

Influencia de la variabilidad espacial del suelo sobre parámetros del cultivo caña de azúcar (*saccharum officinarum*) en Monay, estado Trujillo.

Effect of soil spatial variability on sugarcane parameters (Saccharum officinarum) in Monay, Trujillo State

Oswaldo R. Fernández¹, Ronal Perez¹ y Anyelo Gubinelli

¹ Núcleo Universitario "Rafael Rangel", Departamento Ciencias Agrarias, Universidad de los Andes, Trujillo, Estado Trujillo, Venezuela. e-mail: oswaldof@ula.ve

RESUMEN

Un estudio sobre variabilidad espacial de suelos fue realizado sobre un tablón de 1,82 ha, sembrada de Caña de Azúcar en la estación experimental del Núcleo Universitario "Rafael Rangel" de la Universidad de los Andes, estado Trujillo. Se hizo un muestreo de suelos para tomar dentro del área de estudio un total de 88 puntos, las muestras fueron tomadas a dos profundidades 0–30 y 30–50 cm. En el horizonte superficial se analizó: pH, CE, Ca, Mg, P, K, a, L, A; en el horizonte subsuperficial: pH, CE, Ca y Mg. Se hicieron mediciones del diámetro del tallo y la altura de la planta para cada sitio de muestreo. Los datos fueron procesados utilizando estadística clásica y el análisis geoestadístico, incluyendo semivariogramas omnidireccionales, a partir de los cuales se produjeron mapas de contorno, siguiendo el método de interpolación "Kriging". La mas alta variabilidad, según la estadística clásica, fue mostrada por las variables P y K, cuyo coeficiente de variación fue mayor de 65%. La relación entre las variables analizadas y los parámetros del cultivo fue muy baja, tal como lo indicaron los coeficientes de correlación y determinación a excepción de la variable limo, la cual presentó la correlación negativa mas alta (-0.24) y (-0.21) con las variables altura y diámetro del tallo respectivamente. El análisis geoestadístico indicó que el Nugget ó varianza al azar se presenta en baja proporción con respecto a la varianza espacial en la mayoría de las variables analizadas, lo cual indica que hay una marcada dependencia espacial de estas variables en el suelo.

Palabras Claves: variabilidad de suelos, semivariogramas, geoestadística, nugget, kriging.

ABSTRACT

A soil spatial variability study was conducted on a 1.82 ha sugarcane field in the Estación Experimental of the Núcleo Universitario Rafael Rangel, Universidad de Los Andes in Monay, Trujillo state. Soil sampling was performed following a geostatistics design with 88 sampling points. At each site, soil samples were taken at 0 to 30 and 30 to 50 cm depth. In the surface horizon, pH, electric conductivity, and contents of Ca, Mg, P, K, sand, silt, and clay were analyzed. In the subsurface horizon, only pH, electric conductivity, and Ca and Mg contents were determined. Plant height and stem diameter were also measured at each site. The data was statistically and geostatistically analyzed, omnidirectional semivariograms were generated, and contour maps were drawn for each variable using the kriging interpolation technique. According to the statistics analysis, the variables P and K showed the highest variability, their variation coefficient was larger than 65%. The relationships among the analyzed variables and crop parameters were very low, such as the correlation and determination coefficients indicated. Only the silt content showed the highest negative correlations (-0.24) and (-0.21) with the variables plant height and stem diameter, respectively. The geostatistics analysis revealed that the majority of the studied variables had a high spatial dependence, the nugget or random variance was a low proportion of the total variance for each case.

Key words: soil variability, semivariograms, geostatistics, nugget, kriging.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo natural continuo que cubre la superficie terrestre, cuyas características difieren de un lugar a otro. Esto sugiere que en los suelos vecinos frecuentemente se pueden conseguir diferencias graduales, algunas de ellas significativas. Tal variación existente hace necesario estudiarlos y agruparlos de acuerdo a una metodología particular, con el fin de entenderlos mejor y manejarlos más apropiadamente.

Los estudios de variabilidad espacial pueden ayudar a implementar líneas de acción que contribuyan a un mejor uso del suelo y en consecuencia a un mejor aprovechamiento del mismo. Esta heterogeneidad

induce una variabilidad en las propiedades del suelo que puede llegar a ser de considerable magnitud, la cual puede afectar grandemente las generalizaciones y predicciones que se hagan con ellas (Cambardella, et al., 1994).

La variabilidad espacial de los suelos presenta dos componentes fundamentales uno Aleatorio y otro Sistemático, teniendo en cuenta la fuente de error que produce la variación. Wilding y Dress (1983), citados por Fernández O. (1989), definen la variabilidad sistemática como los cambios graduales o tendencias en las propiedades del suelo que pueden ser entendidos en función de cambios de los factores y procesos formadores del suelo, a una escala dada de observación. Upchurch y Edmonds (1992), definen la variabilidad como aquella que puede ser atribuida a causas conocidas, entendibles y predecibles. Cuando la variabilidad no puede relacionarse a causas conocidas, esta es definida como variabilidad aleatoria o debida al azar y estos autores estiman que en los suelos, en general, la variabilidad sistemática es mayor que la variabilidad aleatoria, aunque reconocen que la relación entre los dos tipos de variabilidad puede tener una alta dependencia de la escala de trabajo. La variabilidad depende de la propiedad que se analice, siendo más variables las propiedades químicas que las físicas. Además, hay menor variabilidad en las propiedades del suelo, en su condición natural que cuando es sometido a uso. Aquellas propiedades que más se afectan por el manejo del suelo serán las que presenten la mayor variabilidad (Ovalles, 1992).

Innumerables son las condiciones que influyen sobre los rendimientos de un cultivo, tales como la disponibilidad de agua, elevación topográfica, textura del suelo, contenido de nutrientes, híbrido utilizado, densidad de siembra, plagas y enfermedades, etc. El efecto de la textura y la elevación del terreno, sobre los rendimientos, son estables a través del tiempo, y las decisiones de manejo sobre la fertilización y riego, podrían basarse en esta información, mientras que el efecto de otros factores sobre los rendimientos, especialmente los nutricionales, son inestables y difíciles de predecir (Machado et al. 2001). Quizás, el mayor potencial que presenta el uso de los mapas de rendimiento es determinar en un campo cuales son los sectores en que se obtiene una mayor productividad, de modo de estudiarlos, para determinar la factibilidad de tratarlos de modo distinto, lo que también se podría hacer con los sectores menos productivos (Ortega, et al, 2004).

Lamb et al. (1997) determinaron que el empleo de mapas de rendimiento, para recomendaciones de fertilización sobre la base de un manejo sitio-específico, no puede ser posible o puede requerir una base de datos mucho más amplia que 5 años normalmente recomendados. Por otro lado, Blackmer y White (1998), establecen que los mapas de rendimiento permiten evaluar, por ejemplo si realmente el factor limitante de la producción es eliminado o si además existen otros factores que impiden la respuesta al insumo aplicado.

Es por ello que se utiliza el análisis geoestadístico, que se basa en el uso de los semivariogramas. El semivariograma es una de las herramientas mas adecuadas para determinar si existe estructura espacial para las variables del suelo a través de la identificación de la dependencia espacial, el alcance de esta, la distancia óptima de muestreo y el tamaño óptimo del área a muestrear.

