

Interrelación entre unidades geológicas y propiedades del suelo en la cuenca alta del río Guárico, Venezuela

Interrelation between geologic units and properties of the soil in the high basin of the river Guárico, Venezuela

Alfredo E. Morales G.¹ y Jesús A. Viloría R.¹

¹ Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Instituto de Edafología. Apdo. Postal 4579.
E_mail: alfmoragom@hotmail.com; viloriaj@agr.ucv.ve

RESUMEN

La escasez de información de suelos en la Cuenca Alta del Río Guárico (Venezuela) constituye un serio obstáculo para la formulación de planes de manejo sustentable. Por esto, ha surgido la necesidad de predecir propiedades del suelo a partir de la información ambiental disponible. Este estudio tiene como propósito investigar si existen relaciones cuantitativas entre características del suelo y las formaciones geológicas que afloran en esta región, que permitan utilizar mapas geológicos para predecir propiedades relevantes de suelo.

ABSTRACT

The scarce soil information from the high watershed of the Guarico River (Venezuela) has been a great obstacle for sustainable land-use planning. This problem has raised the need for predicting soil properties from environmental information that is more easily available. This study pretends to investigate if there are quantitative relationships between soil properties and the geological formations appearing at this region, that allows using geological maps to predict relevant soil characteristics. A canonical discriminant analysis was carried out to determine correlations between soil properties and

Se realizó un análisis discriminante canónico para explorar la correlación entre las propiedades de los suelos y las unidades geológicas, y se evaluó la capacidad de predicción de estas unidades por medio de la correlación intraclass. Se emplearon 21 muestras del horizonte A y 20 del B. Se encontraron relaciones entre las unidades geológicas y las propiedades edáficas: relación calcio – magnesio (Ca/Mg), razón de adsorción de sodio (RAS), pH, conductividad eléctrica (CE), fósforo disponible y % arcilla. La correlación intraclass fue significativa para Ca/Mg, RAS, pH y CE. Desde el punto de vista agronómico, no se encontraron valores limitantes de sodio ni de sales. Los intervalos entre cuartiles indicaron que la heterogeneidad interna de algunas unidades geológicas afecta negativamente la calidad de las predicciones de pH y fósforo disponible. Los suelos son francos en casi todas las unidades geológicas, pero son arcillosos en la formación Guárico. Se concluye que la información geológica permite inferir algunas propiedades de los suelos; pero la heterogeneidad interna de las unidades geológicas limita la certeza de las predicciones de los valores de esas propiedades.

Palabras claves: Análisis Discriminante Canónico, Cuenca Alta del Río Guárico, Grupo Villa de Cura, Grupo Caracas, Serranía del Interior.

the geological units. The prediction capacity of these units was appraised by means of the intraclass correlation. Soil samples from 21 horizons A and 20 horizons B were used. It was found that the geological units are related to the soil properties: calcium–magnesium ratio, sodium sorption ratio, pH, electrical conductivity, available phosphorus and clay percentage. The intraclass correlation was significant for calcium–magnesium ratio, sodium sorption ratio, pH and electrical conductivity. It was not found limiting values of sodium or salts contents for agricultural uses. The interquartil ranges indicate that an internal heterogeneity affects negatively the prediction capacity of soil pH and available phosphorus within some of the geological units. Soils in this region are usually loamy; but they are finer on the Guarico formation. It is concluded that the geological units permit to infer the values of some soil properties, but their internal heterogeneity reduces the precision of such predictions.

Key words: Canonical discriminant analysis, high watershed of Guárico River, Villa de Cura Group, Caracas Group, Serranía del Interior.

INTRODUCCIÓN

La Cuenca Alta del Río Guárico alimenta al embalse Camatagua, la cual es una de las fuentes más importantes de agua para consumo humano y agrícola en la región centro-norte de Venezuela. Sin embargo, la misma se encuentra sometida a severos procesos de degradación ambiental, asociados a usos no sustentables de la tierra (Jácome *et al.*, 2001).

Un área tan extensa como ésta (alrededor de 2000 km²) abarca una gran diversidad de paisajes. Por esta razón, la identificación de la aptitud de sus tierras para tipos de utilización específicos, es un paso esencial para proponer lineamientos para la producción sostenible de agua en esta cuenca. Sin embargo, la escasez generalizada de información básica sobre los recursos naturales constituye un serio obstáculo para esta evaluación.

El Sistema de Información Ambiental de la Cuenca Alta del Río Guárico (SIACARG) reúne los datos disponibles para esta área geográfica sobre uso de la tierra, cobertura vegetal, capacidad de uso de la tierra, relieve (modelo digital de elevación), clima y geología, a escala 1:100.000 ó menor (Jácome, *et al.*, 2001). No obstante, la cuenca no dispone de mapas de suelos porque forma parte del 11 % del territorio de Venezuela que no fue cubierto por el programa de inventario nacional de este recurso a escala 1:250.000 (García, 1995).

