{-3.72x^2}$ .  $r^2=0,99$ .  $r^2$  sin fertilizante=0,80.  $r^2$  del modelo lineal=0,70. RP, promedio de 10 y 30 cm de profundidad a capacidad de campo. MPa.

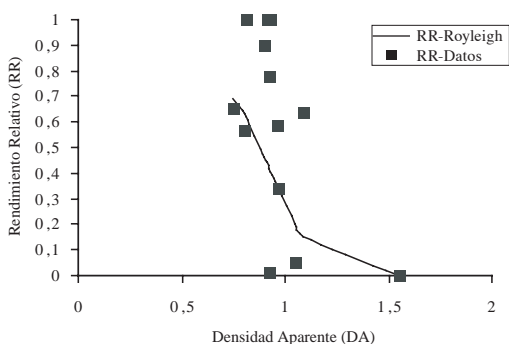


Fig. 3a. RR del maíz en relación con la DA para Guachipelín-Rodeo-Puriscal, 1997. Sin fertilizante. Regresión Royleigh  $y=91,56x^{-5,28}e^{-5,78x^2}$ .  $r^2=0,81$ . DA, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $Mg\ m^{-3}$ .

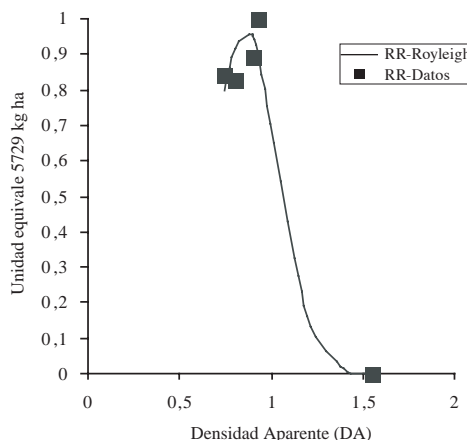


Fig. 4a. RR del maíz en relación con la DA para Guachipelín, 1997. 100% fertilizante. Regresión Royleigh  $y=4464x^{12,98}e^{-8,74x^2}$ .  $r^2=0,99$ .  $r^2$  sin fertilizante = 0,99.  $r^2$  del modelo lineal = 0,86. DA, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $Mg\ m^{-3}$ .

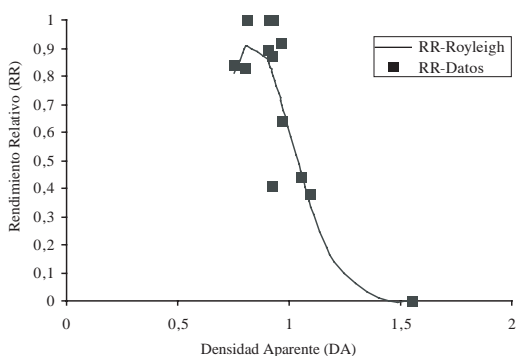


Fig. 3b. RR del maíz en relación con la DA para Guachipelín-Rodeo-Puriscal, 1997. 100% fertilizante. Regresión Royleigh  $y=2049,7x^{11,36}e^{-8,12x^2}$ .  $r^2=0,99$ . DA, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $Mg\ m^{-3}$ .

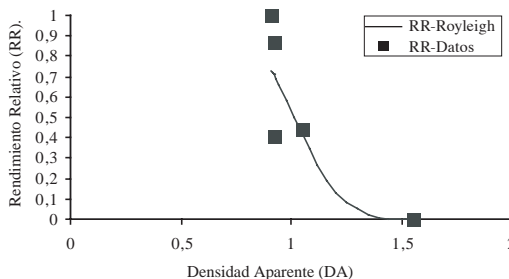


Fig. 4b. RR del maíz en relación con la DA para Puriscal, 1997. 100% fertilizante. Regresión Royleigh  $y=2247,09x^{12,22}e^{-8,31x^2}$ .  $r^2=0,99$ .  $r^2$  sin fertilizante = 0,62.  $r^2$  del modelo lineal = 0,67. DA, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $Mg\ m^{-3}$ .

muestran  $r^2$  más altos con el modelo Royleigh que con el modelo lineal, cuando se usa 5 datos, indicando que el Royleigh sigue siendo el modelo más adecuado aún con pocos datos.

