

LOS SUELOS VOLCANICOS ENDURECIDOS EN AMERICA LATINA

Indurated Volcanic Soils in Latin America

Claude Zebrowski

ORSTOM, México.

Palabras clave: Suelos volcánicos endurecidos, Cangahua, Tepetate, Talpetate, Fierrillo, Hardpan, Endurecimiento, América Latina.

Index words: Indurated volcanic soils, Cangahua, Tepetate, Talpetate, Fierrillo, Hardpan, Induration, Latin America.

carbonato de calcio o la sílice. Las zonas erosionadas que ponen al descubierto las formaciones endurecidas se extienden en zonas densamente pobladas. En ciertos países se practica la reincorporación de dichas zonas a la agricultura (mediante reforestación o cultivo). La rentabilidad de las obras de rehabilitación está actualmente en estudio.

RESUMEN

En la mayoría de los países del arco volcánico centro y suramericano, los suelos volcánicos que presentan en sus perfiles horizontes endurecidos han sido designados con nombres vernáculos diversos, siendo los más comunes: tepetate, talpetate, cangahua.

Su extensión y localización exactas se conocen únicamente en los países en los que se ha realizado un inventario exhaustivo (México, Ecuador y en forma parcial, en Nicaragua y Chile). Estas formaciones se encuentran generalmente en regiones en las que el clima presenta una temporada seca bien marcada. Los materiales originales están básicamente constituidos por proyecciones piroclásticas bajo forma de lluvias o de flujos. El endurecimiento de las formaciones puede ser de origen geológico (endurecimiento en el momento del depósito, en el caso de los flujos piroclásticos) o pedológico con aporte de cementos tales como el

SUMMARY

The volcanic soils which present indurated formations in their profiles have been described with vernacular names in the great majority of the countries of the Central and South American volcanic arch. The most common are: tepetate, talpetate and cangahua.

Their extension and precise localization are known only in those countries where an exhaustive inventory has been achieved (Mexico, Ecuador and, partially, in Nicaragua and Chile). Those formations are generally found in regions where climate presents a very well-defined dry season. The original materials are basically pyroclastic projections under rain or flood shapes. The formations' induration may be of geological origin (induration during the deposit as far as pyroclastic floods are concerned) or pedological origin with cements such as calcium

carbonate or silica. The eroded zones, with indurated formations on the surface, are located in strongly populated regions. The reincorporation of these zones to agriculture (by the means of reforestation and cultivation) is practised in certain countries. The profitability of the rehabilitation works is actually being studied.

INTRODUCCION

Aun cuando los suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos han sido estudiados en casi todos los países, la superficie cubierta por éstos no es todavía bien conocida. Leamy *et al.* (1984) mencionan que 124 millones de hectáreas estarían cubiertas por Andosoles, es decir, apenas 0.8% de la superficie terrestre del globo. La totalidad de los suelos volcánicos, desarrollados a partir de proyecciones piroclásticas, ocupan, sin embargo, un 5% de esta última. Estas cifras, en realidad sub-evaluadas, tienen que ser aumentadas significativamente si se considera la totalidad de las formaciones volcánicas, tanto las recientes como las antiguas. Solamente en lo que respecta a los países de América que miran al Pacífico, incluyendo México, los países de América Central, y los países de América del Sur, los suelos volcánicos cubren una superficie de 1,376,000 km², es decir, 23.2% del área que ocupan dichos países (casi 6 millones de km²).

Los suelos volcánicos representan un potencial innegable para la agricultura. En efecto, se les considera dentro de los suelos más fértiles. Los que se han desarrollado a partir de materiales originales recientes son bastante ricos y han sido cultivados de manera intensa. Aquéllos que provienen de rocas antiguas son menos ricos (especialmente si se trata de climas calientes y húmedos bajo los cuales se desarrollan suelos ferralíticos) pero poseen buenas características físicas, lo que explica la preferencia que se les ha dado para su cultivo.