Muchos factores influyen en la sistematización del comportamiento espacial de una variable, uno de los cuales es el relieve, que como elemento pasivo juega un papel importante en los procesos erosivos dentro de la parcela y la distribución de elementos como los compuestos fertilizantes (Ponce de León et al., 1999). El relieve puede ser modelado para su estudio mediante técnicas digitales, lo que se conoce como modelo digital de terreno (MDT), esto permite el estudio de las relaciones de las características edáficas con el paisaje Burrough (1986), y el conocimiento de estas relaciones contribuye a la optima aplicación de los fertilizantes, base de la "agricultura de precisión" (Franzen et al., 1996). La variabilidad en el campo se debe a varios factores naturales y antropogénicos. El factor natural más importante es el tipo de suelo cuyas características están definidas por el material parental y la topografía. La actividad humana promueve la variabilidad a través de la distribución de residuos recientes y en el pasado lejano afectando la acumulación de materia orgánica con todas sus implicaciones. Además, son factores importantes en la variabilidad antropogénica la distribución de fertilizantes, la diferente remoción de nutrientes causada por diferentes tipos de cultivos y rotaciones y el efecto significativo de la erosión (Brouder, 1999).

En función de lo anterior, se escogió un tablón ocupado por el cultivo de caña de azúcar con fines forrajeros (*Saccharum officinarum*) variedad San Pablo 72, con un área de 1.82 ha, y en el cual se planteó un estudio con los siguientes objetivos: Determinar la variabilidad espacial de las características físicas y químicas del suelo seleccionado para este estudio y a partir del análisis geoestadístico de las variables del suelo, establecer las relaciones espaciales entre estas variables y algunos atributos de la planta: Altura de la planta y Diámetro del tallo.

MATERIALES Y METODOS

La unidad de producción agrícola, se encuentra ubicada en el sector La Catalina-Vega Grande, Parroquia Monay, Municipio Pampán del Estado Trujillo. Ocupa una gran porción de una planicie aluvial, ubicada en la margen izquierda del Río Monaicito. Esta unidad abarca una superficie de 350 hectáreas destinadas a actividades agropecuarias, de las cuales aproximadamente 75 hectáreas están dedicadas al cultivo comercial de la caña de azúcar, el resto a ganado de doble propósito y zonas de protección boscosa. La zona de estudio presenta un relieve plano, microrelieve liso con una pendiente oeste-este del 1%. Son suelos con una profundidad efectiva > 1 m y un drenaje restringido con una permeabilidad moderada a lenta. En el cuadro 1, se presentan los valores adecuados de las características químicas y físicas para dos profundidades en el cultivo de caña de azúcar. La zona de estudio presenta una precipitación media anual de 1253 mm, con un comportamiento bimodal con dos picos anuales, uno en Abril-Mayo y el otro en Octubre-Noviembre (Maldonado, 1998)

En el área de estudio se han realizado varios trabajos que permiten constatar las potencialidades y limitaciones existentes de los suelos. Estos suelos aluviales se clasifican como Fluventic Ustochrepts, franco y franco limosa, mixta, isohopertérmica, plana, imperfectamente drenada, fuertemente alcalina (Maldonado, 1998).

Un reconocimiento preliminar del área de muestreo, el cual se llevó a cabo sobre un tablón de caña de azúcar de 1.82 ha, permitió hacer un chequeo de los suelos, relieve, la vegetación y aspectos relacionados con el uso de la tierra. Con el fin de establecer el procedimiento de muestreo, éste se realizó en dos etapas: en la primera se establecieron dos transectas: (N-S) perpendicular al Río Monaicito, allí se tomaron 21 muestras a una distancia de 7 m entre si, y (E-O) paralela al río, se tomaron 11 muestras a una distancia de 9 m (Figura 1). A partir de este primer muestreo se construyeron los semivariogramas para las variables analizadas y se determinaron los rangos de dependencia espacial, lo cual sirvió para escoger la distancia de muestreo para el análisis geoestadístico. En la segunda etapa se diseñó un muestreo geoestadístico (Sumner, 1999), en el cual se establecieron 88 puntos de muestreo tal como se ilustra en la Figura 2. En cada punto, se tomaron muestras a dos profundidades, (0-30) y (30-50) cm., y se estableció su ubicación en términos de sus coordenadas (x, y). *Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Servicio de Análisis de Suelos del NURR, ULA, allí se hicieron los siguientes análisis: porcentajes de arena, limo, arcilla, contenidos de fósforo, potasio, calcio, magnesio (mg kg^{-1}), pH y CE (Gilbert de Brito et al., 1990).* Posteriormente se realizaron mediciones en el campo sobre el cultivo, se tomaron en cuenta dos variables fisiológicas: Altura (cm.) y Diámetro (cm.) de la planta a los 5 meses después de la siembra. También se hicieron mediciones de altura del terreno en cada punto para observar el desnivel dentro de la parcela. *Es de hacer notar, que para efecto del análisis estadístico de los datos, se tomo toda la información recogida en los dos muestreos, para un total de 109 puntos de muestreo a dos profundidades, con sus respectivas coordenadas. La distancia entre nodos dentro de la cuadrícula fue variable (4 - 20 m) como se recomienda en un muestreo geoestadístico (Sumner, M.E. 1999).* Las variables de suelo y de la planta fueron sometidas a los siguientes análisis estadísticos: pruebas de normalidad, estadísticas descriptivas (media, varianza, desviación estándar, mínimo, máximo, coeficiente de variación (CV). La estadística descriptiva y el coeficiente de variación en particular, son las medidas que dan una indicación de la exactitud relativa de los métodos de interpolación (Gotway et al., 1996). Con la información obtenida se evaluó la correlación entre las variables del suelo, físicas y químicas, y las variables de la planta, diámetro y altura. *El coeficiente de correlación cuantifica la asociación que existe entre dos variables, es decir, cuanto de la variabilidad de una es explicada por la variabilidad de la otra.* Por otro lado, a través del valor p obtenido, se determina si las correlaciones son o no significativas. Es decir, si p es menor al 5% ó 1% indicara decir que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, con un nivel de confianza del 95% y 99% respectivamente. También, se establecieron las regresiones lineal simple entre las variables del suelo y de la planta (StatMost, 1995). Por ultimo, la dependencia espacial de las variables, fue realizado a través del análisis geoestadístico: semivarianza, semivariogramas Pannatier, 1996, y para la interpolación de los datos se usó el método Kriging Puntual (Surfer, 1999).