Para Guachipelín-Rodeo-Puriscal la RP a 10 cm de profundidad presentó un promedio de 1,12 MPa; mientras que el promedio a 30 cm fue de 1,44 MPa. La diferencia de 0,32 MPa es significativa a  $p=0,11$ . La misma tendencia de RP se observó con el aumento de la profundidad en otros suelos (Forsythe y Tafur 1985). El aumento de 0,32 MPa es 100 veces mayor que el del esfuerzo isotrópico de la sobrecarga de 20 cm del suelo saturado (densidad mojada \*g\* altura en  $SI=1650*9,81*0,2=3237,3\ Pa=0,0032$

MPa). El aumento puede deberse a un endurecimiento lento debido al esfuerzo continuo. La DA a 10 cm mostró un promedio de 0,91  $Mg\ m^{-3}$  y a 30 cm un promedio de 0,94. La diferencia no es significativa a  $p=0,4$ . Las RP a 10 ó 30 cm de profundidad presentaron regresiones polinómicas (2 y 5 grados, respectivamente) con los CH correspondientes con  $r^2$  entre 0,46 y 0,52 en 1998, y 0,47 y 0,68 en 1997. Estos  $r^2$  son significativos entre 1 y 5%. El cambio de CH estuvo entre 5 y 6 y el correspondiente de

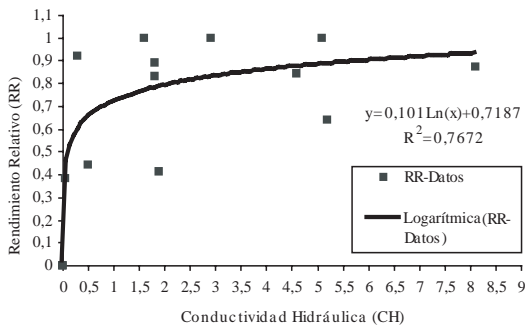


Fig. 5a. RR del maíz en relación con la CH para Guachipelín-Rodeo-Puriscal, 1997. 100% fertilizante. CH, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $cm\ h^{-1}$ .

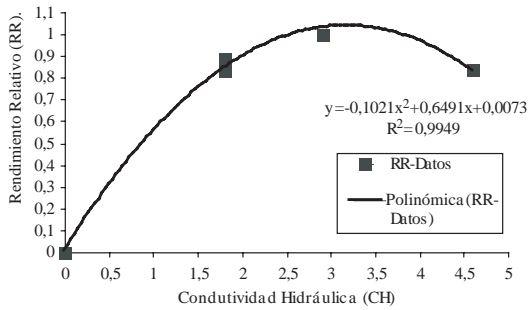


Fig. 5b. RR del maíz en relación con la CH para Guachipelín, 1997. 100% fertilizante. CH, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $cm\ h^{-1}$ .

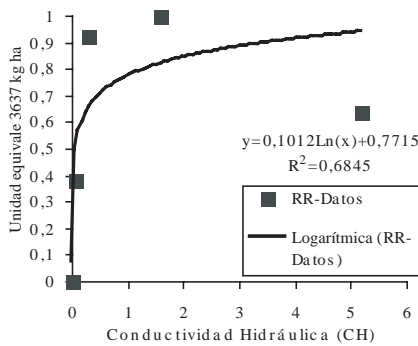


Fig. 5c. RR del maíz en relación con la CH para Rodeo, 1997. 100% fertilizante. CH, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.  $cm\ h^{-1}$ .