Aparentemente, los suelos endurecidos constituyen una excepción dentro de los suelos

volcánicos ricos, por el hecho de haber sido cultivados sin las debidas precauciones y por lo tanto erosionados.

LOS SUELOS VOLCANICOS ENDURECIDOS

Se trata de suelos que dentro de sus perfiles presentan horizontes endurecidos que pueden estar situados a profundidades variables. En numerosas regiones la erosión de las tierras ha sido tal, que las capas de suelos superiores se han perdido poniendo al descubierto los horizontes endurecidos profundos, lo que ha ocasionado la aparición de zonas erosionadas poco propicias para la agricultura. La extensión de estas zonas erosionadas en regiones, a menudo densamente pobladas, además del interés científico propiamente tal que presentan, ha motivado su estudio.

Localización de estos Suelos en América Latina

Los suelos volcánicos endurecidos han sido descritos en la mayoría de los países de América Latina con nombres a menudo vernáculos (propios a cada país). En México, se les llama Tepetates; en Centroamérica (Nicaragua, en menor grado El Salvador, Honduras y probablemente Costa Rica), toman el nombre de Talpetate. En Colombia han sido llamados Hardpán, Duripán y Cangahua en el sur del país. Este último término se utiliza igualmente en Ecuador. En el Perú se les ha llamado, según parece, Hardpán y, finalmente, en Chile encontramos los términos de Cancagua, Moromoro, Tosca y Nadis.

A pesar de que estos suelos han despertado el interés de los investigadores desde hace largo tiempo -Wolf (1896) y posteriormente Sauer (1947) describieron la cangahua en Ecuador - su estudio es todavía limitado y aún quedan numerosos problemas por resolver.

La Extensión de las Formaciones Volcánicas Endurecidas en América Latina

La extensión de estas formaciones no se conoce con exactitud. Sin embargo, existen algunos inventarios realizados en ciertos países, los cuales permiten determinar su extensión.

En México mapas pedológicos elaborados por el INEGI hacen mención de los suelos volcánicos que presentan un horizonte duro en profundidad. La planimetría de estas formaciones indica que cubren una superficie de 30,700 km², o sea, el 27% de la superficie del eje neovolcánico mexicano (Zebrowski *et al.*, 1991). La erosión de dichos suelos es particularmente grave; sin embargo, no se dispone actualmente a escala nacional de ninguna cifra referente a los tepetates puestos a descubierto por la erosión. En ciertos estados de la república la extensión ocupada por los tepetates es elevada: por ejemplo en el estado de Tlaxcala estos últimos cubren el 54% de su superficie.

En Ecuador los mapas pedológicos a escala 1/200,000 elaborados dentro del marco de un inventario realizado por el Ministerio de Agricultura y el ORSTOM revelan que los terrenos con cangahua cubren una superficie de 3,000 km², o sea, el 20% del callejón interandino (altitud inferior a 4,000 m). Las numerosas superficies erosionadas, con exposición de cangahua, podrían ser planimetradas con base en los mapas a escala 1/50,000 elaborados con motivo del mismo inventario (Colmet-Daage *et al.*, 1975-1984).

Una primera evaluación realizada en Nicaragua por Marín (1973) refleja que los talpetates ocupan una superficie de 2,400 km² en la región de Managua.

En Chile, los mapas de suelos (Instituto de Investigaciones Agropecuarias - Ministerio de Agricultura, 1985) indican la localización de determinados suelos endurecidos, en particular del tipo Nadis (4,750 km²), pero no señalan la extensión de otros.

En función de la información con que se cuenta, en los demás países los estudios son limitados (Perú, Colombia) y en ciertos casos inexistentes (El Salvador, Honduras).

LA INFLUENCIA DE LOS FACTORES DE LA PEDOGENESIS: CLIMA, MATERIALES ORIGINALES

La simple confrontación de los mapas climatológicos con la localización de los suelos volcánicos endurecidos muestra que la mayoría de estos últimos está situado en regiones de clima relativamente seco.

