



Organo Científico
de la Sociedad Mexicana
de la Ciencia del Suelo, A.C.

ISSN 0187-5779

TERRA

Volumen 11

Número Especial

1993

TEPETATES DE MEXICO: CARACTERIZACION Y HABILITACION PARA LA AGRICULTURA

(Informe Científico Final del Proyecto TS2-A 212-C CEE/ORSTOM)

Autor Principal:
Paul Quantin

Coautores:
A. Arias
J. Etchevers
R. Ferrera
K. Oleschko
A. Navarro
G. Werner
C. Zebrowski

INSTITUCIONES PARTICIPANTES

ORSTOM (Francia).

Colegio de Postgraduados de Montecillo (CP), Universidad Autónoma de Tlaxcala (UAT), Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Tlaxcala COPLADET - (México).

Justus Liebig Universität Giessen, Tropeninstitut Bodenkunde und Bodenerhaltung (Alemania).

PARTICIPANTES

Paul Quantin

Coordinador General, ORSTOM:

ORSTOM

Coordinador en México:

Claude Zebrowski

Colaboradores:

Mireille Delaune

Marc Fournier

Jean-Louis Janeau

Claude Robin

Colegio de Postgraduados de Montecillo

Coordinador:

Hector Manuel Arias Rojo

Responsable Fertilidad:

Jorge D. Etchevers Barra

Responsable Agronomía:

Hermilio Navarro

Responsable Micromorfología:

Klaudia Oleschko

Responsable Microbiología:

Ronald Ferrera-Cerrato

Colaboradores:

Maria Eugenia Miranda

David Peña

Alfonso Márquez Ramos

Felipe Olivarez Rodriguez

Rosa Maria López Romero

Marcela Ortiz Solorio

Juan Mares Afanador

Claudia Hidalgo Moreno

Maria de Lourdes Cruz Huerta

César Merino

Elias Carrillo

Universidad de Giessen

Coordinador:

Gerd Werner

Colaboradores:

Jürgen Baumann

Reiner Hessman

Universidad Autónoma de Tlaxcala

Coordinador:

Gerd Werner

Colaboradores:

Andrea Vera Reyes

Hipólito Muñoz Nara

Gustavo F. Flores

Prestadores de Servicio Social y Tesistas

1989-1990:

Gabriel Cerda Salazar, UNAM

Isabelle Gasnier, ISTOM

Géraldine Jérôme, ISTOM

Pascal Zahonero, ISTOM

1991:

Elsa Huerta Martinez, UNAM

Susana Paniagua Burinas, UNAM

Ricardo Rodriguez Rubio, UNAM

Cecilio Padilla Garduño, UNAM

Araceli Martinez Meneses, UNAM

Maria Mateos Hernández, UACH

Miguel Valeriano Hernández, UACH

Olimpia Cano Elizondo, U.A.T.

Fabiola Rosas C., U.A.T.

Alfredo Ramos Vázquez, U.A.T.

Martin Martínez Telumbre

1992:

Diego Flores Sánchez, UNAM

Aurelio Baez Pérez, UNAM

Dionisio Benitez Martinez, UNAM

Martha Rivas Rodriguez, UNAM

Ma. Antonia Pérez Olvera, UACH

Esta publicación se financió con una contribución de ORSTOM a la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, lo cual se agradece con la presente nota.

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA
DEL SUELO, A.C.

COMISION EDITORA

DR. JORGE D. ETCHEVERS B.,
Editor en jefe
DR. JAVIER Z. CASTELLANOS,
Editor adjunto
DR. ANDRES AGUILAR SANTELISES,
Editor técnico
M.C. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA,
Editor técnico
M.C. JORGE ALVARADO LOPEZ,
Editor técnico
SRA. CARELINA C. AALMERS DE AGUILAR,
Editora administrativa

MESA DIRECTIVA 1990-1994

M.C. JORGE L. TOVAR SALINAS,
Presidente
DR. CARLOS HERNANDEZ YAÑEZ,
Vicepresidente
M.C. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA,
Secretario General
ING. RUBEN RODRIGUEZ GOMEZ,
Tesorero
M.C. MARIO MONTES HELU,
Secretario Técnico
M.C. MIGUEL OLGUIN ORTIZ,
Secretario de Relaciones Públicas
M.C. ARMANDO LEGASPI GUZMAN,
Secretario de Eventos Nacionales e Internacionales
DR. FERNANDO FLORES LUI,
Vocal
M.C. LEON SALVADOR COVARRUBIAS GARCIA,
Vocal

"TERRA", Registro en Trámite. Organó oficial de divulgación de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Volumen 11 (Especial) 1993.

ISSN 0187-5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total del contenido de esta revista, citándola como fuente de información.

Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, redactadas conforme a las Normas para Publicación en la Revista TERRA, al Editor de la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Edo. de México, México.

Oficinas: Edificio del Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.

Teléfono: (595) 4-22-00, ext. 5237.

