

LA CEMENTACION DE LOS TEPETATES: ESTUDIO DE LA SILICIFICACION

Cementation of Tepetates: Study of the Cementation by Silica

Claudia Hidalgo M.¹, Paul Quantin ² y Claude Zebrowski ³

¹ CEDAF, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

² ORSTOM Bondy, Francia.

³ ORSTOM México, México.

Palabras clave: Tepetates, Cementación, Silicificación, Suelos volcánicos endurecidos, Ópalo-Ct, Cristobalita, México, Gel de sílice, Sílice.

Index words: Tepetates, Induration, Silicification, Indurated volcanic soils, Opale-Ct, Cristoballite, Mexico, Silica gel, Silica.

RESUMEN

Se estudió un perfil de suelo (San Miguel Tlaixpan) localizado en la vertiente oeste de la Sierra Nevada que presenta horizontes endurecidos, "tepetates", con el objeto de responder a las siguientes interrogantes: ¿Es la sílice el material cementante de estas capas?, ¿Es el endurecimiento un proceso geológico o pedológico? y ¿Cuáles son las diferentes formas de sílice presentes?

Se utilizaron diferentes métodos de caracterización: análisis químico total, difracción de rayos X, microscopía óptica y electrónica, además de análisis químicos con reactivos específicos para identificar las formas de sílice.

Los principales resultados indican que la presencia de sílice es evidente y aun cuando la silicificación podría ser un proceso reciente, queda por precisar la contribución secundaria de

la pedogénesis y la localización de la sílice que contribuye al endurecimiento. Se identificaron cuatro formas de sílice: gel, ópalo-Ct, sílice proveniente de alofano y sílice proveniente de aluminosilicatos. Finalmente se concluyó que la sílice no era la única causa del endurecimiento de los tepetates.

SUMMARY

A soil profile which shows indurated horizons locally named "tepetates" located near San Miguel Tlaixpan in the west part of the Sierra Nevada (Mexico) was studied in order to answer the following question: Are the indurated layers cemented by silica?, Is the cementing process pedological or geological in nature?, and Which forms of silica are present in these layers?

Samples were subjected to soil chemical analysis to determine the total elemental content of selected tepetates. X ray diffraction, electronical and optical microscopical techniques, as well as specific chemical reactions were used to identify silica forms.

The presence of silica was evident. Four silica forms were identified: gel, opale-Ct, silica from allophane, and silica from layer aluminosilicates. It was not possible to determine if secondary

silica accumulation was a pedogenetical contribution, neither the exact location of the silica contributing to the induration. In addition, it was concluded that silicification it is not the solely cause of tepetate induration.

INTRODUCCION

Los tepetates descritos en la vertiente occidental de la Sierra Nevada corresponden a horizontes de material volcánico endurecido. Zebrowski *et al.* (1989) distinguen dos fases de depósitos piroclásticos que denominaron T2 y T3; por las semejanzas de éstas con el material original de dos series estratigráficas de "Toba", 2T y 3T, descritas primero por Heine (1978) y luego por Miehlisch (1984). Quantin (1991), mostraron que el material que da origen a los tepetates se trata de proyecciones de cenizas riolíticas finas y no de loess.

Los tepetates de la parte media de la vertiente oeste (altitud de 2,500 a 2,800 m) están constituidos de material arcillo-arenoso y presentan una estructura masiva o prismática con una consistencia de "fragipán" (duro en el estado seco y friable en el estado húmedo).

El objetivo de este trabajo es determinar si el cemento de estas capas endurecidas es silíceo, como lo afirman: Miehlisch (1984) y Werner (1986) para el caso de los tepetates de la vertiente oriental de la Sierra; Chadwick *et al.* (1987) en el caso de los "duripanes" (capa dura en estado húmedo y seco) y Dubroeuq *et al.* (1989) para el caso de los tepetates silicificados de la región de Xalapa, Veracruz. Por otro lado, es necesario definir si esta cementación es de origen geológico o pedológico, así como las diferentes formas de sílice presentes.