En Ecuador, Colmet-Daage (1978) muestra la importancia del clima en la ubicación de los terrenos con cangahua. Los suelos poco profundos, erosionados, ricos en carbonato de calcio, de las zonas secas, ceden paulatinamente lugar, debido al aumento de las lluvias en altitud, a suelos más profundos, que contienen igualmente cangahua, pero que carecen de carbonatos, y en las zonas más elevadas, a Andosoles.

En México, Michlich (1984), Dubroeuq *et al.* (1989) y Nimlos (1990) destacan igualmente las estrechas relaciones entre zonas climáticas y la distribución de los tepetates. Estos últimos aparecen en el altiplano mexicano únicamente bajo una pluviometría total anual inferior a 800-900 mm. Los tepetates ricos en carbonato de calcio se localizan en zonas con precipitación inferior a 650-700 mm.

En cambio, en Nicaragua los talpetates existen bajo condiciones climáticas más húmedas. La presencia de estas formaciones se debe ante todo a la naturaleza del material original (Prat, 1991).

En Chile, los suelos Nadis están estrechamente ligados al pedo-clima. El régimen de humedad de los suelos endurecidos es údico (Besoain, 1985).

La determinación de los materiales originales es fundamental en todo estudio de formaciones volcánicas endurecidas. De acuerdo a diferentes autores, el origen de dichos materiales puede ser muy variable: depósitos eólicos de tipo loess, en Ecuador (Sauer, 1947) y en México (Heine y Schönhals, 1973), lahares reconocidos en México (Valdez, 1970), en Ecuador (Vera y López, 1986) y en Chile (Laugénie, 1982); pero son sobre todo las cenizas y lapillis, bajo forma de lluvias aéreas, es decir, no cementadas en el momento de depositarse, o bajo forma de flujos piroclásticos (cineritas, tobas y brechas) los que son comúnmente citados como origen de estas formaciones. En efecto, los autores reconocen rara vez un origen único; apelan de buen grado a una mezcla de materiales de orígenes diversos. Esto se debe, aparentemente, a que no les fue posible identificar cada material por separado. Pero es necesario señalar el intento de clasificación de los tipos de cangahua en función de los materiales originales realizado por Vera y López (1986) en Ecuador.

Si los lahares han podido producir formaciones actualmente endurecidas y los piroclásticos, bajo forma de lluvias o de flujos, son sin duda el origen de numerosas formaciones endurecidas, se debe restar importancia e incluso ignorar el origen eólico (tipo loess). En efecto, Vera y López (1986) señalan que las arenas contenidas en las cangahuas sólo presentan un número reducido de características derivadas del transporte eólico. En México, Miehllich (1991, pp. 44-45 y 118) establece que el aspecto bimodal de curvas granulométricas no resulta del transporte eólico del material, como lo pensaban Heine y Schönhals (1973), sino que más bien son el resultado de la alteración de las cenizas volcánicas. Quantin *et al.* (1991) confirman este hecho.

DUREZA Y ORIGEN DEL ENDURECIMIENTO

A pesar de que gran número de autores menciona los procesos de endurecimiento, pocos

han recurrido a medidas de dureza, se trata sobre todo de medidas subjetivas como: bloque que se rompe con mayor o menor facilidad con la mano o con el martillo, etc. Algunos autores han realizado medidas sistemáticas en el terreno, mediante penetrómetro o, con mayor frecuencia, en el laboratorio midiendo la resistencia de la muestra a la fragmentación (marco de carga).

La dureza de los horizontes de tepetate expuesto al aire libre, medida con un penetrómetro, varía con frecuencia, no sólo entre las muestras mismas sino en función de la humedad de la muestra en el momento de su medición. Los valores obtenidos en los tepetates (Miehllich, 1984; Peña y Zebrowski, 1991) oscilan entre 150 y 800 kg/cm².