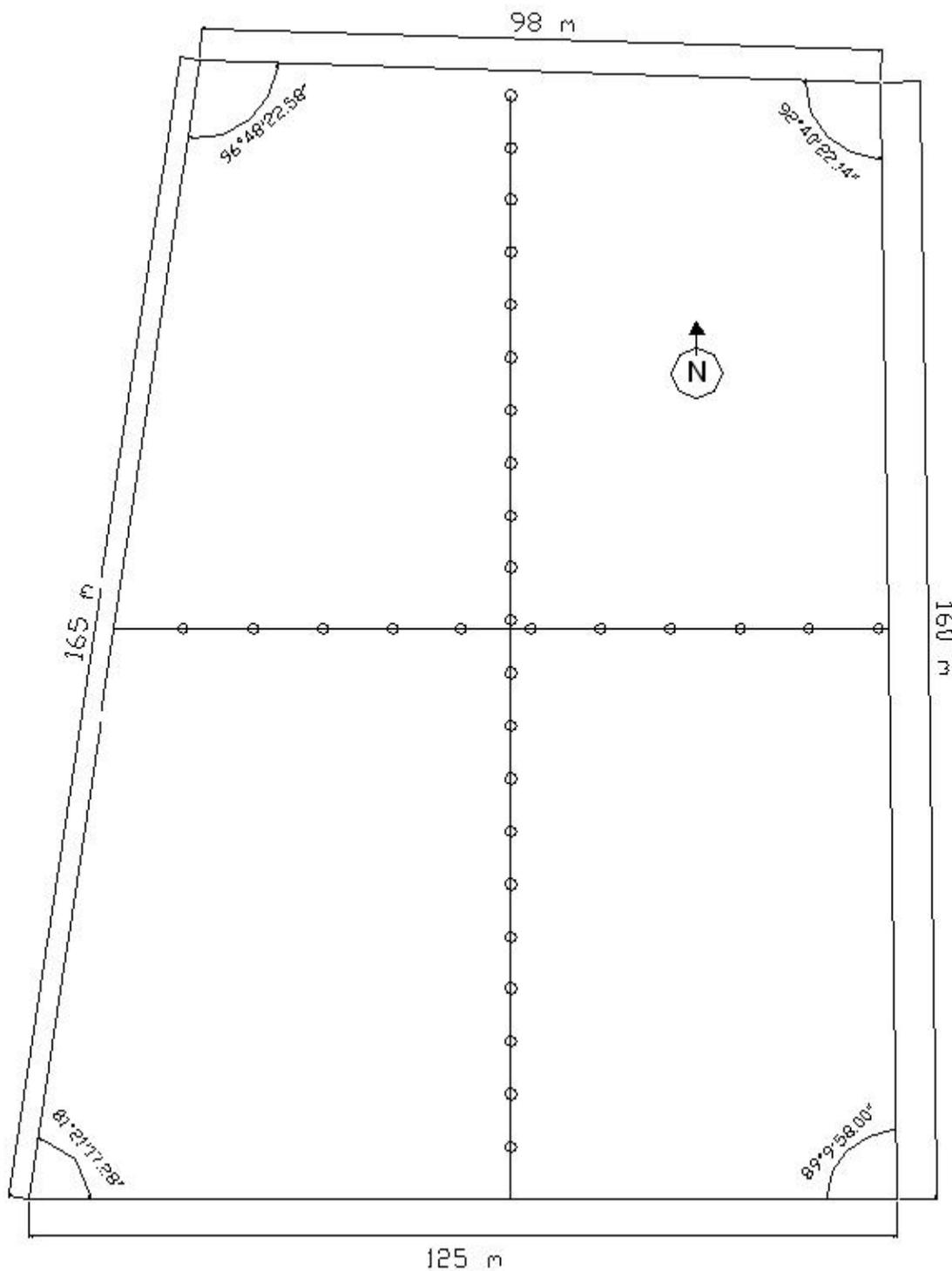


Figura 1. Transectas de puntos preliminares de muestreo dentro del tablón de Caña de Azúcar