MATERIALES Y METODOS

Los tepetates estudiados provinieron de un perfil de suelo típico de la zona cercana al pobla-

do de San Miguel Tlaixpan (Edo. de México), al que nos referiremos como (P 30), el cual se localiza en el piedemonte de la Sierra Nevada a una altitud de 2,550 m en una zona de clima subtropical de altura con una larga estación seca (precipitación aproximada de 700 mm por año).

El perfil fue observado hasta 5 m de profundidad y está compuesto por 11 horizontes repartidos de arriba hacia abajo en tres series de materiales:

1) Un suelo coluvio-eólico del Holoceno que forma los horizontes 1 y 2,

2) Después cinco horizontes (3 a 7) de textura limo-arcillosa y de color café claro, los cuales son semejantes a la serie volcano-sedimentaria T2. Esta serie se subdivide en T2a (horizontes 3 a 5) y T2b (horizontes 6 y 7), Dichas series presentan dos horizontes cuya consistencia es semejante a la de un tepetate, el t2a (horizonte 5) y el t2b (horizonte 7),

3) Finalmente cuatro horizontes (8 a 11) de textura limo-arcillosa y de color café-rojizo, correspondientes a la serie volcano-sedimentaria T3. La serie T3 se subdivide en T3a (horizontes 8 y 9) y T3b (horizontes 10 y 11), sin embargo, presenta sólo un tepetate, el t3 (horizonte 11) que se localiza en la base del perfil (Hidalgo, 1991).

Las determinaciones hechas y los métodos empleados en este estudio fueron los siguientes:

a) Determinación de la composición química del suelo ($<2 \mu\text{m}$) y del producto de alteración, que se hizo primeramente en el material disuelto por el reactivo triácido y posteriormente en el residuo que quedó después de la fusión. Los resultados fueron normalizados y la composición se expresó como porcentaje de los óxidos anhidros una vez deducida la pérdida por calcinación. Para la determinación de los óxidos de hierro, aluminio, titanio y manganeso se utilizó un autoanalizador Technicon, en tanto que los óxidos básicos (Na, K, Ca y Mg) y el óxido de silicio se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica, emisión de llama y de plasma.

b) La composición mineralógica del suelo y de la fracción arcillosa se obtuvo por análisis de difracción de rayos X.

c) Se realizaron observaciones en láminas delgadas con microscopio óptico, las cuales se complementaron con estudios por microscopía electrónica de barrido (M.E.B.) y microanálisis *in situ*, empleando para ello una microsonda (técnicas del laboratorio del ORSTOM, Bondy).

d) Se practicó un análisis químico diferencial para identificar las diversas formas de Al, Fe y Si, que se realizó a través de una secuencia de extracciones empleando los siguientes reactivos específicos: oxalato de amonio a pH 3, en la oscuridad (Blakemore, 1983), citrato-bicarbonato-ditionito de sodio a 80°C (Mehra y Jackson, 1960) e hidróxido de sodio 0.5N a 20 y 50°C (Quantin y Bouleau, 1983). La determinación de los diferentes elementos se realizó por espectrometría de plasma.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de los análisis químico global y mineralógico de cada horizonte y en forma separada, de la fracción <2 μm , fueron los siguientes:

1. Composición Global del Material Parental

Los resultados obtenidos por Hidalgo (1991) señalan la abundancia de minerales primarios residuales alterados tales como: vidrios riolíticos, plagioclasas, hornblenda, magnetita, trazas de cuarzo, y algo de cristobalita; así como pequeñas cantidades de hipersteno y de augita en la parte superior del perfil.

La alteración del material volcánico es parcial y limitada, lo cual se confirma con los resultados del análisis químico total (Cuadro 1). Los horizontes tienen elevados contenidos de sílice (>62%), bases (>7%) y del residuo que queda después del ataque fluoro-perclórico (al menos 45%) que es característico de los minerales primarios más estables. Estos resultados indican que el producto de alteración tiene una composición cercana a la del material original.

Por otra parte, en los horizontes 5, 7 y 11 con tepetate, las tasas de residuo son más elevadas en

relación a los otros horizontes de la misma serie volcánica que los recubren (4, 6 ó 10), lo que puede indicar que el tepetate está menos alterado o más silicificado como en t3.