Las propiedades de los suelos son producto de la acción de procesos que actúan sobre las rocas meteorizadas (regolitos) y los sedimentos. La influencia del material parental sobre las propiedades del suelo ha sido reconocida desde los primeros estudios edafológicos desarrollados en la historia, en los cuales los mapas de suelos tenían como fundamento las características geológicas del lugar. De esta forma, uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos estaba basado mayormente en el origen geológico y la composición litológica, referidos como material parental (Buol *et al.*, 1973).

Dada la relación de las formaciones geológicas con los materiales parentales de suelo, se debe esperar que los mapas geológicos sean útiles para predecir propiedades del suelo. Por ejemplo, De Kimpe et al (1984) señalan que las propiedades de los suelos provenientes de los materiales ácidos (ricos en cuarzo) son distintas de las propiedades de los suelos formados en los materiales básicos (ricos en silicatos ferromagnesianos o no ferromagnesianos). Asimismo, según Parsons (1978), en las zonas montañosas de Canadá, los suelos procedentes de los materiales piroclásticos son más evolucionados y más profundos que los suelos de granito y esquisto (Parsons, 1978).

La generalidad de los mapas geológicos usados como información básica en los estudios de suelos muestra la distribución geográfica de formaciones geológicas. Las delineaciones de estas unidades, al igual que las de las unidades cartográficas de suelos, tienen características similares y ocurren en posiciones espaciales predecibles. De acuerdo a Daniels y Hammer (1992), una formación geológica es una unidad litoestratigráfica fundamental, con un intervalo determinado de edad, ambiente de formación y litología.

No obstante, las formaciones geológicas delineadas todavía contienen una importante variabilidad interna. En adición a esto, si los materiales parentales de suelo han sido transportados, su homogeneidad depende no sólo de su fuente sino también de los procesos de transporte y sedimentación implicados (Daniels y Hammer, 1992). Finalmente, la influencia del material parental sobre las propiedades del suelo es mayor en regiones secas y en los estados iniciales de formación del suelo; en regiones húmedas y con el avance del tiempo, esta influencia puede ser opacada por la de otros factores formadores de suelos (Birkeland, 1984).

Según Smith y Hudson (1999), se atribuye a Dokuchaiev, en Rusia, y a Hilgard, en EUA, a finales del siglo XIX, haber sido los primeros en plantear que la variación espacial del suelo sigue ciertos patrones relacionados con la variación geográfica del clima, la vegetación, el material parental del suelo, el relieve y la edad de las formas de terreno. Estos elementos del paisaje son denominados, comúnmente, factores formadores de suelo.

Jenny (1941, 1961) intentó expresar matemáticamente el modelo a través de su ecuación de los factores de estado; pero los intentos de resolver esta ecuación resultaron mayormente en vano debido al desconocimiento de cómo relacionar más de dos variables a la vez. Estudios subsecuentes han estado similarmente restringidos casi totalmente a buscar relaciones lineales simples entre pares de variables; una de ellas es la propiedad de suelo y la otra una característica ambiental. Para revelar tales relaciones en condiciones más ventajosas se deben escoger los lugares de tal modo que con excepción de uno de los factores de estado, las características ambientales al menos varíen poco. El enfoque ha sido más experimental que hacia el estudio de suelos (Webster, 1977).

El avance de los procedimientos cuantitativos de análisis de datos ha dado lugar a diferentes métodos multivariados, que el desarrollo presente de las computadoras ha hecho accesibles para su aplicación a estudios de suelos. Entre ellos, el Análisis Discriminante Canónico es adecuado para determinar cuantitativamente si existe relación entre un grupo determinado de clases y un conjunto de variables cuantitativas, medidas sobre los mismos objetos (Viloria *et al.*, 2001, Morales, 2003).

Este estudio hace uso del Análisis Discriminante Canónico para investigar si existen relaciones entre las formaciones geológicas que afloran en esta región y las propiedades del suelo, que permitan predecir valores de propiedades edáficas relevantes, a partir de los mapas geológicos disponibles.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La Cuenca Alta del Río Guárico se sitúa en su mayoría en la Serranía Central del Interior, entre los estados Aragua, Carabobo y Guárico. Se ubica entre las coordenadas UTM: 1.079.112 – 1.127.335 (Norte) y 637.964 – 728.774 (Este). Su clima está representado por tres zonas de vida: Bosque Seco Tropical (50 %), Bosque Seco Premontano (10 %) y Bosque Húmedo Premontano (40 %) (Spósito y Elizalde, 2004). Geológicamente, el área de estudio en su mayor parte presenta rocas metavolcánicas que corresponden al grupo Villa de Cura (formaciones El Caño, El Chino, El Carmen y Santa Isabel) (Shagam, 1960). También existen rocas metasedimentarias del grupo Caracas (formaciones Las Brisas y Las Mercedes), rocas sedimentarias de las formaciones Paracotos y Guárico, rocas ígneas de la formación Tiara y rocas ígneas del Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro. Con respecto a su edad, los materiales de la formación Guárico tienden a ser los más jóvenes mientras que los materiales de los grupos Villa de Cura y Caracas tienden a ser los más antiguos (PDVSA – INTEVEP, 2006). Los sedimentos del Cuaternario se ubican en los valles intramontanos.