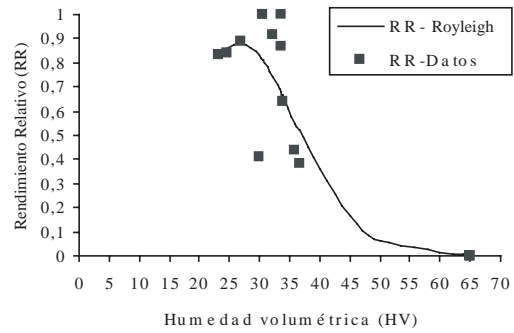


Fig. 6a. RR del maíz en relación con la HV a 1,5MPa para Guachipelín-Rodeo-Puriscal, 1997. 100% fertilizante. Porosidad=65%. Regresión Royleigh  $y = 0,0000055x^{4.3}e^{-0.003x^2}$ .  $r^2 = 0,99$ . HV, 1,5 MPa, promedio de 10 y 30 cm de profundidad %.

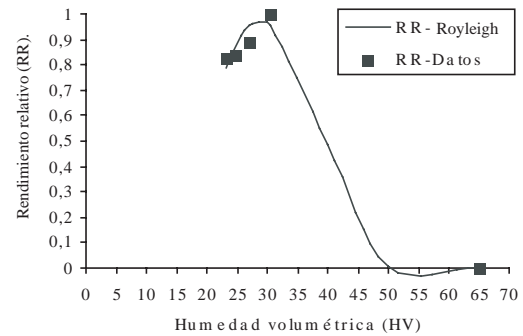


Fig. 6b. RR del maíz en relación con la HV a 1,5MPa para Guachipelín, 1997. 100% fertilizante. Porosidad=65%. Regresión Royleigh  $y = 1,47 * 10^{-7} x^{5.5} e^{-0.0033x^2}$ .  $r^2 = 0,99$ .  $r^2$  del modelo lineal = 0,90. HV, 1,5MPa, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.

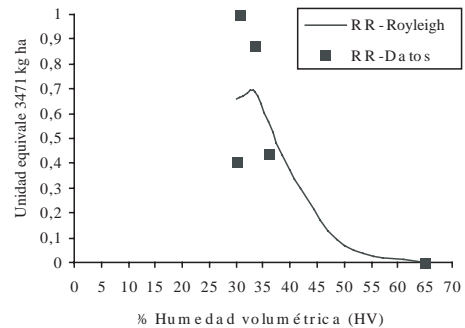


Fig. 6c. RR del maíz en relación con la HV a 1,5MPa para Puriscal, 1997. 100% fertilizante. Porosidad=65%. Regresión Royleigh  $y = 10^{-9} x^{6.91} e^{-0.0036x^2}$ .  $r^2 = 0,98$ .  $r^2$  del modelo lineal = 0,60. HV, 1,5MPa, promedio de 10 y 30 cm de profundidad.



Cuadro 3. Interacción de RP, HV-1,5MPa, CH, y DA sobre las relaciones de rendimiento relativo de 3 componentes para el sistema Guachipelín-Rodeo-Puriscal al 100% de fertilizante.

Lugar	A Rendimiento Prom.	B RR °	C HV-1,5MPa Prom.	D RR *	E RP Prom.	F RR *	G (F*D)
Guachipelín	5117	1	26,32	0,88	0,965	1	0,88
Rodeo	2667	0,52	34,07	0,62	1,36	0,96	0,59
Puriscal	2360	0,46	32,5	0,72	1,61	0,57	0,41
	H CH Prom.	I RR *	J (G*I)	K °	L DA Prom.	M RR *	N (J*M)
Guachipelín	2,8	0,85	0,75	1	0,84	0,9	0,67
Rodeo	1,8	0,78	0,46	0,61	0,96	0,72	0,33
Puriscal	3,9	0,86	0,35	0,47	0,95	0,74	0,26
	O °	P (D*M*I)	Q °				
Guachipelín	1	0,67	1				
Rodeo	0,49	0,35	0,52				
Puriscal	0,42	0,45	0,67				

Nota: \* valor correspondiente de la regresión con el valor del parámetro en la columna anterior.

° normalizar el valor de Guachipelín en la columna anterior a 1.

RP entre 2 y 0,5 MPa; esto sugiere una posible interacción entre CH y RP. La materia orgánica (MO) a 10 cm fue en promedio de 4,13% y a 30 cm en promedio de 3,59. No hubo diferencias significativas a  $p=0,4$ . Las RP a 10 y 30 cm de profundidad mostraron una regresión lineal con las MO correspondientes ( $r^2=0,09$ ), la cual no es significativa al 10%. La MO varió de 1,03 a 7,99% con un porcentaje de arcilla de 14-71 y de limo de 19-34.