2. Composición del Producto de Alteración

La composición mineralógica de la fracción arcillosa (Cuadro 2) muestra que en los horizontes correspondientes a la serie T2a (3, 4 y 5) abundan las esmectitas mal cristalizadas (aproximadamente 60%) y hay al menos 40% de haloisita; en tanto que en los horizontes correspondientes a la serie T2b (6 y 7) la esmectita alcanza hasta un 80% y es más cristalina que en T2a y existe un 20% de haloisita. Por el contrario, en la serie T3 (8, 9, 10 y 11) se tiene de 80 a 90% de haloisita y menos esmectita (10%). Adicionalmente, todos los horizontes del perfil presentan cristobalita (5 a 20%) que aumenta hacia la base del perfil (horizontes 10 y 11).

La composición química del producto de alteración (Cuadro 3) muestra contenidos de SiO_2 y bases más bajos que los porcentajes globales (residuo+extracto triácido) correspondientes, pero porcentajes de Al_2O_3 y Fe_2O_3 más elevados. Los valores elevados de la relación "ki" ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol) muestran claramente que se trata de minerales arcillosos y de sílice (cristobalita, ópalo) que se encuentran íntimamente combinados.

Si se comparan los valores de "ki" característicos de las arcillas presentes (haloisita y esmectita) y los correspondientes al extracto triácido, es posible hacer una estimación de la tasa "libre" de sílice (forma de cristobalita):

- horizontes 4 y 5, ki (triácido): 3.5 \rightarrow 5 a 10% cristobalita,
- horizontes 6 y 7, ki (triácido): 4.0 \rightarrow < 5% cristobalita,
- horizontes 10 y 11, ki (triácido): 3.15 a 3.55 \rightarrow 15 a 20% cristobalita.

Se puede notar que la cristobalita es más abundante en la base del perfil.

Cuadro 1. Composición química global (Extracto triácido residuo). Valores normalizados:

Horizonte	30-3	30-4	30-5	30-6	30-7	30-8	30-9	30-10	30-11
%									
SiO ₂	67.29	67.75	67.50	62.90	64.80	66.18	65.32	63.59	65.16
Al ₂ O ₃	19.69	20.28	19.64	22.30	20.54	20.33	21.33	22.01	20.14
Fe ₂ O ₃	5.52	5.21	4.74	7.00	5.93	6.03	6.75	6.47	6.01
TiO ₂	0.81	0.78	0.71	1.00	0.97	0.88	1.06	1.09	0.92
MnO ₂	0.07	0.10	0.12	0.10	0.07	0.09	0.14	0.17	0.14
P ₂ O ₅	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05
CaO	2.20	1.89	2.32	2.30	2.86	2.07	1.96	2.52	3.18
MgO	1.13	0.89	0.84	1.50	1.52	1.31	1.05	0.96	1.01
K ₂ O	1.12	1.11	1.56	0.70	0.89	1.16	0.67	0.83	0.75
Na ₂ O	2.14	1.96	2.53	2.10	2.41	1.91	1.66	2.32	2.66

Cuadro 2. Resultados de la difracción de rayos X. Fracción < 2µm.

Horizonte	Plagioclasas	Cristobalita	Haloisita 7 Å	Haloisita 7-10 Å	Esmectitas
%					
30-3*	tr	5	—	40	60
30-4	tr	5	—	40	60
30-5	tr	5	—	40	60
30-6*	tr	10	20	—	80
30-7*	tr	10	20	—	80
30-8°	—	15	80-90	—	>10
30-9	—	15	80-90	—	>10
30-10°	—	20	80-90	—	>10
30-11°	—	20	80-90	—	>10

* O.G.C: orientadas, gliceroladas, calcinadas.

°: Calcinación a 550°C

tr: <5%

--: no se detectó

Cuadro 3. Composición química normalizada del extracto triácido.