Datos

Debido a la escasez de información de suelos en la Cuenca Alta del Río Guárico, se consideraron 21 muestras de horizonte A y 20 muestras de horizonte B, de 20 perfiles descritos en un muestreo de reconocimiento de suelos de toda el área de estudio, realizado con una intensidad de 1 observación / 10 km² (Prada y Vilorio, 2004) (Figura 1). La información sobre formaciones geológicas fue derivada de las unidades de paisaje identificadas en el mapa geomorfológico a escala 1:250.000 de esa área (Ospina y Elizalde, 2004).

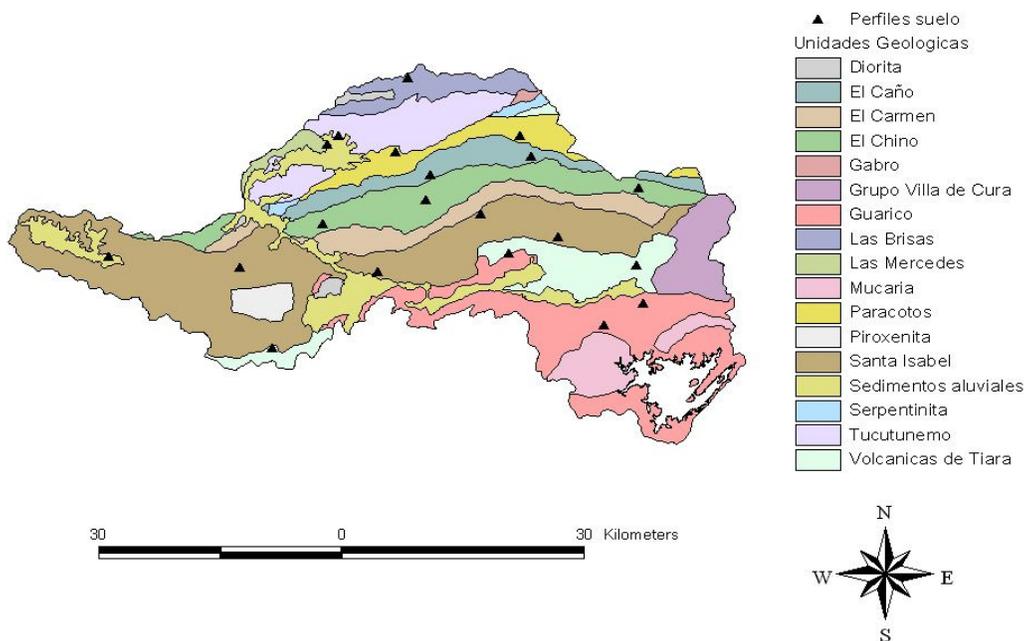


Figura 1: Distribución de puntos de muestreo en las unidades geológicas de la Cuenca Alta del Río Guárico (Fuente: Elaboración propia basada en Ospina-Elizalde (2004) y Prada-Vilorio (2004))

Las características de suelo estudiadas fueron las siguientes: % arcilla, % arena, capacidad de intercambio catiónico (CIC) determinado por acetato de amonio, relación calcio – magnesio intercambiables (Ca/Mg), relación calcio – potasio intercambiables (Ca/K), razón de adsorción de sodio (RAS), pH en agua 1:1, conductividad eléctrica del extracto (CE), % materia orgánica (% MO) y contenido de fósforo (P) extraído con la solución Carolina del Norte. La determinación de estas características fue realizada en el Laboratorio General del Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.

Se seleccionaron las relaciones Ca/Mg y Ca/K porque toman en cuenta la interacción entre los cationes básicos. Los contenidos individuales de calcio, magnesio, potasio y sodio no determinan la disponibilidad real de estos cationes para las plantas. Las proporciones ideales de las bases serían que el 65 al 75% del total sea Ca, 10 – 15 % Mg y 2 – 5% K para el desarrollo normal de la mayoría de los cultivos (Casanova, 1996). Esto conlleva a que los valores de la relación Ca/Mg deben ser superiores de 4 e inferiores de 8 y los de la relación Ca/K deben ser menores de 38. Si la relación Ca/Mg es menor que 4 hay deficiencia de calcio y mayor que 8 deficiencia de magnesio. Si la relación Ca/K es igual o mayor que 38 hay deficiencia de potasio.

Los atributos de color no fueron considerados debido a la insuficiencia de información de suelos en la Cuenca Alta del Río Guárico.

Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos a un Análisis Discriminante Canónico (ADC) por medio del procedimiento CANDISC del SAS (SAS/STAT, 1990). Este análisis permitió generar combinaciones lineales, llamadas variables canónicas, entre dos conjuntos de datos: 1) las unidades geológicas (como variables codificadas, *i.e.* clases), y 2) las características de los horizontes A y B del suelo (variables cuantitativas). Las variables canónicas sintetizan la correlación entre propiedades del suelo y las unidades geológicas. Además de esto, el ADC calcula las distancias entre las unidades geológicas en el espacio matemático multivariado caracterizado por las variables de suelos estudiadas y verifica si estas distancias son significativamente diferentes de cero (Vilorio *et al.*, 2001).