La influencia de la humedad del suelo sobre la resistencia de las muestras ha sido estudiada por Nimlos (1989) y por Peña y Zebrowski, (1991). Los resultados corresponden a lo que se esperaba: a mayor sequía de las muestras, mayor resistencia. Pero este fenómeno es común en todos los suelos. Esta es, en parte, la razón por la cual los horizontes de tepetate -como lo señala Miehllich- son más resistentes cuando se les expone al aire libre que cuando están incluidos dentro de un perfil.

Es evidente que el estudio sistemático de la dureza de los horizontes llamados "endurecidos" que incluye -a título comparativo- otros tipos de suelos, debería realizarse mediante un método de referencia. ¿Los horizontes volcánicos endurecidos son, de hecho, más o menos duros que determinados horizontes vérticos o arcillosos de Planosoles? Esta comparación no ha sido realizada todavía.

Los diferentes procedimientos mencionados para explicar el endurecimiento de los suelos volcánicos son variados.

El primero corresponde a una serie de fenómenos de compactación, sea por simple compactación o por transportación de los materiales en el agua. Estos fenómenos van siempre acompañados de un aumento de la densidad aparente. Pero no se ha realizado ninguna medida precisa en esos materiales.

Un segundo procedimiento, mencionado con mayor frecuencia, corresponde a un endurecimiento de los materiales en el momento de su depósito (es el caso de los flujos piroclásticos que se endurecen al enfriarse). Este fenómeno fue calificado de geológico por Nimlos (1989), y posteriormente por Dubroeuq *et al.* (1989). La alteración pedológica posterior al depósito contribuye, en general, a ablandar el horizonte inicialmente endurecido.

Finalmente, el endurecimiento puede obtenerse mediante procedimientos pedológicos que aporten elementos en solución, calificados de cemento.

El cemento puede ser de naturaleza ferruginosa; este es el caso de los suelos Nadis en Chile. También puede ser calcáreo. Los suelos ricos en carbonato de calcio tienen generalmente una densidad aparente y una dureza elevadas. Su escasa porosidad se debe a una saturación de los poros por carbonato de calcio. Los cementos silíceos han sido mencionados con frecuencia. Aeppli (1973) fue probablemente el primero en tratar de demostrar que existe un enriquecimiento silíceo en ciertos horizontes, como resultado de un lavado en dicho elemento de los horizontes superiores. Ciertos autores, Miehlich (1984) en México y Creutzberg *et al.* (1990) en Ecuador, han reconsiderado esta teoría. Confirmaron que dentro de los horizontes endurecidos existe un exceso de sílice libre, pero, en vano trataron, de identificar por medio del microscopio acumulaciones silíceas. Esta sílice estaría íntimamente ligada a las arcillas. En cambio, estos autores piensan que los cutanes, que existen en gran número dentro de los horizontes endurecidos, desempeñan un papel determinante en el endurecimiento de los horizontes. La sílice, absorbida por la arcilla, no haría más que reforzar dicho endurecimiento, al secarse el suelo.

LA CLASIFICACION DE LOS SUELOS VOLCANICOS ENDURECIDOS

Esta clasificación depende evidentemente de la naturaleza de los horizontes endurecidos al mismo grado que de su posición dentro del

perfil. Los suelos Nadis han sido clasificados como Placaquands. La mayoría de los autores llama "petrocálcicos" a los horizontes ricos en acumulaciones calcáreas y "duripans" a los horizontes ricos en sílice.

La posición (profundidad) del horizonte endurecido dentro del suelo es determinante para la clasificación de este último. En caso de que los horizontes endurecidos estén localizados en profundidad, se clasifica el suelo superior, en función de sus características, y la presencia del horizonte endurecido aparece en un nivel inferior dentro de la clasificación, dependiendo de las diferentes taxonomías.