Horizonte	30-3	30-4	30-5	30-6	30-7	30-8	30-9	30-10	30-11
%									
SiO ₂	59.810	57.790	57.360	59.300	58.760	58.020	55.940	53.860	55.540
Al ₂ O ₃	25.220	27.950	27.320	25.180	24.950	26.490	28.210	28.970	26.610
Fe ₂ O ₃	9.677	9.492	9.933	10.100	10.180	10.110	11.030	11.800	11.960
TiO ₂	1.441	1.413	1.515	1.440	1.711	1.496	1.727	2.010	1.855
MnO ₂	0.103	0.175	0.233	0.111	0.086	0.133	0.224	0.311	0.256
P ₂ O ₅	0.066	0.057	0.072	0.041	0.051	0.055	0.077	0.073	0.088
CaO	1.050	0.886	1.093	0.944	1.079	0.910	0.768	0.751	1.221
MgO	1.606	1.329	1.242	1.988	2.138	1.698	1.267	1.330	1.270
K ₂ O	0.618	0.548	0.646	0.629	0.672	0.647	0.480	0.601	0.586
Na ₂ O	0.453	0.359	0.596	0.265	0.367	0.445	0.269	0.279	0.610
k _i	4.02	3.50	3.56	3.99	3.99	3.71	3.36	3.15	3.54

k_i= SiO₂/Al₂O₃ mol.

MICROMORFOLOGIA

Se analizaron micromorfológicamente los horizontes 4 y 5 de la serie T2a, el 7 de la T2b, el 8 de la T3a y los 10 y 11 de la serie T3b. De los anteriores, sólo los horizontes 5, 7 y 11 se consideran como tepetates.

1. Microestructura

La mayor parte de los horizontes presentan una microestructura masiva, fragmentada solamente por las fisuras de retracción y por la penetración de tubos biológicos. Como lo muestra la Figura 1, el fondo matricial no presenta orientaciones plásmicas como en el caso del horizonte 5 (tepetate t2a), pero sí un arreglo del esqueleto de tipo porfírico, similar a la estructura de una cinerita. Se observan también restos de vidrios y minerales alterados.

El horizonte 7 (tepetate t2b) presenta rasgos característicos de un suelo vértico: microestructura poliédrica angulosa y orientaciones plásmicas reticuladas. Por otro lado (Fig. 2), en la parte baja del perfil, los horizontes 10 y 11 (el último es el tepetate t3), muestran un fondo matricial café-rojizo "punteado" similar al de los suelos fersialíticos.

2. Rasgos Pedológicos

Se limitan por lo general a los revestimientos y rellenos al interior de los tubos biológicos, poros vesiculares y algunas ocasiones en las fisuras, también a los nódulos ferruginosos, mangánicos (horizontes 10 y 11) o calcáreos (horizonte 7).

Los revestimientos y rellenos son de diferentes tipos: rellenos microlaminados (Fig. 3) que corresponden a los ferri-argilanes típicos, algunas veces intercalados con silanes al interior de los tubos biológicos, y revestimientos amarillo-claro límpidos (Fig. 4) un poco silicificados y/o rellenos "degradados" (Fig. 5), que presentan una silicificación mayor.

Los revestimientos amarillo-claro se presentan en los horizontes 10 y 11 de la serie T3 y también al interior de algunas fisuras, así como en el borde de los poros en los horizontes 4 y 5 de la serie T2a.

MICROSCOPIA OPTICA DE BARRIDO (M.E.B.) Y MICRO-ANALISIS *IN SITU*

Estos estudios se realizaron con el objeto de verificar la presencia de material silicificado en las láminas delgadas observadas bajo microscopio óptico. Los resultados se presentan en el Cuadro 4.

1. Plasma Matricial (Fracción fina isótropa del fondo matricial)

En todos los casos, excepto en el horizonte 7, la composición del plasma matricial es parecida a la de los vidrios volcánicos que componen el material original; es decir, las tasas de sílice y bases son elevadas difiriendo bastante de la composición de los minerales arcillosos, mientras que en el horizonte 7 (que presenta un carácter vértico) hay una correspondencia entre la composición de la matriz y la presencia de esmectitas.

La alteración parcial de los vidrios de la parte fina de la matriz, se cree que ocurrió después del momento del depósito; ¿Podría ser éste el origen del cemento de los tepetates?; sin embargo, algunas partes claras de la matriz en el horizonte 10 están un poco silicificadas lo que se denota por un aumento de la relación "ki" ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol). ¿Esto último podría corresponder a una silicificación discreta del plasma matricial?