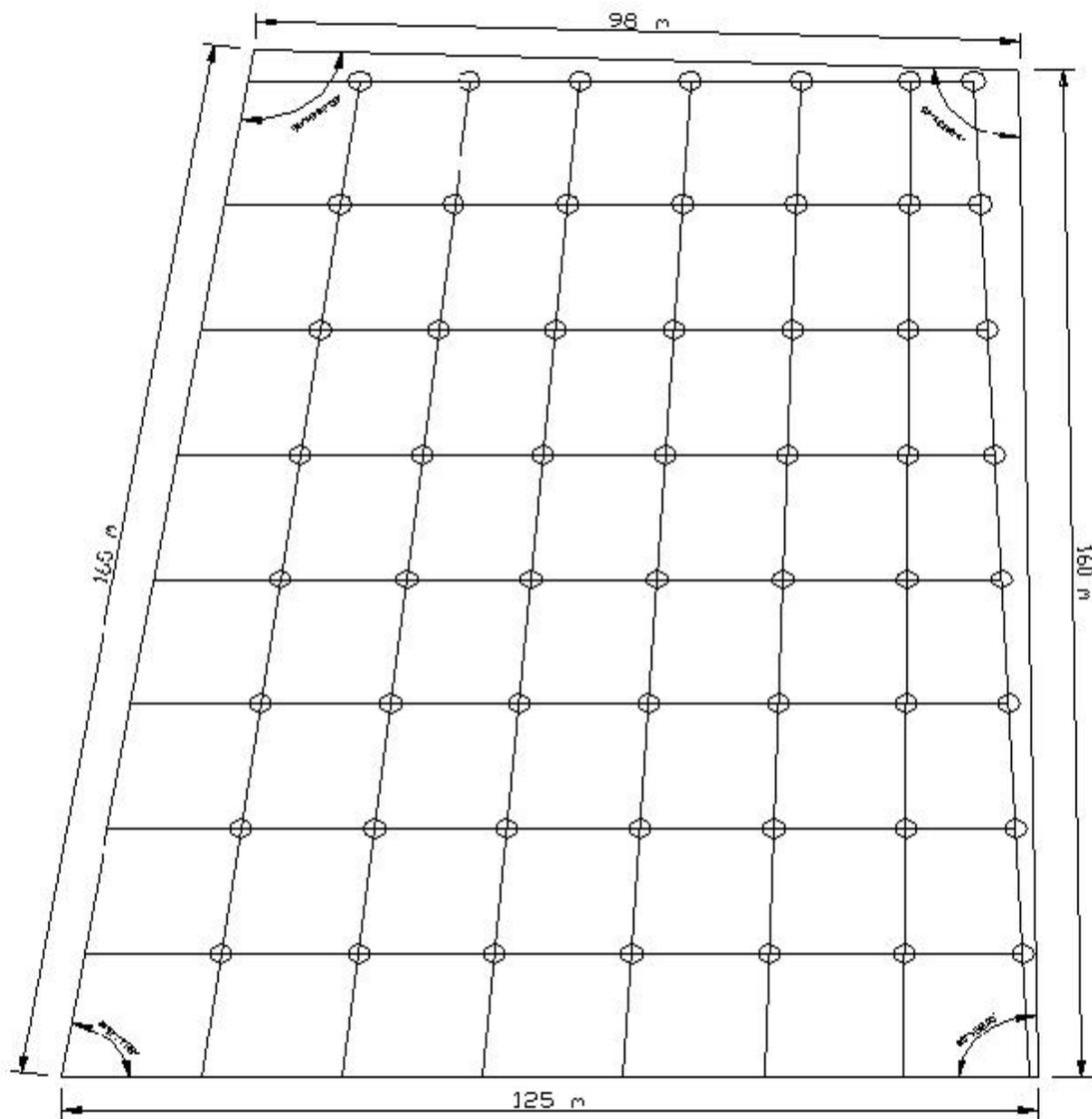


Figura 2. Diseño geoestadístico de muestreo dentro del tablón de Caña de azúcar

Cuadro 1. Fertilidad Integral del Suelo en Caña de Azúcar

Características	0-20 cm.	20-40 cm.	Valor Adecuado*
Textura	FL	FL	F
% de arena	18,4	10,4	Hasta 35
% de limo	55,2	63,2	Hasta 20
% de arcilla	26,4	26,4	< 38
Fósforo (mg kg ⁻¹)	T	T	18 - 30
Potasio (mg kg ⁻¹)	332	148	105-200
Calcio (mMoles _c .L ⁻¹)	3,63	6,52	1 - 10
Magnesio (mMoles _c .L ⁻¹)	1,54	0,56	0,2 – 6
Hierro (mg kg ⁻¹)	45	19	20 – 80
Manganeso (mg kg ⁻¹)	81	42	15 - 100
Cobre (mg kg ⁻¹)	7,8	3,6	3 – 20
Zinc (mg kg ⁻¹)	26	24	9 – 36
SO ₄ (mmoles _c .L ⁻¹)	5,76	4,92	6 - 20
MO (%)	3,50	1,90	> 3,3 – 5,0
pH 1:2,5 en agua	8,3	8,3	6,5-7,2
<u>CE. 1:5 dS cm⁻¹</u>	0,23	0,17	0,20 – 0,45
RAS	1,40	1,20	< 2
CIC (cmol _c kg ⁻¹)	28,26	--	> 20
Ca interc. (cmol _c kg ⁻¹)	16,83	--	10 – 20
Mg interc. (cmol _c kg ⁻¹)	8,55	--	3 – 7
K interc. (cmol _c kg ⁻¹)	1,53	--	1 – 2
Na interc. (cmol kg ⁻¹)	1,35		¿

RESULTADOS Y DISCUSION

La normalidad de los datos para cada variable fue hecha a través de la prueba Shapiro-Wilk's W (D'Agostino *et al.*, 1990). No se observaron valores atípicos, y todas las variables analizadas tuvieron una distribución normal, lo cual es un requisito para la obtención de semivariogramas experimentales, debido a que estos son sensitivos a la simetría de las distribuciones (Myers, 1991). En el análisis descriptivo de los datos se tomó en cuenta que aquellas variables con CV > 65% se consideran de una alta variabilidad, con CV entre 25 y 65% se califican de variación media, y aquellas < 25% son consideradas de baja variabilidad (Sumner, 1999). De este análisis se obtuvo lo siguiente: las variables P y K presentan una alta variabilidad, las variables CE, Ca, y Mg muestran una mediana variabilidad y las variables pH, arena y limo muestran una baja variabilidad. Esto coincide con lo planteado por Trangmar, *et al.*, 1985, quien hace una revisión de los coeficientes de variación de las propiedades del suelo en varios trabajos de investigación. Muchas propiedades afectadas por el manejo del suelo, por ejemplo fósforo soluble, cationes cambiabiles, sulfatos solubles y sulfato total son comúnmente mas variables que las propiedades morfológicas (color, espesor del horizonte A), físicas (distribución de tamaño de partículas, densidad aparente), y químicas (pH), estas ultimas propiedades son usadas para definir unidades taxonómicas (Beckett y Webster, 1971; Adams y Wilde, 1976 y Wilding y Dress, 1978, 1983). Wilding y Dress (1983), dan coeficientes medios de variación para el calcio, magnesio y potasio cambiabiles de 50-70 %, fluctuando hasta 160 %. Ellos también concluyeron que

la variabilidad de las propiedades físicas tales como límites de Atterberg, fracciones de tamaño de partículas, densidad aparente y contenido de agua (CV de 10-53 %), es muy a menudo menor que la conductividad hidráulica (CV de 50-150 %) medido sobre la misma área. Estos resultados también son similares a los observados por Cox *et al.*, (2003) citado por Ortega (2004), quienes determinaron en sus ensayos de campo, que las características nutricionales del suelo como el contenido de N, P y K fueron siempre inestables en el tiempo y el espacio, mientras que en todos los campos el pH fue la característica de menor variación. Por lo tanto, hay propiedades tales como el pH y MO que son más estables en el espacio, lo que permite hacer una mejor predicción de su comportamiento a través del terreno y por ende de su influencia sobre el rendimiento. Shepers *et al.* (2004), constataron en un estudio, que a pesar de contar con información generada durante un largo periodo de tiempo, una lluvia o la incorporación de rastrojos puede cambiar el contenido de los nutrientes en el suelo, la absorción de estos por parte de la planta, así como su efecto sobre el rendimiento. El desnivel del terreno, la altura y diámetro de la planta, muestran una baja variabilidad a través del campo, (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticas descriptivas de algunas variables del suelo y del cultivo de Caña de Azúcar.

Variables	Media (X)	D.E (S)	Varianza (S ²)	C.V %	Min.	Max.
pH (0-30)	8.64	0.41	0.17	4.88	7.02	9.70
pH (30-50)	8.70	0.35	0.12	4.12	7.70	10
C.E (0-30) dSm ⁻¹	1.31	0.52	0.27	36.09	0.46	3.03
C.E (30-50) dS m ⁻¹	0.92	0.36	0.13	35.41	0.47	2.41
Ca (0-30) mg kg ⁻¹	1380	406.34	165113.88	27.61	680	2920
Ca (30-50) mg kg ⁻¹	1000	458.55	210269.95	43.62	100	3320
Mg (0-30) mg kg ⁻¹	1152	294.57	86772.12	24.70	480	2136
Mg (30-50) mg kg ⁻¹	816	368.35	135686.68	42.20	312	2880
P (0-30) mg kg ⁻¹	27.77	19.44	378.11	67.28	0.60	133.43
K (0-30) mg kg ⁻¹	51.01	53.59	2872.32	84.47	8.63	234.39
a (0-30) %	37	8.11	65.83	22.59	20	66
L (0-30) %	48	6.76	45.79	14.34	20	62
A (0-30) %	18	4.60	21.24	27.11	4	26
Desnivel m	1.55	0.07	0.0059	4.97	1.35	1.77
Diámetro cm.	2.20	0.34	0.11	15.86	1.10	2.80
Altura cm.	100	20.70	428.63	20.46	51	149

El análisis de correlación y regresión simple entre las variables del suelo y las variables dependientes Diámetro y Altura de la planta permitió corroborar que en general los coeficientes de correlación (r) y de determinación R^2 son bajos ($< 0,1$), Cuadros 3 y 4, lo cual indica una baja asociación entre estas variables. Sin embargo, la variable limo presenta una correlación negativa ligeramente superior de $(-0,215)$ y

de (-0,249) con respecto a las variables diámetro y altura de la planta respectivamente. También se presenta una correlación negativa de -0,219 entre la CE y la Altura de la planta para la profundidad (0-30 cm.), y de (-0,193) entre el pH y la altura de la planta para la profundidad (30-50 cm.), indicando que estas variables están incidiendo negativamente en el desarrollo del cultivo, lo cual está asociado a problemas de drenaje y salinidad que inciden negativamente en el desarrollo del cultivo. Es de hacer notar que el valor promedio del pH en estos suelos es de 8,64 y de 8,70 para las dos profundidades (0-30) y (30-50) cm. respectivamente, Cuadro 2.

Cuadro 3. Regresión Lineal Simple (R^2) y Coeficiente de Correlación (r) de la Variable dependiente Diámetro del tallo de la Planta.