La clasificación de este último debe considerar su carácter de dureza más o menos reversible (se debe utilizar el término de "fragipan" solamente para los horizontes que se disgregan en el agua), y la naturaleza del cemento.

LA EROSION DE LAS TIERRAS

La extensión de las tierras volcánicas erosionadas en países como México y el Ecuador llevan al observador a cuestionarse sobre dos aspectos: la causa y la edad de esta erosión. Existen muchas hipótesis pero ninguna es completamente satisfactoria. Si bien es cierto (Williams, 1972) que las civilizaciones precolombinas conocían estas formaciones endurecidas, es poco probable que la erosión de las superficies que conocemos hoy en día corresponda a esa época. Es más probable que haya habido períodos durante los cuales la erosión haya sido más intensa y que las zonas actualmente erosionadas hayan sufrido este fenómeno en una fase reciente, probablemente a causa de una explotación inadecuada de las tierras. Pero ¿cuál es actualmente la situación? ¿La erosión persiste, como lo piensan ciertos autores en México (Werner *et al.*, 1978) y en Ecuador (De Noni *et al.*, 1986), o por el contrario se encuentra en una etapa de regresión? Aun cuando existen numerosas evaluaciones de la erosión tanto de los

suelos como de las formaciones volcánicas endurecidas, éstas han sido hechas principalmente en parcelas de erosión, y los resultados son difícilmente extrapolables, a nivel de la región, para poder lograr conclusiones confiables. La realización de trabajos complementarios resulta necesaria.

Nuestras propias observaciones efectuadas en el estado de Tlaxcala permiten pensar que la erosión es, hoy en día, mínima; las zonas erosionadas con tepetate están, en efecto, recolonizadas por una vegetación secundaria. Sin embargo, la erosión puede resurgir rápidamente en zonas cultivadas. En efecto, si los campesinos, con el fin de facilitar la mecanización de los trabajos agrícolas, no dudan en suprimir los bordes con plantas de maguey que separan los campos y los protegen de la erosión. La reactivación de ésta provocaría el deterioro de nuevas tierras, poniendo así al descubierto las formaciones endurecidas subyacentes. Sería recomendable reforzar las medidas para la protección de las tierras agrícolas y sería seguramente más rentable, si se considera el gasto enorme que representa la rehabilitación de las tierras recién erosionadas.

LA REHABILITACION AGRICOLA DE LAS FORMACIONES ENDURECIDAS

Resulta necesaria en ciertos países como el Ecuador y México en los que las zonas erosionadas ocupan superficies considerables en áreas densamente pobladas. La reincorporación de zonas erosionadas no es reciente. Se practicaba en la época prehispánica y Hernández (1987) afirma que hace más de 100 años los tlaxcaltecas lograban la recuperación de las zonas con tepetate en dos años, con base en cultivo de haba y ayocote, el primer año, y de maíz, el segundo.

En la actualidad, la rehabilitación de las zonas volcánicas endurecidas y erosionadas se realiza de diferentes modos. A iniciativa de ciertos organismos semi-públicos y en el marco de

grandes proyectos, las técnicas tradicionales de los campesinos -con empleo del pico- muy generalizadas, han sido poco a poco reemplazadas por técnicas modernas que emplean nivelación y roturación profunda. Estas técnicas, aunque costosas, han sido adoptadas en México por los campesinos, quienes ya las utilizan actualmente.

Las medidas para la rehabilitación de suelos tomadas por los organismos oficiales se han iniciado con frecuencia con intentos de reforestación, en parte, porque es costumbre considerar las tierras más degradadas como no aptas para cultivos anuales pero sí para el establecimiento de especies forestales.

La reforestación se ha practicado en Colombia y en Ecuador, pero sobre todo en México. Numerosas especies han sido puestas a prueba, ya sean latifoliadas, en particular especies rústicas como el Eucalipto (que se adapta perfectamente a las condiciones edáficas de estos suelos erosionados), o coníferas. Los primeros balances, aunque todavía incompletos, comienzan a realizarse.