La capacidad de predicción de las características del suelo a partir de las unidades geológicas fue determinada por la correlación intraclase (r_i) expresada como:

$$r_i = s_b^2 / s_b^2 + s_w^2$$

donde s_b^2 es la varianza entre clases y s_w^2 es la varianza intraclase (Webster y Beckett, 1968).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso CANDISC del SAS generó 8 variables canónicas, de las cuales, las tres primeras presentan valores propios mayores que 1 y sintetizan el 89 % de la variabilidad de las unidades geológicas (Cuadro 1). Cada valor propio es igual a $R^2 / 1 - R^2$ donde R^2 es la correspondiente correlación canónica elevada al cuadrado. Este parámetro puede ser interpretado como el cociente entre la variación entre unidades geológicas y la variación dentro de esas unidades. La primera correlación es alta ($R^2 = 0,90$) que permite describir claramente la interrelación entre las propiedades de suelo y las unidades geológicas. Mientras que la segunda y la tercera correlación son moderadas ($R^2 > 0,50$), indicando ciertas asociaciones. La prueba F de la hipótesis nula revela que las dos primeras correlaciones son significativas para un nivel de probabilidad del 1% (Cuadro 2), lo cual indica que en el área de estudio existe asociación entre las propiedades de los suelos y las unidades geológicas, que permite diferenciar aquellos a partir de éstas.

Cuadro 1. Correlación canónica entre unidades geológicas y propiedades de suelo en la Cuenca Alta del Río Guárico

Variable canónica	Correlación canónica	(Correlación canónica) ²	Valor Propio	Proporción Absoluta	Proporción Acumulada
1	0,95	0,90	9,09	0,62	0,62
2	0,85	0,72	2,63	0,17	0,79
3	0,77	0,59	1,42	0,10	0,89

Cuadro 2. Prueba de hipótesis nula de que las correlaciones canónicas son iguales a cero en la Cuenca Alta del Río Guárico

Variable canónica	Razón de probabilidad	F	Probabilidad $D^2 = 0$
1	0,003	2,61	0,0001
2	0,032	1,73	0,0044
3	0,117	1,33	0,1074

Las propiedades de suelo que más contribuyen a la primera correlación canónica son la relación Ca/Mg, la conductividad eléctrica, el pH y el contenido de fósforo disponible (Cuadro 3). Por su parte, la segunda correlación canónica muestra una importante influencia de la razón de adsorción de sodio (RAS). En general, este análisis revela que ciertamente existe relación entre ciertas características químicas del suelo y las unidades geológicas. Sin embargo, las diferencias en granulometría no parecen ser significativas.

En la Figura 2, se puede apreciar que los suelos formados a partir de materiales de la formación Las Mercedes se ubican en el extremo positivo del primer eje canónico. Estos suelos presentan alta relación Ca/Mg, reacción ligeramente alcalina y altos contenidos de fósforo disponible. Por su parte, los suelos provenientes de Las Brisas, ubicados en el extremo positivo del segundo eje canónico, tienden a presentar valores relativamente más altos de RAS, mientras que los suelos originarios de los depósitos del Cuaternario ocupan el extremo negativo del segundo eje canónico, presentando valores relativamente más bajos de RAS. Además de esto, se observa cierto grado de solapamiento de las unidades Guárico, Paracotos, El Chino, El Caño, Santa Isabel y Tiara, alrededor de los ejes canónicos. Esto indica que los suelos de las unidades Las Mercedes, Las Brisas y depósitos del Cuaternario son diferentes entre sí, mientras que los suelos de las demás unidades son aparentemente similares.

Cuadro 3. Correlación entre variables canónicas y propiedades de suelo en la Cuenca Alta del Río Guárico

Característica	Variable canónica 1	Variable canónica 2
% Arcilla	0,22	0,26
% Arena	-0,24	0,31
CIC (cmol kg ⁻¹)	-0,08	0,15
Ca / Mg	* 0,84	-0,17
Ca / K	-0,10	-0,23
RAS	0,07	* 0,80
pH 1:1	* 0,71	-0,35
CE (dS m ⁻¹)	* 0,74	-0,18
% MO	0,12	-0,05
P (mg kg ⁻¹)	* 0,69	-0,16

*Correlaciones multivariadas estadísticamente significativas ($\alpha=0,01$)