Profundidad (0-30 cm.)			
Variable Independiente (Suelo)	Ecuación $Y = a + bx$	R^2	r
pH	$D = 2,3012 - 0,0185 \cdot \text{pH}$	0,000516	-0,0227
CE dS m^{-1}	$D = 2,2449 - 0,070 \cdot \text{C.E}$	0,011672	-0,1080
Ca mg kg^{-1}	$D = 2,0875 + 0,0 \cdot \text{Ca}$	0,002044	0,0452
Mg mg kg^{-1}	$D = 2,0631 + 0,0001 \cdot \text{Mg}$	0,003385	0,0582
P mg kg^{-1}	$D = 2,1344 + 0,0003 \cdot \text{P}$	0,000305	0,0175
K mg kg^{-1}	$D = 2,1649 - 0,0003 \cdot \text{K}$	0,002925	-0,054
Arena %	$D = 2,1122 + 0,0009 \cdot \text{a}$	0,000425	0,0206
Limo %	$D = 2,6540 - 0,0108 \cdot \text{L}$	0,046465	-0,2156*
Arcilla %	$D = 1,8930 + 0,0147 \cdot \text{A}$	0,039812	0,1995*
Desnivel m	$D = 2,0828 + 0,0391 \cdot \text{Des.}$	0,000078	0,0088
Profundidad (30-50 cm.)			
pH	$D = 2,6439 - 0,0579 \cdot \text{pH}$	0,003690	-0,0607
CE dS m^{-1}	$D = 2,2462 - 0,0995 \cdot \text{C.E}$	0,011524	-0,1073
Ca mg kg^{-1}	$D = 2,2049 - 0,0001 \cdot \text{Ca}$	0,006274	-0,0792
Mg mg kg	$D = 2,2771 - 0,0001 \cdot \text{Mg}$	0,025405	-0,1594

R^2 = Coeficiente de determinación de la variable, r = Coeficiente de correlación de la variable, D= diámetro del tallo, * significancia con $p < 0.05$

Las variables estudiadas presentaron dependencia espacial dentro de la parcela, con rangos que fluctuaron entre 4 y 98 m. La mayoría de las variables presentó un efecto Nugget Relativo entre 36.4 % y 75 % indicando esto una moderada dependencia espacial (Cambardella *et al*, 1994). Solo las variables potasio (K) y arcilla (A) presentaron una débil dependencia espacial, lo cual indica una alta variación a cortos rangos de distancia, menor de 4 m. Los semivariogramas encontrados mostraron patrones desde débil dependencia espacial hasta fuerte dependencia espacial, así se obtuvo que ocho (8) variables presentan modelos esféricos, siete (7) gaussianos y uno (1) exponencial, lo cual corrobora que el componente al azar no es muy marcado, a excepción de las variables arcilla (A), magnesio (Mg) y potasio (K), Cuadro 5.

Cuadro 4. Regresión Lineal Simple (R^2) y Coeficiente de correlación (r) de la variable dependiente Altura de la Planta

(0 – 30 cm.)			
Variable Independiente (Suelo)	Ecuación $Y = a + bx$	R^2	r
pH	$A = 150,4397 - 5,7712. \text{pH}$	0,013528	-0,1163
CE	$A = 113,7902 - 8,6676. \text{C.E}$	0,048314	-0,2198*
Ca	$A = 94,5311 + 0,0045. \text{Ca}$	0,007869	0,0887
Mg	$A = 93,4701 + 0,0065. \text{Mg}$	0,008471	0,0920
P	$A = 99,0186 + 0,0749. \text{P}$	0,004943	0,0703
K	$A = 101,4627 - 0,0044. \text{K}$	0,000131	-0,0115
arenas	$A = 90,5516 + 0,2960. \text{a}$	0,013459	0,1160
Limos	$A = 137,1563 - 0,7626. \text{L}$	0,062146	-0,2493*
Arcilla	$A = 95,4048 + 0,3398. \text{Arcilla}$	0,005723	0,0756
Desnivel	$A = 154,6630 - 34,6513. \text{Desnivel}$	0,016498	-0,1284
(30-50 cm.)			
pH	$A = 198,2901 - 11,2292. \text{pH}$	0,037419	-0,1934*
CE	$A = 109,6026 - 8,1333. \text{C.E}$	0,009365	-0,1441
Ca	$A = 102,8055 - 0,0015. \text{Ca}$	0,001171	-0,0342
Mg	$A = 107,2766 - 0,0070. \text{Mg}$	0,015435	-0,1242

R^2 = Coeficiente de determinación de la variable, r = Coeficiente de correlación de la variable, A = altura de la planta, * significancia con $p < 0.05$

Cuadro 5. Parámetros de los Semivariogramas Omnidireccionales.

Variables	Nugget "Co"	V.E. "Cl"	Umbral "Co+Cl"	Alcance "a" m	Co/Co+Clx100 Nugget Relativo %	CDE	Modelo
pH (0 – 30)	0.08	0.14	0.22	95	36.4	M	Gaussiano
C.E (0 – 30)	0.201	0.08	0.281	60.47	71.53	M	Esférico
Ca (0 – 30)	125800	81600	207400	88.11	60.65	M	Gaussiano
Mg (0 – 30)	68800	39560	108360	94.05	63.5	M	Gaussiano
P (0 – 30)	250.8	170.9	349.8	99	71.7	M	Gaussiano
K (0 – 30)	2030	637	2667	4	76.1	D	Esférico
a (0 – 30)	32.24	37.62	69.86	69.3	46.1	M	Exponencial
L (0 – 30)	27.6	27.6	55.2	98	50	M	Gaussiano
A (0- 30)	17.99	3.15	21.14	3.96	85.1	D	Esférico
Diámetro	0.09	0.03	0.12	4.09	75	M	Esférico
Altura	184.9	275.2	460.1	31.68	40.2	M	Gaussiano

La interpretación de los mapas en contorno obtenidos por el método de interpolación “Kriging” a través del programa computarizado Surfer 7, 1999, nos permite comparar la variabilidad del suelo y de la planta. En la Figuras 3 y 4 se muestran los semivariogramas omnidireccionales de algunas variables del suelo que presentaron una mayor incidencia sobre el desarrollo del cultivo, tales como el pH y el porcentaje de limo. En la Figura 5 se presentan el semivariograma Omnidireccional y el mapa de contorno de la Altura de la planta, y en las Figuras 6 y 7 se presentan los mapas de contorno del potasio y del desnivel del terreno.