El cultivo, fuera del medio campesino tradicional, se inició desde un principio mediante pruebas en invernadero y algunas pruebas en el campo. Los autores (Avila, 1963, Tovar, 1987, Delgadillo *et al.*, 1989, Caujolle-Gazet y Luzuriaga, 1986) están de acuerdo en reconocer que tanto los cultivos como los pastos se pueden establecer en las formaciones endurecidas después de su roturación con cantidades elevadas de fósforo y sobre todo de materia orgánica.

La roturación es necesaria con el fin de mullir las capas endurecidas; se practica comúnmente por medio de un subsoleo y, posteriormente, de una labranza con el fin de romper los bloques que quedan después del subsoleo. El tamaño final de los agregados es importante, ya que las partículas deben ser suficientemente finas para no obstaculizar la emergencia de las plantas y suficientemente gruesas para evitar la asfixia. Braunack y Dexter (1989) han señalado que el tamaño de los agregados debe estar comprendido entre 0.5 y 8 mm para que los suelos cuenten

con un conjunto de propiedades ideal en lo que se refiere a la aireación y a la capacidad de retención de agua. Martínez y García (1990) han señalado que, en los tepetates de la región de Texcoco, el tamaño medio de los agregados debe ser alrededor de 2 mm con el objeto de que su capacidad de retención de agua sea máxima y su erodibilidad mínima. A pesar que es difícil obtener este grosor en el terreno, las lluvias y los métodos de cultivo repetidos reducen el tamaño de los agregados con el paso de los años. Esta desagregación de las partículas está acompañada de una compactación del suelo con disminución de la porosidad y de la capacidad de retención de agua. Únicamente la regeneración de una estructura mediante el aumento del contenido de materia orgánica permitiría evitar estos problemas.

Sin embargo, el beneficio obtenido con la aplicación de abonos orgánicos, bajo forma de estiércol, es, en la mayoría de los casos, incompatible con la realidad del mundo campesino. La búsqueda de un sistema de rotación de cultivos mediante incorporación de materia vegetal sería más adecuada. A pesar de que este procedimiento ha sido sugerido por algunos autores, existe, por el momento, escasa información sobre la materia. No existen tampoco trabajos relacionados con el estudio de la microfauna y de la microflora dentro de un proceso de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos. En México, se han realizado únicamente algunas medidas parciales de evaluación de la actividad microbiana en tepetate no cultivado.

Finalmente, la reincorporación de las tierras erosionadas endurecidas a la agricultura implica la elaboración de terrazas con el fin de disminuir la erosión, que resulta siempre muy elevada después del subsoleo y de la labranza. Pero a pesar de que se han realizado numerosas medidas (cuantificaciones) de erosión tanto en Ecuador (De Noni *et al.*, 1986) como en México (Rey, 1979, Arias y Figueroa, 1990), ninguna norma establece con precisión la pendiente mínima que

deben tener las terrazas elaboradas sobre las formaciones endurecidas rehabilitadas.

A menudo se cuestiona la rentabilidad de las operaciones de rehabilitación de los suelos volcánicos endurecidos y erosionados. Resulta difícil cuantificarla debido a que los aspectos económicos, por una parte, y ecológicos, por la otra, están estrechamente ligados y el impacto ecológico es difícil de estimar. Aún limitándonos al aspecto puramente económico, se han realizado pocas evaluaciones.

La evaluación de los trabajos de reforestación que se llevan a cabo desde hace más de 20 años en México, en particular por la Comisión del Lago de Texcoco (ahora Plan del Lago), está actualmente en curso. Algunos resultados serán probablemente expuestos en este simposio.