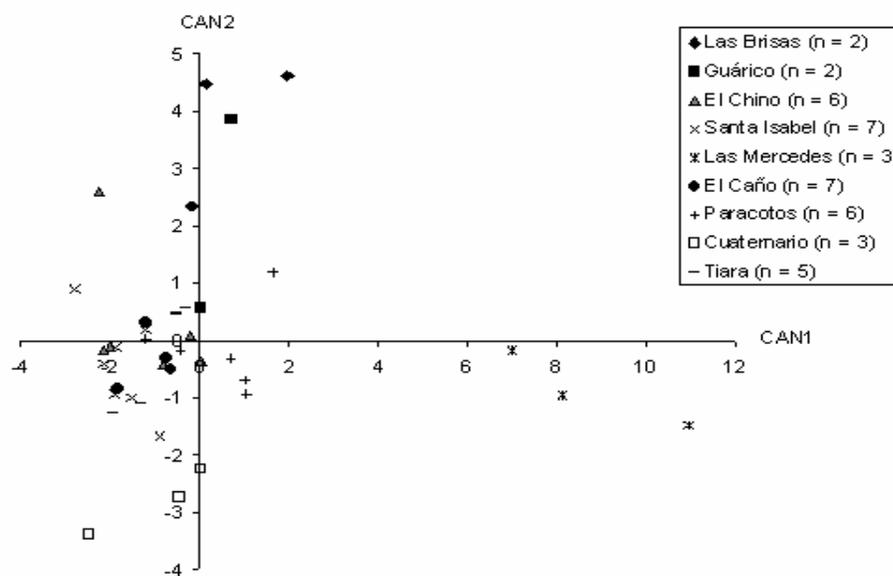


Figura 2. Diagrama de dispersión de horizontes de las unidades geológicas con respecto a los ejes canónicos 1 y 2

Las distancias de Mahalanobis reportadas en el Cuadro 4 indican que la variabilidad entre las unidades geológicas es determinada en gran parte por la formación Las Mercedes, la cual es marcadamente distinta a las demás. En vista de que la formación Las Mercedes no permite apreciar claramente la variabilidad entre los suelos de las otras unidades geológicas, se repitió el análisis considerando solamente las formaciones del grupo Villa de Cura y las formaciones Guárico, Paracotos y Tiara. Además, se tomaron en cuenta los depósitos del Cuaternario.

Cuadro 4. Distancia Mahalanobis entre unidades geológicas en la Cuenca Alta del Río Guárico

	Las Brisas	Guárico	El Chino	Santa Isabel	Las Mercedes	Paracotos	Cuaternario
El Chino	** 27,6						
Santa Isabel	** 34,2	** 22,6					
Las Mercedes	*** 88,7	*** 88,8	*** 100,9	*** 109,4			
Paracotos	** 27,3	* 19,9	** 11,5	* 10,5	*** 74,1		
Cuaternario	*** 61,9	** 28,9	* 15,9		*** 102,3	** 18,7	
Tiara	** 29,5	** 28,7			*** 97,6		* 17,7
El Caño	** 24,1				*** 94,8		

Diferencias estadísticamente significativas 0,10 (*), 0,05 (**) y 0,01 (***)

Al obviar los suelos del grupo Caracas (formaciones Las Mercedes y Las Brisas), el proceso CANDISC del SAS generó 6 variables canónicas de las cuales, las tres primeras son moderadas ($R^2 > 0,60$) y presentan valores propios mayores que 1 abarcando más del 80 % de variación de las unidades geológicas (Cuadro 5). Estas correlaciones son significativas para el nivel de probabilidad del 5%, señalando cierto grado de solapamiento entre esas unidades geológicas (Cuadro 6). En consecuencia, la variabilidad de los atributos del suelo dentro de las unidades geológicas es apreciable. En el Cuadro 7, se puede notar que la mayor contribución a la primera variable canónica procede del porcentaje de arcilla seguida por la capacidad de intercambio catiónico. La contribución del porcentaje de arena tiende a ser moderada para la segunda variable canónica.

Cuadro 5. Correlación canónica entre unidades geológicas y propiedades de suelo, sin las unidades Las Mercedes y Las Brisas

Variable canónica	Correlación canónica	(Correlación canónica) ²	Valor propio	Proporción absoluta	Proporción acumulada
1	0,81	0,66	1,96	0,34	0,34
2	0,79	0,62	1,62	0,28	0,62
3	0,75	0,56	1,26	0,21	0,83

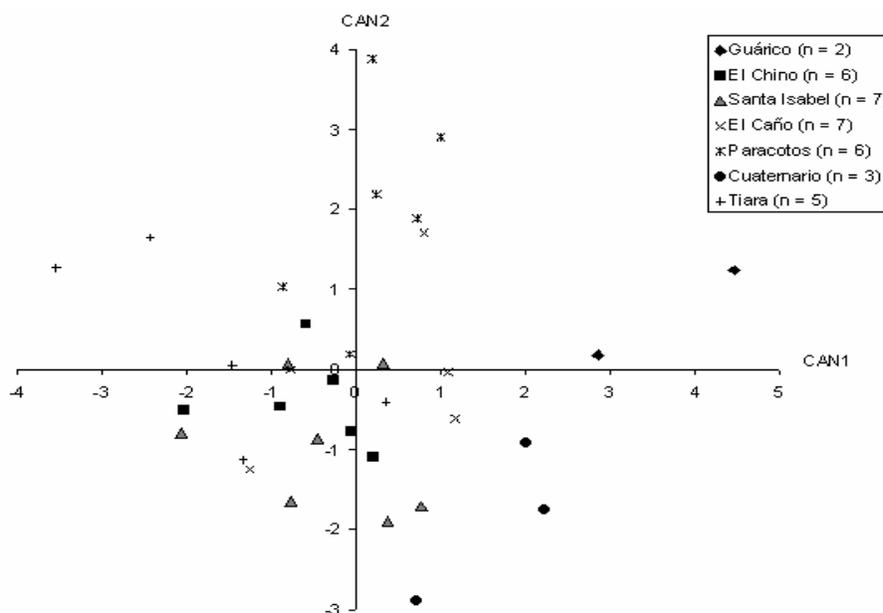
Cuadro 6. Prueba de hipótesis nula de que las correlaciones canónicas son iguales a cero, sin las unidades Las Brisas y Las Mercedes