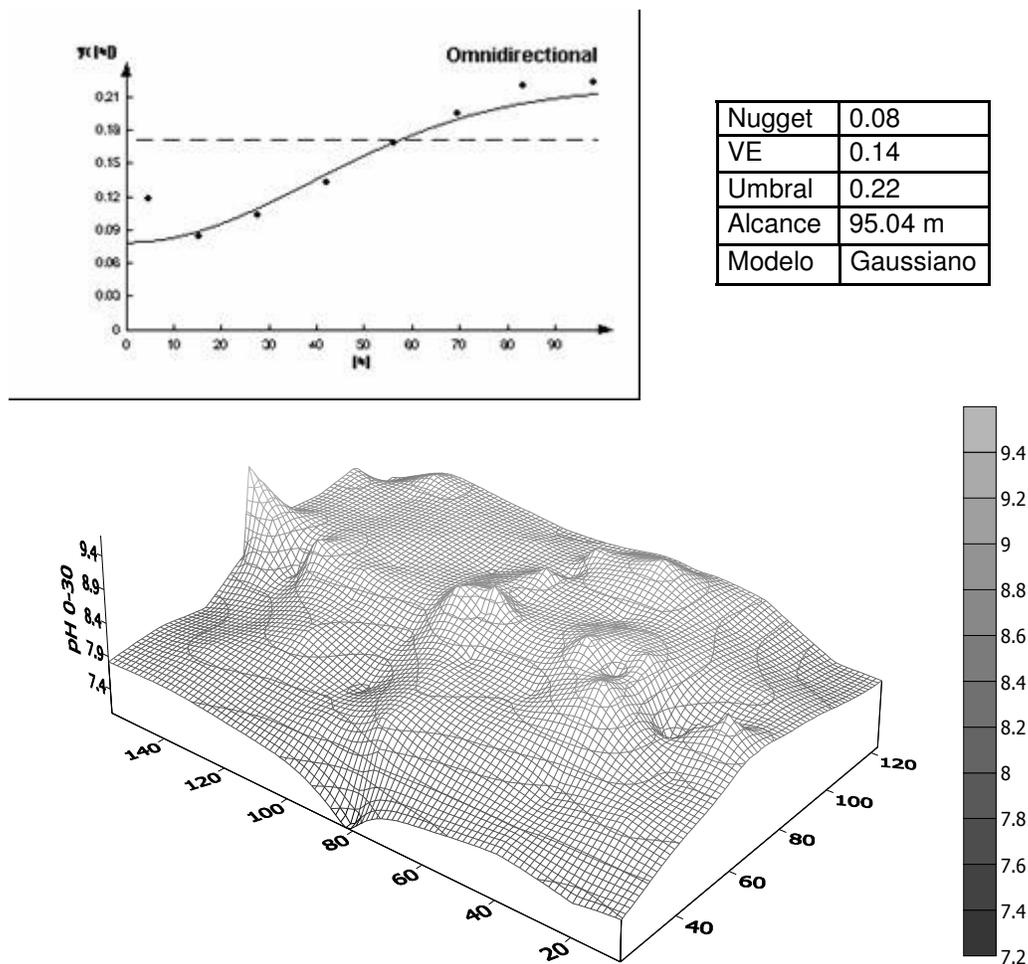


Figura 3. Semivariograma Omnidireccional y mapa de contorno para pH (0-30 cm.).

La variable pH, Figura 3, muestra una distribución que tiende a incrementarse hacia la parte central y norte de la parcela. En toda la extensión de terreno se tienen valores que se encuentran entre los rangos de 7,2 y 9,6 aproximadamente, estos se pueden clasificar como suelos alcalinos o básicos. La conductividad eléctrica no mostrada en las figuras, tiende a incrementarse hacia la derecha, semejante a la del pH, pero con valores más altos a la mitad de la parcela con rangos de 2 a 2,8 ds/m, lo cual indica posiblemente concentraciones altas de sales, debida posiblemente a mal drenaje, clases texturales donde prevalecen suelos con alto contenido de limo (Figura 4), mesa de agua alta en invierno especialmente en las partes bajas del terreno lo cual se puede observar en la Figura 6, donde se presentan posiciones bajas del terreno hacia la periferia de la parcela. En la Cuadro 1, se muestran los valores adecuados de los elementos que nutren al cultivo de caña de azúcar, así como los porcentajes de limo, arena y arcilla. La distribución del K en el suelo Figura 6, una de las variables mas importantes en la nutrición de la caña, presenta una variación muy alta con valores que van desde 8.63 a 234.4 m Kg⁻¹, esto se puede corroborar en el mapa de contorno para esta variable, donde se observan picos pronunciados del valor

del potasio dentro de la parcela, y zonas donde el potasio es muy bajo. Podemos decir en general que en cuanto al potasio, estos suelos tienden a ser pobres en la mayor parte de la parcela.

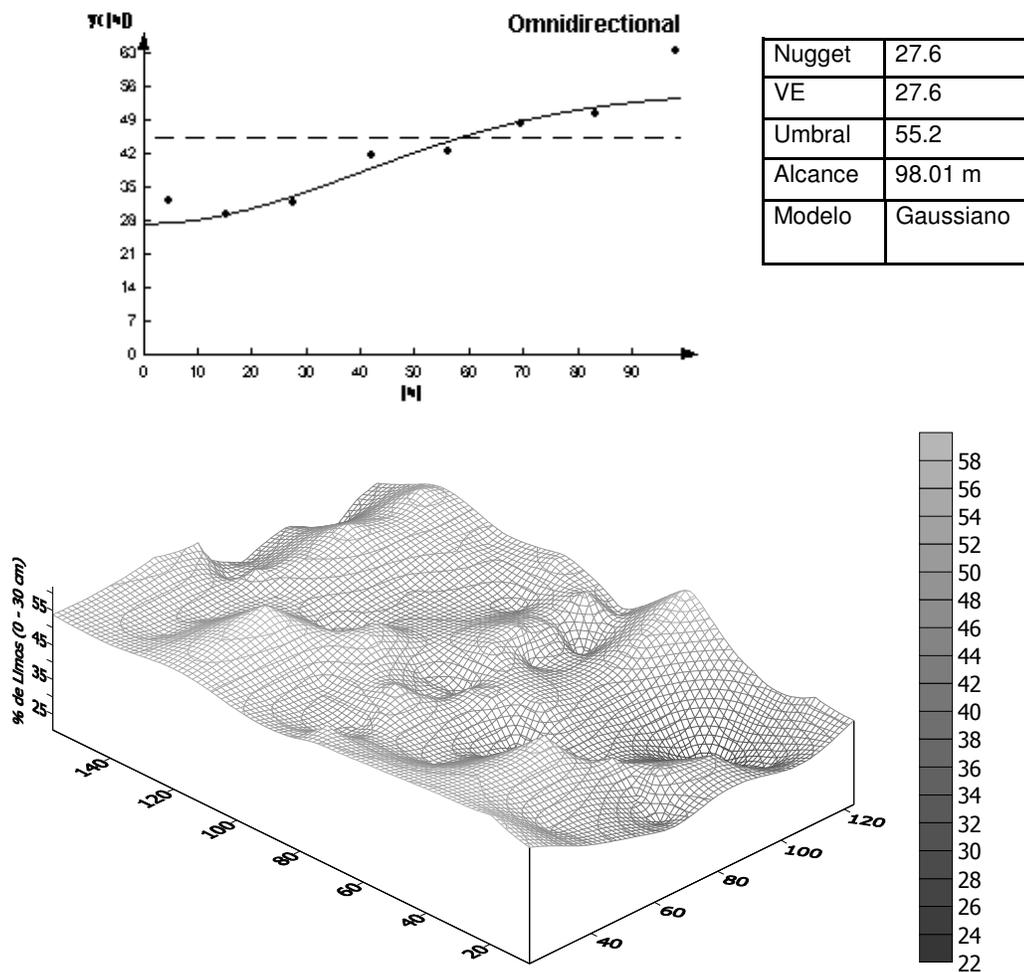


Figura 4. Semivariograma Omnidireccional y mapa de contorno para % de limo (0-30 cm.).

Para las variables físicas del suelo como lo es la textura (a, L y A) se observa que las partículas de limo, Figura 4, se encuentran en gran proporción en la mayor parte del terreno, un 80 % aproximadamente, con un rango entre 20 y 62 % de limo.