### Caracterización de los parámetros RP, DA, HV-1,5MPa y CH

En el suelo con 100% de fertilidad se tiene un sistema abierto no reversible, en un estado estacionario en lugar de equilibrio:

$$RR = f (RP, DA, HV-1,5MPa, CH) \quad (1)$$

La ec.(1) estrictamente está en un estado transitorio cuando  $\Delta RR / \Delta t$  cambia con el tiempo (t). Pero si se escoge un lapso de tiempo dado  $\Delta t$  (ej. el tiempo del ciclo de producción), se aproxima a una condición donde la rata promedio de cambio  $\Delta RR / \Delta t$  no varía en el tiempo o sea que se aproxima a un estado estacionario  $d(\Delta RR / \Delta t) / dt = 0$ .

Las regresiones para  $RR=f (RP)$ ,  $RR=f (DA)$ , y  $RR=f (HV-1,5MPa)$  tienen un  $r^2>0,96$  para transformaciones Royleigh. Los factores químicos se consideran no limitantes a 100% de fertilización. Aparentemente, los valores de los factores físicos de la ec.(1) que no están en las regresiones de una función, actúan también como no limitantes. En un modelo multivariado de la ec.(1) con la transformación Royleigh, la correlación entre  $\ln RP$ ,  $\ln DA$ , y  $\ln HV-1,5MPa$  es  $>0,86$  y sugiere colinearidad.

La **independencia estadística** de variables requiere que no haya colinearidad. La **independencia fisicoquímica** de las variables en la ec.(1) es diferente. Para ilustrar lo anterior consideremos la ecuación de estado de un gas ideal que está en equilibrio:

$$P = (nRT)/V \quad (2)$$

Donde V es el volumen del gas en un ambiente de presión constante P, si se calienta el volumen, tanto T (la temperatura) como V van a aumentar. En un sistema natural el cambio de T puede significar pasar de un estado estacionario con T constante a otro estado estacionario con T' constante. El muestreo puede incluir T y T'. Entonces T y V muestran colinearidad ( $r=1$ ). Sin embargo, la ecuación (2) es el caso clásico experimental donde se consideran T y V como independientes. Así, la colinearidad y la independencia fisicoquímica pueden ser compatibles para un estado estacionario. **Independencia fisicoquímica** significa que se puede cambiar sólo T sin afectar V, y V sin afectar T. Cambiar T sin cambiar V significa V confinado y constante y esto resultaría en un cambio de P. Entonces T tuvo la opción de un cambio independiente.

### **Independencia fisicoquímica identificada por relaciones y funciones físicas en el suelo**

En el suelo podemos considerar la ec.(1). El aumento de la RP está relacionado con el aumento de la DA por la compactación, pero la RP tiene 2 opciones más para variar sin cambiar la DA mediante la humedad y la cementación, esto debido a que el RP es un índice compuesto que es afectado tanto por la compactación como por el estado de tensión dinámico del suelo (Rexter 1988). Esto da libertad a la RP de ser independiente de la DA. En este caso, la RP puede, pero no necesariamente, estar relacionada con la DA. La HV-1,5MPa comparada con la porosidad total de referencia es una medida de aireación, y está relacionada con la DA  $HV = (DA * H_g) / \rho_{\text{agua}}$ . La porosidad total también está relacionada con la

DA. Sin embargo, la HV1,5MPa tiene la opción de variar mediante la humedad de adsorción, la cual está afectada por textura, estructura y mineralogía, sin afectar la DA.

La CH está afectada por la DA, la cual afecta la porosidad total. Dicha porosidad tiene la opción de ser variada mediante el tamaño de los poros, el cual está afectado por el arado y los canales de raíces podridas y de animales sin cambiar la DA. La CH muestra menos colinearidad que los demás parámetros. Los valores más bajos de  $r^2$  en las funciones con CH pueden ser el resultado de una intensidad más baja de muestreo en el ensayo. Físicamente la CH está vinculada con la aireación o sea HV-1,5MPa. Se presenta el modelo en que los macroporos dan canales de acceso e intercambio a zonas en el suelo afectadas por grupos de poros sin salida o por la tortuosidad. Así los macroporos fortalecen la aireación.