Variable canónica	Razón de probabilidad	F	Probabilidad $D^2 = 0$
1	0,03	1,67	0,0115
2	0,08	1,52	0,0469
3	0,20	1,29	0,1826

Cuadro 7. Correlación entre variables canónicas y propiedades de suelo, sin las unidades Las Brisas y Las Mercedes

Característica	Variable canónica 1	Variable canónica 2
% Arcilla	0,68*	-0,10
% Arena	-0,25	0,49
CIC (cmol ⁺ kg ⁻¹)	-0,52	0,07
Ca/Mg	0,15	-0,39
Ca/K	-0,21	-0,24
RAS	0,48	0,26
pH 1:1	-0,15	0,40
CE (dS m ⁻¹)	-0,26	0,41
% MO	0,14	-0,01
P (mg kg ⁻¹)	-0,01	0,43

En la Figura 3, se observa un solapamiento entre las unidades geológicas, con la excepción de las unidades Cuaternario y Guárico. Los valores de la distancia de Mahalanobis reportados en el Cuadro 8 indican que la formación Guárico es la que más contribuye a la variabilidad entre las unidades geológicas. Los suelos derivados de esa formación, ubicados en el extremo positivo del primer eje canónico, tienden a tener mayor porcentaje de arcilla y menor capacidad de intercambio catiónico (Cuadro 7). Esto es dado por el predominio de cuarzo y mica en la fracción arcilla de los suelos de la unidad Guárico (Hernández *et al*, 2004). La mineralogía de los suelos de las demás unidades geológicas es representada mayormente por la vermiculita y esmectita, que presentan mayor capacidad de intercambio catiónico. Los suelos provenientes de los depósitos del Cuaternario son de textura francosa fina, mientras que los suelos de las unidades El Chino, Santa Isabel, El Caño, Paracotos y Tiara tienden a presentar textura francosa gruesa.

**Figura 3.** Diagrama de dispersión de horizontes de las unidades geológicas con respecto a los ejes canónicos 1 y 2, sin las unidades Las Brisas y Las Mercedes.

Cuadro 8. Distancia Mahalanobis entre formaciones geológicas, sin las unidades Las Brisas y Las Mercedes

Serías	Guárico	El Chino	Santa Isabel	Paracotos	Cuaternario
El Chino	* 22,3				
Santa Isabel	* 23,0				
Paracotos	* 21,7	* 11,5	* 10,8		
Cuaternario	* 27,0	** 18,8		** 19,3	
Tiara	** 33,6				** 19,9

Las medianas de las propiedades edáficas mostradas en el Cuadro 9 ilustran las diferencias entre las distintas unidades geológicas, respecto a las propiedades de suelo. En efecto, los suelos formados sobre materiales de la formación Las Mercedes presentan altos contenidos de calcio con relación al magnesio, deficiencia de Mg, pH ligeramente alcalino y un contenido muy alto de fósforo disponible. En cambio, los suelos derivados de la formación Paracotos tienden a mostrar una baja relación Ca/Mg y pH neutro. Finalmente, los suelos derivados de los demás materiales geológicos tienden a presentar una reacción moderadamente ácida, valores bajos de relación Ca/Mg y valores muy bajos de fósforo disponible.

Con respecto a la granulometría, los suelos originados de la formación Guárico tienden a ser arcillosos. Mientras que los suelos de Tiara, El Chino y Paracotos tienden a tener textura francosa gruesa (< 18% arcilla), y los suelos de Las Brisas, Las Mercedes, Santa Isabel, El Caño y depósitos del Cuaternario tienden a presentar textura francosa fina.

Cuadro 9. Medianas de las propiedades edáficas de las unidades geológicas en la Cuenca Alta del Río Guárico

Grupo	Unidad Geológica	% arcilla	Ca/Mg	RAS	pH 1:1	CE (dS m ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)
Caracas	Las Brisas	27	2,5	0,09	5,8	0,1	1
	Las Mercedes	28	49,4	0,01	7,7	0,3	73
	El Chino	17	1,3	0,01	6,1	0,1	7
Villa de Cura	El Caño	19	1,8	0,02	6,3	0,1	1
	Santa Isabel	19	2,3	0,02	5,6	0,1	3
	Paracotos	15	0,9	0,02	6,6	0,2	7
	Tiara	13	0,7	0,01	6,2	0,1	3
	Guárico	39	1,7	0,07	5,9	0,1	3
	Cuaternario	30	1,7	0,00	6,2	0,1	1

El Cuadro 10 muestra los valores de correlación intraclase (r_i). Este parámetro puede variar entre 0, cuando no hay diferencias entre las clases ($s_b^2 = 0$), y 1 cuando las clases son diferentes entre sí e internamente uniformes ($s_w^2 = 0$). Sin embargo, no hay criterios preestablecidos para su interpretación.