En lo que se refiere a los cultivos, una experiencia de rehabilitación de los tepetates a la agricultura, por medio de irrigación, fue realizada (Camargo y Acosta, 1987) en el valle del Mezquital, al sur del estado de Hidalgo (México). Los resultados son concluyentes: la inversión, incluyendo subsoleo y labranza de preparación del suelo, se amortiza en 5 años. Sin embargo, de acuerdo con los autores una operación de esta índole sería menos rentable en zonas no irrigadas debido a los altos costos de los trabajos de rehabilitación, pero la reincorporación de los tepetates a la agricultura en zonas de temporal es un hecho indiscutible y se incrementa cada año. Es necesario conocer la rentabilidad de estas operaciones, la cual depende del contexto socio-económico del sitio en que se realizan, si se quiere generalizarlas en otras zonas. La evaluación de esta rentabilidad implica: la cuantificación de los costos de producción en diferentes sistemas agrícolas (por definir) y la identificación de los sistemas económicos familiares. Se aportarán igualmente aclaraciones en este renglón en el curso de este simposio.

LITERATURA CITADA

- AEPPLI, H.** 1973. Barroböden und Tepetate. Untersuchungen zur Bodenbildung in vulkanischen Aschen unter wechselfeuchtem gemäßigtem Klima im zentralen Hochland von Mexiko. Diss. Giessen.
- ARIAS, H. y B. FIGUEROA.** 1990. La ecuación universal de pérdidas de suelos en la cuenca del río Texcoco. XI Cong. Latinoamericano y II Cong. Cubano de la Ciencia del Suelo. Marzo 12-17. La Habana, Cuba.
- AVILA H., M.** 1963. Recuperación de suelos erosionados de Chapingo, Méx. con plantaciones forestales. Tesis M.C. Rama de Suelos. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- BESOAIN, E.** 1985. Los Suelos. Capítulo I: 25-95. In: J. Tosso (ed) Suelos Volcánicos de Chile. Inst. de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 723 p.
- BRAUNACK, M. V. y A. R. DEXTER.** 1989. Soil aggregation in the seedbed: a Review. II Effect of aggregate sizes on plant growth. Soil and Tillage Research. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, Netherlands, 14, pp. 281-298.
- CAMARGO R., E. O. y ACOSTA, I. G.** 1987. Roturación y trituración de tepetate en el Valle del Mezquital. Su efecto en la agricultura bajo condiciones de riego, pp. 143-155. In: J. F. Ruiz F. (ed) Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Chapingo, Méx.
- CAUJOLLE-GAZET, A. y C. LUZURIAGA.** 1986. Estudio de un tipo de cangahua en el Ecuador. Posibilidades de mejoramiento mediante el cultivo. Documentos de investigación n°6, pp. 59-67, MAG. Quito, Ecuador.
- COLMET-DAAGE, F. et al.** 1975 à 1984. Cartes de sols de la Sierra équatorienne à 1/50 000. MAG-ORSTOM, Quito, Equateur.
- CREUTZBERG, D., J. H. KAUFFMAN, E. M. BRIDGES and G. DEL POSSO.** 1990. Micromorphology of "cangahua". A cemented subsurface horizon in soils from Ecuador, pp. 367-372. In: L. A. Douglas (ed). Soil micromorphology: a basic and applied science.
- DELGADILLO, M.E., M.E. MIRANDA y B. RUIZ** 1989. Evaluación de seis formas de roturación de tepetate amarillo para incorporarlo a la producción en el oriente de la cuenca de México. Tesis, UACH, Méx.
- DE NONI, G., G. TRUJILLO y M. VIENNOT.** 1986. L'érosion et la conservation des sols en Equateur. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 22 (2): 235-245.
- DUBROEUCQ, D., P. QUANTIN y C. ZEBROWSKI.** 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. Terra 7: 3-12.
- HEINE, K. y E. SCHÖNHALS.** 1973. Entstehung und Alter der "Toba"-Sedimente in Mexiko. Eiszeitalter u. Gegenwart, Band 23/24: 201-215.
- HERNANDEZ XOLOCOTZI, E.** 1987. Etnobotánica de Tlaxcala, pp. 1-8. In: J. F. RUIZ F. (ed). Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, Depto. Suelos, México.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS.** 1985. Cartas de suelos, Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile.
- LAUGENIE, C.** 1982. La région des lacs, Chili Méridional, Recherches sur l'évolution géomorphologiques d'un piémont glaciaire Quaternaire andin. Thèse Doctorat, Bordeaux III, Bordeaux, France. 822 p.
- LEAMY, M.L., G. SMITH, F. COLMET-DAAGE, E. BESOAIN y M. DELAUNE.** 1980. The morphological characteristics of Andisols. In: B.K.G. Theng (ed). Soils with variable charge. New Zealand Soc. of Soil Science.
- MARTINEZ, T., M. y A. GARCIA R.** 1990. Naturaleza de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México. Tesis de Licenciatura. UACH. Chapingo, Méx.
- MARIN, E.** 1973. Contribución al conocimiento de la génesis del Talpetate en Nicaragua. Publicaciones geológicas del ICAITI 4: 123-138.
- MIEHLICH, G.** 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanischeböden in drei Klimastufen eines rantropischen Gebirges (Sierra Nevada de México). Hebil. Schrift, Fachber. Geowiss, Univ. Hamburg, BDR. 402 p.
- MIEHLICH, G.** 1991. Chronosequences of volcanic ash soils. Hamburger Bodenkundliche Arbeiten 15. Hamburg, BDR. 207 p.
- NIMLOS, T.J.** 1989. The density and strength of Mexican tepetate (duric materials). Soil Sci. 147-1: 23-27.
- NIMLOS, T.J.** 1990. Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican tepetate. Soil survey horizons 30 (3): 72-77.