2. Rellenos Arcillosos

Estos son los rellenos microlaminados o ferri-argilanes típicos. Presentan una composición próxima a la del producto de alteración como lo

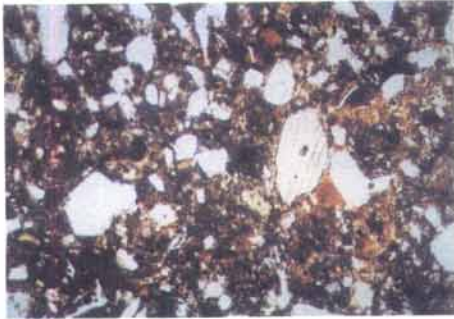


Figura 1. Microestructura masiva del fondo matricial del tepetate t2a (Luz natural).

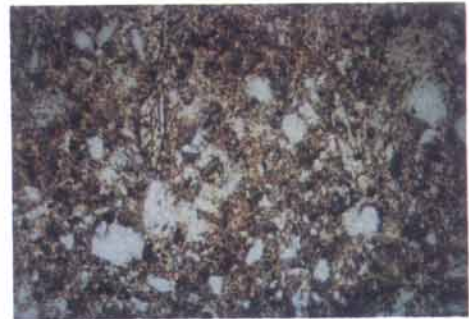


Figura 2. Fondo matricial café-rojizo punteado del tepetate t3 (Luz natural).



Figura 3. Rellenos microlaminares o ferriargilanes y silanes del tepetate t2a (Luz natural).



Figura 4. Revestimientos amarillo claro del tepetate t3 (Luz natural).

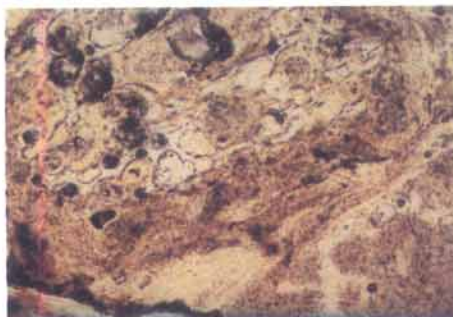


Figura 5. Rellenos amarillo claro limpidos, un poco silicificados del tepetate t2a (Luz natural).

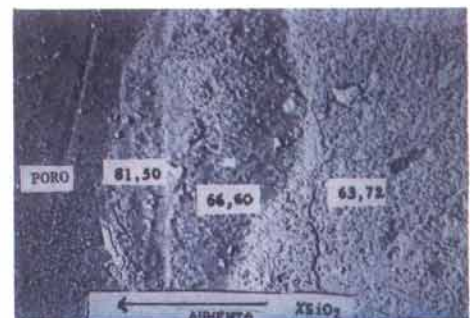


Figura 6. Microscopía electrónica de barrido de un revestimiento y microanálisis. Aumento del contenido de sílice de la matriz hacia el centro del poro (x 2600).

muestran los análisis químicos del extracto "triácido" y la microsonda. En todo el perfil, excepto el horizonte 7, los contenidos de sílice son elevados y por tanto los valores de "ki" lo son también. Lo anterior es particularmente evidente en los horizontes 8, 10 y 11 de la serie T3, en donde la haloisita es la arcilla que predomina. Los valores obtenidos para la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol. estuvieron entre 3.3 y 3.6. Siendo que dichos valores para el caso de la haloisita son de 2 a 2.2, sugieren que se presenta un incipiente desarrollo de silicificación en los argilanes mismos.

3. Revestimientos y Rellenos Silicificados

Los resultados obtenidos muestran que no hay rasgos de silicificación en los horizontes 6 y 7 (carácter vértico). El aumento de la cantidad de sílice es neta en los revestimientos claros, poco marcada en los horizontes 4 y 5 (parte superior del perfil) y bastante evidente en los horizontes 8, 10 y 11 en la parte inferior del perfil. Sin embargo, los niveles de sílice en los tepetates no se distinguen de los de su horizonte sobreyacente en la misma serie volcánica.