Los valores de correlación intraclase son más altos (> 0,45) para la relación Ca/Mg, el pH y la razón de adsorción de sodio (RAS). Por ende la información geológica de la Cuenca Alta del Río Guárico puede ser utilizada para predecir estas propiedades con mayor certidumbre. La correlación intraclase es un poco menor para la conductividad eléctrica, el porcentaje de arcilla y el contenido de fósforo disponible, siendo menor la confiabilidad de su pronóstico.

Los intervalos entre cuartiles de las propiedades del suelo revelan que la heterogeneidad interna de algunas unidades geológicas puede afectar la calidad de predicción del pH y el fósforo disponible (Cuadro 11). En efecto, los suelos provenientes de los materiales de El Chino pueden ser desde fuertemente hasta ligeramente ácidos; los derivados de materiales de la formación Guárico pueden presentar reacciones que van de fuertemente ácida a neutra y los de la unidad Tiara varían de moderadamente ácidos a neutros. Por otra parte, los suelos originados de la formación Paracotos presentan contenidos de fósforo que varían de muy bajo a medio, lo cual limita la certeza del pronóstico de sus valores.

Sin embargo, los valores de pH y fósforo disponible en el suelo son predecibles con mayor certidumbre en las unidades Las Brisas, Las Mercedes, El Caño y Cuaternario. Por otra parte, en los suelos de la Cuenca Alta del Río Guárico no se han encontrado valores limitantes de sodio ($RAS < 1$) ni de sales ($CE < 1$ dS/m), desde el punto de vista agronómico (Cuadro 11).

Cuadro 10. Promedio de la muestra, varianza total, varianza intraclase, varianza interclase y correlación intraclase (r_i) para las propiedades edáficas de las unidades geológicas en la Cuenca Alta del río Guárico

Propiedad	Promedio	s_t^2	s_w^2	s_b^2	r_i
% arcilla	21,4	138,9	96,0	47,8	0,33
Ca/Mg	5,8	309,7	110,4	224,0	0,67
pH 1:1	6,1	0,5	0,3	0,2	0,46
RAS	0,02	0,001	0,0003	0,0004	0,52
CE	0,1	0,01	0,003	0,002	0,41
P (mg kg^{-1})	14,7	1247,3	800,4	500,7	0,38

Cuadro 11. Intervalos entre cuartiles de las propiedades edáficas de las unidades geológicas en la Cuenca Alta del Río Guárico

Grupo	Unidad Geológica	% arcilla	Ca / Mg	RAS	pH 1:1	CE	P
Caracas	Las Brisas	27 – 27	2,5 – 2,6	0,07 – 0,10	5,8 - 5,9	0,1 - 0,2	1 – 1
	Las Mercedes	27 – 28	35,1 – 75,8	0,01 – 0,01	7,5 - 7,8	0,3 - 0,3	51 – 128
	El Chino	15 – 22	1,2 – 1,5	0,01 – 0,02	5,2 - 6,2	0,1 - 0,2	5 – 9
Villa de Cura	El Caño	18 – 27	1,6 – 2,2	0,01 – 0,02	6,0 - 6,3	0,1 - 0,1	0 – 1
	Santa Isabel	11 – 23	1,7 – 2,7	0,01 – 0,03	5,5 - 5,7	0,1 - 0,1	2 – 4
	Paracotos	11 – 22	0,1 – 1,9	0,02 – 0,02	6,3 - 6,7	0,1 - 0,2	2 – 28
	Tiara	3 – 18	0,6 – 0,8	0,01 – 0,01	5,9 - 6,7	0,1 - 0,2	1 – 4
	Guárico	38 – 45	1,2 – 2,1	0,05 – 0,09	5,4 - 6,7	0,1 - 0,2	3 – 4
	Cuaternario	23 – 30	1,6 – 1,7	0,00 - 0,00	6,2 - 6,3	0,1 - 0,2	1 – 3

CONCLUSIONES

El Análisis Discriminante Canónico permitió describir la interrelación entre las unidades geológicas y las propiedades de los suelos. La información geológica de la Cuenca Alta del Río Guárico permite distinguir los suelos e inferir sus propiedades químicas, sobretodo la relación Ca/Mg, el pH y el fósforo disponible. Los suelos del grupo Villa de Cura que son predominantes en esa área de estudio presentan bajos contenidos de calcio con relación al magnesio, tendencia a acidez ligera o moderada y contenidos bajos de fósforo. Por el contrario, los suelos de Las Mercedes tienen una alta relación Ca / Mg, un pH ligeramente alcalino y son ricos en fósforo. En general, los suelos del área de estudio son de texturas medias, con excepción de la formación Guárico que tienden a ser más arcillosos.