## **CONCLUSIONES**

Las regresiones de Royleigh, para el rendimiento de maíz vs. RP, DA o HV-1,5MPa y las de las funciones logarítmicas y cuadráticas para CH, identifican valores intermedios de valor diagnóstico para lugares individuales y sistemas compuestos de compactación.

Las parcelas de referencia junto con los datos experimentales contribuyen a la interpolación confiable de regresiones.

El uso del RR permite unir datos de lugares diferentes y las regresiones compuestas resultantes facilitan la comparación de lugares.

La relación entre los rendimientos con 100% de fertilización de los 3 lugares se explica con la interacción entre RP, HV-1,5MPa, DA, y CH; y entre RP, HV-1,5MPa y CH.

Los parámetros RP, HV-1,5MPa, DA, y CH actúan como independientes fisicoquímicos a pesar de tener colinearidad. La RP representa la resistencia mecánica, DA la densificación, HV-1,5MPa la aireación durante el crecimiento entre la CC y el PMP, y CH el fortalecimiento de la aireación.

## LITERATURA CITADA

- DEXTER A.R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research* 11:199-238.
- FORSYTHE W. 1985. Manual de laboratorio de física de suelos. IICA. San José, Costa Rica. 212 p.
- FORSYTHE W., SCHWEIZER S. 2001. La resistencia a la penetración y la rata de infiltración como indicadores de las condiciones físicas de un suelo de Costa Rica. *In: XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo. Varadero, 11 al 16 de noviembre, 2001. CD-ROM.*
- FORSYTHE W., TAFUR N. 1985. The effect of various methods of land preparation on soil resistance to penetration and yields of corn (*Zea mays* L), cassava (*Manihot esculenta*.Crantz) and sweet potato (*Ipomoea batatas*.L.) in association. 1. Effect of cropping systems and land preparation on the soil. *Turrialba* 35:357-370.
- GHILDYAL B.P. 1978. Effects of compaction and puddling on soil physical properties and rice growth. *In: Soils and Rice.* pp. 316-336. International Rice Research Institute. Los Baños. Phillipines.
- HANCOCK J., HARGREAVES G.H. 1977. Precipitación, clima y potencial para producción agrícola en Costa Rica. Utah State University. Logan. Utah. 136 p.
- KOENIGS E.F.R. 1961. The mechanical stability of clay soils as influenced by moisture conditions and some other factors. Wageningen. Verslagen van landbouwkundige onderzoekingen. 677 p.
- LAL R. 1985. Tillage in lowland rice-based cropping systems. *In: Soil Physics and Rice.* 283-306. International Rice Research Institute. Los Baños. Phillipines. 430 p.
- PIERCE F.J., LARSON W.E., DOWDY R.H., GRAHAM W.A.P. 1983. Productivity of soils: Assessing long term changes due to erosion. *J. of Soil and Water Conservation* 48:39-44.
- SNEDECOR G.W., COCHRAN W.G. 1980. Statistical methods. 7<sup>th</sup> Ed. Iowa State University Press. Ames. 507 p.
- SOIL TEST WORK GROUP OF NATIONAL SOIL RESEARCH COMMITTEE. 1956. Soil test compared with field, greenhouse, and laboratory results. North Carolina Agricultural Experiment Station. Tech. Bull. No. 121. Raleigh. N.C.
- STATISTIX 7. 2000. Analytical Software. Tallahassee, Florida.
- TAYLOR H.M, BURNETT E. 1964. Influence of soil strength on the root growth habits of plants. *Soil Science* 98:174-180.
- VILLATORO M. 2001. Efecto de la erosión y la aplicación de fertilizantes sobre la productividad de suelos en ambientes usticos de Costa Rica. Aplicación de modelos de productividad. Tesis de Magíster Scientiae. Univeridad de Costa Rica, San José, Costa Rica.79 p.