En la Figura 6 se puede observar que el aumento del contenido de sílice se presenta desde el borde cercano de la matriz hacia el centro del poro, lo cual sugiere que la silicificación podría corresponder a un proceso reciente ligado a la pedogénesis; esto coincide también con el aumento de las cantidades de cristobalita fina en la fracción arcillosa.

ANÁLISIS QUÍMICO DIFERENCIAL

Como resultado de la disolución selectiva con tres reactivos específicos: oxalato de amonio ácido (TAMM), ditionito-citrato-bicarbonato de sodio (CBD) e hidróxido de sodio (NaOH), se identificaron cuatro orígenes de sílice; en función a su grado de estabilidad a la disolución y a los valores de la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol ("ki") del producto disuelto. La sílice identificada que corresponde a la forma libre (gel y ópalo-Ct) y a la que proviene de los aluminio-silicatos (alofano y minerales arcillosos).

Cuadro 4. Resultados del micro-análisis *in situ* por microsonda.

Lámina observada	Zona de observación	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	CaO	k_j 1)	k_i^* 2)
----- % -----										
30-5	Masa Basal	68	21	4	0.70	1.50	2.00	1.10	5.80	
	Rellenos Micro. 3)	61	27	7	1.13	0.38	0.70	0.83	3.93	3.60
	Reves. Am-Cl 4)	57	29	9	1.00	0.25	0.60	0.60	3.38	
30-7	Mas. Bas. Arc. 5)	60	27	8	1.70	0.45	0.70	0.80	3.80	
	Rellenos Micro. 3)	61	25	7	2.30	0.70	0.70	1.20	4.06	4.00
30-10	Masa Basal	67	23	5	0.65	0.98	0.52	1.08	4.94	
	Mas. Bas. Silic. 6)	76	15	5	0.60	0.54	0.76	0.36	5.80	
	Rellenos Silic. 7)	91	5	1	0.15	0.20	0.10	0.26	>10	
	Reves. Silic. 8)	91	8	1	0.38	0.20	0.23	0.45		
30-11	Masa Basal	63	23	8	0.80	1.10	0.80	0.93	4.24	
	Rellenos Micro. 3)	57	29	9	1.00	0.10	0.60	0.80	3.30	3.50
	Rellenos Degra. 9)	72	16	4	1.20	2.00	0.60	3.20	9.40	
	Reves. Silic. 8)	63	20	6	0.90	1.50	1.10	3.20	5.30	

1) $k_j = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol.

3) Rellenos Micro.: Rellenos Microlaminares (Argilanes)

5) Mas. Bas. Arc.: Masa Basal Arcillosa.

7) Rellenos Silic.: Rellenos de Sílice.

9) Rellenos Degra.: Rellenos "Degradados".

2) k_i^* : k_j del extracto triácido.

4) Reves. Am-Cl.: Revestimientos Amarillo-Claro (Cutanes).

6) Mas. Bas. Silic.: Masa Basal Silicificada.

8) Reves. Silic.: Revestimientos Silicificados (Cutanes).

Cuadro 5. Fases de solubilidad para la extracción con NaOH 0.5N a 20 y 50°C (en 8 extracciones).