PEÑA H., D. y C. ZEBROWSKI. 1991. Caracterización de tepetates en la vertiente occidental de la Sierra Nevada, México. (en este volumen).

PRAT, C. 1991. Etude du "talpetate" de la région Centre Pacifique du Nicaragua, Thèse Univ. Paris VI, Paris, France. 320 p.

QUANTIN, P., C. ZEBROWSKI, M. DELAUNE y C. HIDALGO. 1991 El material original de los tepetates t2 y t3 de la región de Texcoco (México): "Loess o cineritas". En este volumen.

REY, J. 1979. Estimación de la erodibilidad de los tepetates en la cuenca del río Texcoco en base al factor K. Tesis M.C., Colegio de Postgraduados, Chapingo, Méx.

SAUER, W. 1947. Geología del Ecuador.

TOVAR, T.A. 1987. Determinación del efecto de aplicación de estiércol de bovino semiseco y fresco sobre el rendimiento de cebada en suelos erosionados, pp. 156-171. In: J. F. Ruiz F. (ed). Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Chapingo, Méx.

VALDEZ, L. 1970. Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la cuenca de México. Tesis, Colegio de Postgraduados, Méx.

VERA, R. y R. LOPEZ. 1986. El origen de la cangahua. Paisajes geográficos 16: 21-28, Quito.

WERNER, G., H. AEPPLI, G. MIEHLICH y E. SCHÖNHALS. 1978. Los suelos de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus alrededores. Comentario a un mapa de suelos (con 4 mapas). Suplemento Comunicaciones Proyecto Puebla-Tlaxcala, VI: 1-95, Puebla, México.

WILLIAMS, B.J. 1972. Tepetate in the Valley of México. Annals of the ASSN of Am. Geog. 62 (4): 618-632.

WOLF, T. 1896. Géographie et Géologie de l'Equateur.

ZEBROWSKI, C., P. QUANTIN, H. ARIAS y G. WERNER. 1991. Les "tepetates", récupération et mise en valeur des terres volcaniques indurées au Mexique. ORSTOM Actualités n°33, Paris, France.