Este estudio revela que la información geológica en la Cuenca Alta del Río Guárico permite inferir algunas propiedades de los suelos cuando no se dispone de mapas de suelos. Sin embargo, la heterogeneidad interna de las unidades geológicas limita la certeza de las predicciones de los valores de las propiedades edáficas. Por consiguiente, es necesario realizar estudios más detallados de suelos en las áreas pilotos y determinar la aplicabilidad de la geomática (modelo digital de elevación, imágenes de satélite) para la predicción de las propiedades de los suelos que puedan servir de apoyo para los planes de manejo sustentable de esta cuenca.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo es producto de la investigación realizada por el Núcleo de Investigación y Excelencia Manejo Integral de la Cuenca Alta del Río Guárico, como parte del Proyecto Iniciativa Científica del Milenio, conducido por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT) de Venezuela, con financiamiento del Banco Mundial y del Ministerio de Ciencia y Tecnología de la República Bolivariana de Venezuela.

LITERATURA CITADA

- Birkeland, P.** 1984. "Soils and Geomorphology". Oxford University Press. Oxford, U.K. 372 p.
- Buol S.W., Hole F.D. y McCracken R.J.** 1973. "Soil genesis and classification". Iowa, U.S., the Iowa University Press, Ames. pp 171 – 181.
- Casanova E.** 1996. "Introducción a la Ciencia del Suelo". Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. 379 p.
- Daniels R.B. y Hammer R.D.** 1992. "Soil geomorphology". John Wiley, New York. 236 p.
- De Kimpe C.R., Laverdiere M.R., Dejoux J. y Lasalle P.** 1984. "Effects of acidic and basic parent materials on formation of some soils in Québec (Canada)". *Geoderma*. 33(2): 101-118.
- Hernández W., Ospina A. y Elizalde G.** 2004. "Mineralogía de los suelos y materiales parentales de la Cuenca Alta del Río Guárico (Venezuela)". XVI Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XII Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo.
- García P.** 1995. "Los estudios de suelos en Venezuela: antecedentes, logros y perspectivas". En: *Boletín Técnico Especial: 40 años de la Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo*. 13º Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Maracay, 191 p.
- Jácome A., Aguerrevere G. y López M.T.** 2001. "Sistema de Información Ambiental Cuenca Alta del Río Guárico". Fundacite Aragua – Informe final. 110 p.
- Jenny H.** 1941. "Factors of soil formation". McGraw-Hill, New York. 281 p.
- Jenny H.** 1961. "Derivation of state factor equation of soils and ecosystems. *Soil Sci. Soc. AMER. Proc.* 25: 385 - 388.
- Morales A.** 2003. "Aplicabilidad del enfoque de conjuntos borrosos a la clasificación de suelos de la depresión del lago de Valencia". Tesis de Maestría en Ciencia del Suelo, Fac. Agr., UCV. Maracay, Venezuela. 126 p.
- Ospina A. y Elizalde G.** 2004. "Caracterización de paisajes, suelos y materiales parentales de la Cuenca Alta del Río Guárico". Núcleo de Manejo Integral de la Cuenca Alta del Río Guárico. Fac. Agr., UCV. Maracay, Estado Aragua. 102 p.
- Parsons R.B.** 1978. "Soil-geomorphology relations in mountains of Oregon, USA". *Geoderma*. 21(1): 25 -39.
- PDVSA - INTEVEP.** 2006. "Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela". Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN). <http://www.pdvsa.com/lexico/>
- Prada R. y Vilorio J.** 2004. "Diagnóstico general de las propiedades del suelo en la cuenca alta del Río Guárico". Fac. Agr., UCV. Maracay, Estado Aragua. 29 p.
- SAS/STAT.** 1990. "User's Guide, Version 6, Volume 1". Fourth Edition. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. pp 1 - 890.
- Shagam R.** 1960. "Geología de Aragua central (Venezuela)". III Cong. Geol. Venez. Caracas, 1959, 2: 574 – 675.
- Smith H. y Hudson B.** 1999. "Soil survey in the Twenty-first Century". In: *Internacional Conference on Soil Resources: their inventory, análisis and interpretation for use in the 21st century*. Minneapolis, USA, Department of Soil, Water and Climate, University of Minnesota. p.p. 174 – 185.
- Spósito M. y Elizalde G.** 2004. "Caracterización Climática de la Cuenca Alta del Río Guárico". Núcleo de Manejo Integral de la Cuenca Alta del Río Guárico. Fac. Agr. UCV. Maracay, Edo. Aragua. 39 p.
- Vilorio J., Jácome A., Elizalde G. y Rangel L.** 2001. "Utilidad de la subdivisión de la depresión del lago de Valencia en unidades de paisaje para la correlación de suelos". *Agronomía Tropical*. 51(3): 283-300.
- Webster R. y Beckett P.H.T.** 1968. "Quality and Usefulness of Soil Maps". *Nature* 219 (5155): 680 – 682.
- Webster R.** 1977. "Canonical correlation in pedology: how useful?" *Journal of Soil Science*. 28: 196-221.