Horizonte	Extracción a 20°			Extracción a 50°		
	a	b	c	a	b	c
30-4						
SiO ₂ (%)	0.40	0.35	0.91	0.60	0.55	2.43
SiO ₂ libre (%)	0.36	0.26	0.59	0.51	0.25	1.18
Al ₂ O ₃ (%)	0.04	0.08	0.27	0.08	0.26	0.59
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	17.00	7.44	5.73	12.75	3.60	7.00
30-5						
SiO ₂ (%)	0.20	0.20	1.12	0.70	0.30	3.15
SiO ₂ libre (%)	0.09	0.06	0.76	0.47	0.09	1.35
Al ₂ O ₃ (%)	0.10	0.12	0.31	0.20	0.18	0.85
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.40	2.84	6.22	5.95	2.51	6.31
30-6						
SiO ₂ (%)	0.45	0.50	0.89	0.95	0.65	1.44
SiO ₂ libre (%)	0.43	0.31	0.69	0.67	0.49	0.66
Al ₂ O ₃ (%)	0.02	0.16	0.17	0.24	0.14	0.33
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	38.20	5.31	8.87	6.73	7.89	7.41
30-7						
SiO ₂ (%)	0.40	0.45	0.80	0.80	0.60	1.59
SiO ₂ libre (%)	0.33	0.40	0.64	0.70	0.36	0.91
Al ₂ O ₃ (%)	0.06	0.04	0.14	0.10	0.20	0.29
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	11.30	19.12	9.95	13.6	5.10	9.25
30-8						
SiO ₂ (%)	0.30	0.40	0.92	0.75	0.35	2.62
SiO ₂ libre (%)	0.25	0.33	0.69	0.59	0.17	1.84
Al ₂ O ₃ (%)	0.04	0.06	0.20	0.14	0.15	0.53
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	12.80	11.34	7.97	9.11	3.96	8.42
30-10						
SiO ₂ (%)	0.35	-	0.82	0.30	0.35	1.96
SiO ₂ libre (%)	0.35	-	0.51	0.21	0.17	1.12
Al ₂ O ₃ (%)	0.00	-	0.26	0.08	0.15	0.57
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	-	-	5.36	8.50	3.13	4.68
30-11						
SiO ₂ (%)	0.25	-	0.85	0.35	0.65	2.66
SiO ₂ libre (%)	0.25	-	0.57	0.28	0.33	1.62
Al ₂ O ₃ (%)	0.00	-	0.24	0.06	0.19	0.71
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	-	-	5.67	9.92	5.81	6.36

a, b, c: Fases de solubilidad.
SiO₂/Al₂O₃= relación molar.

a: muy soluble, b: intermedia, c: lentamente soluble.
%SiO₂ libre: por estimación y deducción de la sílice de las arcillas.

1. SiO₂ del alofano

Se obtuvo a partir de la extracción con TAMM; los valores < 0.2% en los horizontes del perfil, corresponden a contenidos de alofano de 0.2 a 0.4% (Hidalgo, 1991).

2. Sílice en forma de gel

Esta forma se identificó a partir de cuatro extracciones sucesivas con CBD (Hidalgo, 1991) y, paralelamente, con NaOH 0.5N a 20°C en ocho extracciones sucesivas (Cuadro 5), habiendo sustraído en ambos casos la sílice correspondiente al alofano.

Los valores obtenidos para el gel de sílice fueron de 0.4 a 0.6% con la extracción en CBD y de 0.2 a 0.7% con NaOH. En los horizontes con tepetate se tiene 0.5% en t2a, 0.7% en t2b y 0.3% en t3. Esta forma de sílice corresponde a la fase más soluble de la extracción con NaOH a 20°C (Cuadro 5).

3. Sílice como ópalo-Ct

Corresponde a la fase lentamente soluble (fase "c") de la extracción con NaOH 0.5N a 50°C (Cuadro 5). En este caso, se sustrajo el SiO₂ de las arcillas (haloisita o esmectita) detectadas por análisis químico (valor de k_j) y por rayos X. Los valores obtenidos se encuentran entre 1.1 y 2.3%. En los tepetates: 1.44% en t2a, 1.3% en t2b y 2% en t3.

4. Sílice libre total

Se estimó a partir de ocho extracciones sucesivas con NaOH 0.5N a 50°C (Cuadro 5). Los valores obtenidos varían entre 1.5 y 2.6% y corresponden a las tres fases de disolución (a+b+c) mostradas en el Cuadro 5. En los tepetates estos valores fueron: 2% en t2a y t2b y 2.2% en t3; los valores máximos obtenidos corresponden a los horizontes arcillo-limonosos: 2.5% en 3 y 2.6% en 8.

A partir de los resultados anteriores se puede decir en forma general que los tepetates contienen al menos 2% de sílice libre; sin embargo, su disolución no es completa en las ocho extracciones sucesivas con NaOH 0.5N a 20 ó 50°C. De la sílice libre hay al menos 0.7% en forma de gel, forma que disminuye hacia la base del perfil en donde hay un aumento de la fase menos soluble y más cristalina de ópalo-Ct.