Las variables (Altura y diámetro) de la planta obtuvieron un comportamiento semejante a algunas variables del suelo. En la Figura 5 se muestra la distribución de la altura de la planta dentro de la parcela, en donde se observa una mayor altura hacia el norte, y con tendencia a ser menor hacia la parte este de la misma.

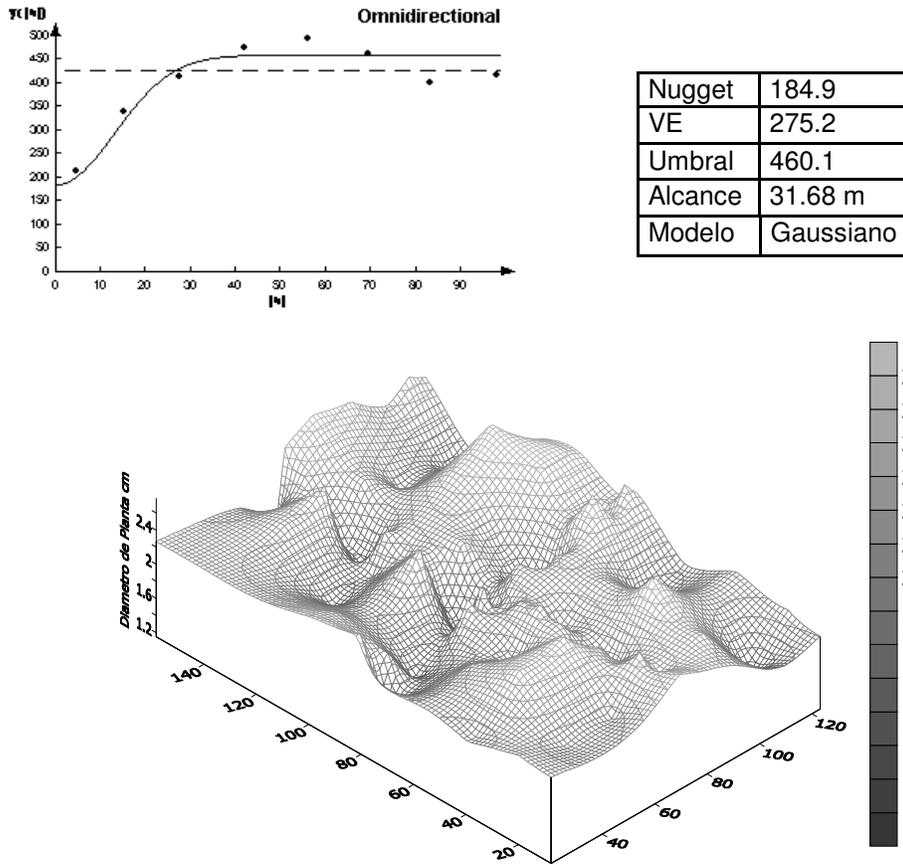


Figura 5. Semivariograma Omnidireccional y mapa de contorno de Altura de la Planta (m)

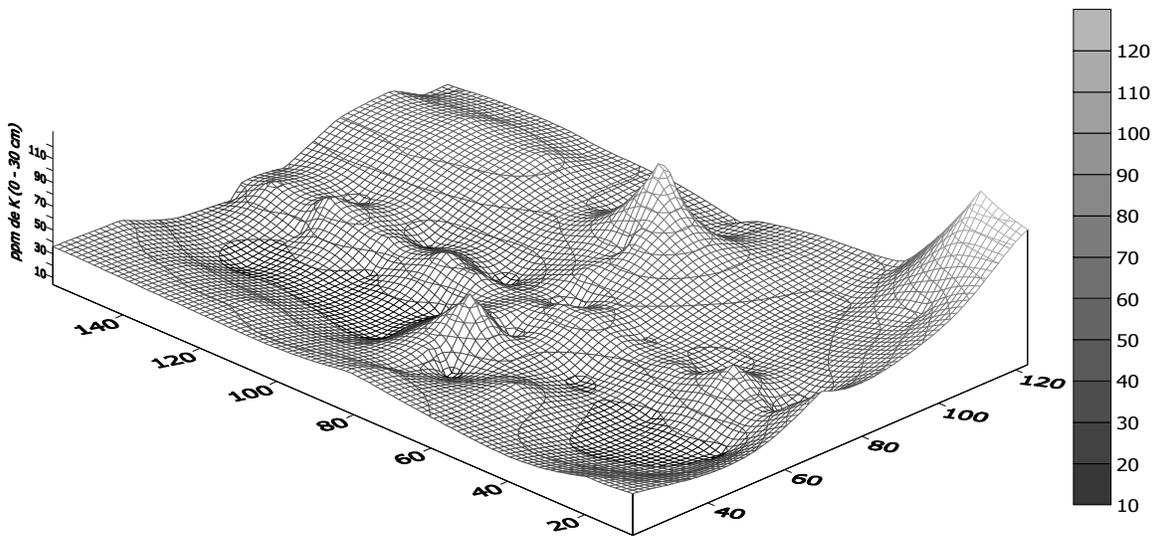


Figura 6. Mapa de contorno del potasio (mg.kg^{-1}) (0-30 cm.)

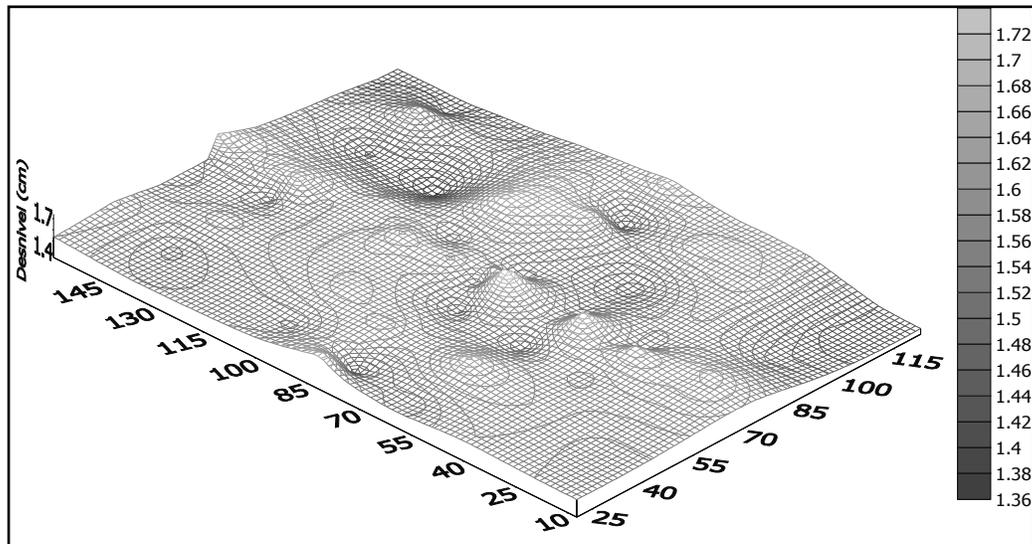


Figura 7. Distribución Espacial del Desnivel del terreno (m)

CONCLUSIONES

Del análisis de la estadística clásica, se concluye que algunas variables como P y K presentan coeficientes de variación (CV) mayores del 65%, que estos valores son altos y se consideran de una alta variabilidad en el campo, la CE y los contenidos de Ca, Mg y A (0-30 cm.) son de mediana variabilidad, y de baja variabilidad: pH, % de limo, diámetro y altura de la planta.