No hay diferencias significativas de la tasa de sílice presente en los tepetates y en los horizontes sobreyacentes; es decir, entre los horizontes 5 (t2a) y 4 ó entre 7 (t2b) y 6; pero hay una diferencia débilmente positiva de +0.7% entre el horizonte 11 (t3) y el 10.

CONCLUSIONES

1. Los tepetates no manifiestan una diferencia significativa de sus constituyentes en relación a los horizontes de la misma serie volcánica que los recubren. Éstos son producto de una alteración parcial (< 50%) de cineritas riolíticas.

2. La presencia de sílice libre es evidente en el plasma matricial y en la fracción arcillosa, algunos de los revestimientos claros están un poco silicificados, sobre todo en la base del perfil (serie T3).

3. La silicificación secundaria de los argilanes (rellenos microlaminares) es debida a un proceso pedológico reciente; sin embargo, esto sólo representa una pequeña cantidad de la sílice libre y dado que está muy localizada, por si sola no justifica la cementación de los tepetates; bajo la forma de gel, esta sílice podría explicar las propiedades de fragipán del tepetate.

4. El plasma matricial presenta una silicificación difusa y discreta, es posible que esta silicificación se produzca después de una primera alteración de los vidrios volcánicos al momento de su depósito. Queda por precisar la contribución secundaria de la pedogénesis a partir de

observaciones por ultramicroscopía verificando si se presenta una película de sílice que reviste las láminas de los filosilicatos,

5. Los horizontes de tepetate t2a y t2b están muy poco o no están silicificados respecto al

horizonte que está situado sobre ellos. Sólo el tepetate t3, que es el más duro, está un poco más silicificado que el horizonte que lo recubre; lo que indica que la sílice no es la única causa del endurecimiento de los tepetates.

LITERATURA CITADA

BLAKEMORE, L. C. 1983. Acid oxalate-extractable iron, aluminium and silicon. ICOMAND Circular Letter 5. New Zealand Soil Bureau; Appendix 1.

CHADWICK, O. A., D. M. HENDRICKS y W. D. NETTLETON. 1987. Silica in duric soils: I. A depositional model. *Soil.Sci. Soc. J.* 51: 975-982.

DUBROEUCQ, D., P. QUANTIN y C. ZEBROWSKI. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. *Terra* 7: 3-12.

HEINE, K. 1978. Neue beobachtungen zur chronostratigraphie der mittelwisconzinzeitlichen vergetschlerung und böden mexikanischer vulkane. *Eiszeitalter und Gegenwart* 28: 139-147.

HIDALGO M., C. 1991. Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés ("tepetates") de la région de Mexico. (cimentation, induration). Mémoire DEA de Pédologie. Université de Nancy I, Nancy, France.

MEHRA, O. P. y M. L. JACKSON. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clays Minerals*, 7th Conf.: 317-327.

MIEHLICH, G. 1984. Chronosequenzen und anthropogene veränderungen andesitischer vulkanaschböden in drei klimastufen eines randtropischen gebirges (Sierra Nevada de México). Habilitation Thesis, Fachbereich Geowischen-schaften. Universität Hamburg, Hamburg, BDR. 417 p.

QUANTIN, P. y A. BOULEAU. 1983. Détermination des constituants minéraux amorphes et cryptocristallins d'Andosols par analyse cinétique de leur dissolution par HCl et NaOH. *Science du Sol* (3-4): 217-234.

QUANTIN, P. 1991. Etude des sols volcaniques indurés "tepetates" des bassins de Mexico et Tlaxcala (Mexique). Deuxième rapport annuel d'avancement des travaux, 31 mars 1991. ORSTOM, Bondy, France.

WERNER, G. 1986. Los suelos en el estado de Tlaxcala, altiplano central Mexicano. Investigaciones relacionadas con su desarrollo, extensión, erosión y su utilización bajo la influencia de actividades agrícolas en 3,000 años. Universidad. Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México. 132 p y apéndices.

ZEBROWSKI C., D. PEÑA H. y J. M. VALENCIA. 1989. Reincorporación de los Tepetates a la producción agrícola II. Avances de los trabajos de clasificación y cartografía, pp. 3. *In: Memorias. XXII Cong. Nac. de la Ciencia del Suelo*, Montecillo, Méx.