En general, los valores del coeficiente de correlación (r) son bajos lo cual indica una baja asociación entre las variables del suelo y de la planta. La variable porcentaje de limo presenta una correlación negativa ligeramente mas alta con respecto a la altura de planta (-0.24), y de (-0.21) con respecto al diámetro de la planta, mostrando como estas inciden negativamente en el desarrollo del cultivo. Esto indica que aquellas zonas donde el porcentaje de limo es alto, existen marcados problemas de mal drenaje, lo cual se refleja en el desarrollo de la caña de azúcar, cultivo altamente susceptible a problemas de aguachinamiento. El análisis geoestadístico de las variables analizadas, demostró que la varianza nugget (varianza aleatoria) se presenta en menor proporción en la mayoría de los semivariogramas, lo cual indica que en estos suelos hay una marcada dependencia espacial. En cuanto al Rango de Dependencia Espacial se encontró que existen valores desde 4 m hasta 98 m, esto indica se tiene un amplio rango de dependencia espacial y por lo tanto diferentes zonas de influencia, dependiendo de la variable que se este analizando. En los mapas generados por interpolación usando el Método de Kriging, se observó que algunas variables tienen tendencias parecidas, es decir, su distribución espacial es semejante. También se observó que algunas variables del suelo mostraron un efecto negativo sobre el desarrollo de la planta, tal es el caso del limo y el pH, que tiene una distribución amplia en la parcela, con valores mas altos hacia la parte N y O de la parcela para el limo, y valores menores hacia el S y SO de la parcela. Cuando se comparan ambas variables, % limo y pH del suelo, con la distribución de la altura de la planta, vemos que es difícil establecer una relación espacial nítida entre dichas variables. Se puede concluir que el efecto combinado de las variables del suelo analizadas, inciden integralmente en el desarrollo de las plantas de caña de azúcar, siendo las variables % de limo y pH y desnivel del suelo, las que tuvieron una mayor incidencia en el desarrollo del mismo.

LITERATURA CITADA

- Adams, J.A., y Wilde, R.H.** 1976. New Zeland Journal Agricultural Resources. 19:165-176.
- Beckett, P.H.T. y R.Webster.** 1971 Soil variability. A review. Soils and Fertilizers. 34:1-15.
- Blackmer, A.M. y White, S.E.** 1998. Using precision farming technologies to improve management of soil and fertilizer nitrogen. Austr.J.Agric.Res..49: 555-564.
- Brouder, S.M.** 1999. Applying site-specific management in soil fertility research and developing, management information for variable rate technologies. In Proceedings of Information Agriculture Conference. Purdue University. P. 321.

- Burrough, P.A.** 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford University Press. New York.
- Cambardella, C.A.; T.B. Moorman, J.M. Novak, D.L. Karlen, R.F. Turco y A.E. Konopka.** 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci.Soc.Am.J.*58: pp. 1501-1511.
- Cox, M., P. Gerard, M. Wardlaw, y M. Abshire.** 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil Sci. Soc. Am.J.*67: 1296-1302.
- D'Agostino, R. B. y M. A. Stevens.** 1986. Goodness of Fit Techniques. Marcel Dekker, Mew York.
- Fernández, O.** 1989. Variabilidad de algunas características edáficas en unidades cartográficas de la Cuenca del Lago de Valencia. Tesis de Postgrado en Ciencia del Suelo, Maracay. Facultad de Agronomía. UCV. Pp. 283.
- Franzen, D. W., V.L. Hofman y L.J. Cihacek.** 1966. Sampling for site-specific farming: Topgraphy and nutrient considerations. *Better Crops* 80 (3): 14-17.
- Gilabert de Brito, J; I. López de Rojas y R. Pérez de Roberti.** 1990. Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia. FONAIAP-CENIAP, Serie D, N° 26, Maracay, Venezuela. 164 p.
- Gotway, C., R. Ferguson, G. Hergert, y T. Peterson.** 1996. Comparison of kriging and inverse distance methods for mapping soil parameters. *Soil Sci.Soc.Am. J.* 60:1237-1247.
- Lamb, J., R. Dowdy, J. Anderson, y G. Rehm.** 1997. Spatial and temporal stability of corn grain yields. *Journal of Production Agriculture.* 10: 410-414.
- Machado, S., E.D.Jr. Bynum, T. Archer, R. Lascano, J. Bordovsky, K. Bronson, D. Nesmith, E. Segarra, D. Resenow, G. Peterson, W. Xu, y L. Wilson.** 2001. Spatial and temporal variability of sorghum and corn yield interactions of biotic and abiotic factors. Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19, July. American Society of Agronomy; Madison, USA.
- Maldonado, R.** 1988. Diseño preliminar de una obra de captación y un canal de derivación en el Río Monacito para la finca "El Reto" de la ULA-NURR, en Monay, Parroquia La Paz, Municipio Pampan, Estado Trujillo. Tesis Ingeniería Agrícola, 153 p.
- Myers, D.E.** 1991. Interpolation and estimation with spatially located data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 11: 209-228.
- Ortega, R.B.** 2004. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su relación con los rendimientos de maíz (*Zea mays L.*). Pontificia Universidad Católica de Chile. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Departamento de Ciencias Vegetales. Santiago, Chile.
- Ovalles, F.** 1992. Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. Maracay. Venezuela. FONAIAP. Centro Nacional de Investigaciones Agrícolas Generales. 44p, Serie B.
- Pannatier, Y.** 1996. Variowin. Software for Spatial data Analysis in 2D. Springer. Institute of Mineralogy. University of Lausanne. Switzerland.
- Ponce de Leon, D; P. Pablos, C. Balmaseda y M. Henriquez.** 1999. Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar en Cuba. *Revista Bioagro.* 11(1) 3-11. pp. 8.
- Schepers, A., Shanahan, J., Liebig, M., Schepers, J.S., Johnson, S. y Luchiari, A.** 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agron.J.* 96:195-203.
- StatMost,** 1995. Statistical Analysis and Graphics. Data Most Corporation Software. Sumner, M.E. 1999. Handbook of Soil Science. Section A. Soil Physics, Chapter 9, p.A-347.
- Surfer.** 1999. Surfer for Windows. Contouring and 3D Surface Mapping Software. Version 7. Golden CO. USA.
- Sumner, M.E.** 1999. Handbook of Soil Science. Editor-in-Chief. Malcolm E.Sumner. CRC PRES. Section A.Chapter 9.Soil Spatial Variability. Pag.A321.
- Trangmar, B.B., R.S.Yost y Uehara.**1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Adv. In Agronomy, Vol.38.Academic Press, New York, USA.
- Upchurch, D.R y W.J. Edmonds.** 1992. Statistical procedures for specific objectives. In: Spatial variabilities of soils and landforms. SSSA Special Publication N° 28, 2a Ed. Madison. Pp: 49-71.
- Wilding L. y L. Dress.** 1983. Spatial variability and Pedology. In: Pedogenics and Soil Taxonomy. Elsevier, Amsterdam. Pp. 83-116.
- Zerega, L.O.** 2000. Manual para orientar en la Caracterización y Manejo de los Recursos Agro ecológicos (clima, suelo, agua y planta) para la Producción de Caña de Azúcar.