Editores Invitados

Paul Quantin (Coordinador)
J.D. Etchevers B.
C. Prat
C. Zebrowski

INDICE

EDITORIAL

i. Introducción.	5
ii. Medio físico.	7
1. Situación geográfica.	7
2. Geomorfología.	7
3. Geología.	9
4. Clima.	11
5. Suelos y tepetates.	13
6. Vegetación y utilización de los suelos.	15
iii. Cartografía de los suelos y tepetates.	15
1. Mapa de los suelos y tepetates del Valle de México. Hoja de Texcoco.	16
2. Mapa de los suelos y tepetates del Valle de Tlaxcala. Hoja de Apan.	17
iv. Caracterización de los suelos y tepetates.	17
1. Materiales originales de los suelos y tepetates.	18
2. Clasificación de los tipos de tepetate.	20
3. Material original y génesis de los tepetates de tipo fragipán.	20
4. Propiedades de tepetates de referencia.	27
v. Erosión y conservación de los suelos y tepetates.	32
a. <i>Región de Texcoco: experimentación con tepetate t3 y suelo. estación de San Miguel Tlaixpan</i>).	32
1. Propiedades iniciales del suelo y tepetate.	32
2. Determinación experimental del agregado óptimo del tepetate.	34
3. Parcelas experimentales de medición de la erosión, protocolo y métodos.	34
4. Seguimiento de las propiedades del tepetate y del suelo.	35
5. Mediciones de escurrimiento y de erosión.	38
6. Evolución de los estados de superficie y del desmoronamiento de los agregados.	42
b. <i>Región de Tlaxcala: experimentación con suelo y tepetate t2 y t3</i>	44
1. Estaciones, protocolo experimental y métodos.	46
2. Régimen y erosividad de las lluvias en 1991.	47
3. Medición de la erosión en 1990-91.	49
4. Escurrimiento en 1990-91.	50
5. Correlaciones entre los coeficientes EI_{30} y AI_m de erosividad y los resultados.	51
6. Régimen hídrico de los tepetates cultivados.	51
c. <i>Comparación entre las estaciones de Texcoco y de Tlaxcala: conclusiones</i>	52
1. Erosividad de las lluvias.	52
2. Escurrimiento, pérdidas en tierra, efecto de los tratamientos sobre la erosividad.	53
3. Evolución de los estados de superficie.	54
vi. Rehabilitación de la fertilidad de los tepetates.	54
1. Determinación de la fertilidad química en el laboratorio.	54
2. Estudio de la productividad agrícola de los tepetates.	57
vii. Conclusiones.	63
1. Cartografía de los suelos y tepetates.	63
2. Caracterización de los tepetates.	64
3. Susceptibilidad a la erosión de los tepetates cultivados.	65
4. Factores químicos y físicos de fertilidad del tepetate.	67
5. Productividad agrícola de tepetate cultivado.	68
6. Factores socio-económicos de rehabilitación agrícola de tepetates.	69
viii. Referencias bibliográficas.	69

SOIL SCIENCE SOCIETY OF MEXICO

EDITORIAL BOARD

DR. JORGE D. ETCHEVERS B.,
Editor-in-chief
DR. JAVIER Z. CASTELLANOS,
Associate editor
DR. ANDRES AGUILAR SANTELISES,
Technical editor
M.C. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA,
Technical editor
M.C. JORGE ALVARADO LOPEZ,
Technical editor
SRA. CARELINA C. AALMERS DE AGUILAR,
Managing editor

BOARD OF DIRECTORS 1990-1994

M.C. JORGE L. TOVAR SALINAS,
President
DR. CARLOS HERNANDEZ YAÑEZ,
Vice-President
M.C. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA,
General-Secretary
ING. RUBEN RODRIGUEZ GOMEZ,
Treasurer
M.C. MARIO MONTES HELU,
Technical Secretary
M.C. MIGUEL OLGUIN ORTIZ,
Secretary for Public Relations
M.C. ARMANDO LEGASPI GUZMAN,
Secretary for National and International Events
DR. FERNANDO FLORES LUI,
Member
M.C. LEON SALVADOR COVARRUBIAS GARCIA,
Member

"TERRA", Registration pending. Official publication
of the Soil Science Society of Mexico.

Volume 11 (Especial) 1993.

ISSN 0187-5779

The authors take full responsibility for the
articles published. Partial or total reproduction
of the content of this journal is authorized, as
long as this publication is cited as the information
source.

When submitting articles to this journal, an
original and two copies must be sent to: Editor de
la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia
del Suelo, A.C., Apartado Postal 45, 56230 Chapingo,
Edo. de México, México.

Office address: Edificio del Departamento de Suelos,
Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado
de México.

Telephone: 52-595-42200, ext. 5237.

Invited Editors

Paul Quantin (Coordinador)
J.D. Etchevers B.
C. Prat
C. Zebrowski

INDEX

i. Introduction.	5
ii. Environment.	7
1. Geographical situation.	7
2. Geomorphology.	7
3. Geology.	9
4. Climate.	11
5. Soils and tepetates.	13
6. Vegetation and land use.	15
iii. Mapping of soils and tepetates.	15
1. Maps of soils and tepetates of the Mexico Valley: sheet of Texcoco.	16
2. Map of soils and tepetates of the Tlaxcala Valley: sheet of Apan.	17
iv. Characterization of soils and tepetates.	17
1. Parent material of soils and tepetates.	18
2. Classification of the types of tepetates.	20
3. Parent material and genesis of the tepetates of fragipan features.	20
4. Properties of reference tepetates.	27
v. Erosion and conservation of soils and tepetates.	32
a. <i>Texcoco region: experimentation on the soils and 13 tepetate; (plot of San Miguel Tlaxpan).</i>	32
1. Initial properties of the soil and tepetate.	32
2. Determination of the optimum aggregate size.	34
3. Experimental plots of erosion measurement; protocols and methods.	35
4. Observation of the evolution of soil and tepetate properties 5. Measurements of runoff and soil loss.	38
6. Evolution of soil surface features and of aggregate degradation.	42
b. <i>Tlaxcala region: experimentation on the soil 12 and 13 tepetates.</i>	44
1. Experimental stations, protocols and methods.	46
2. Rainfall regime and erosivity in 1991.	47
3. Soil loss in 1990-91.	49
4. Runoff values in 1990-91.	50
5. Correlation of the EI ₃₀ , and Alm coefficients with the results (experimental data).	51
6. Moisture regime of cultivated tepetates.	51
c. <i>Comparison of the experimental sites of Texcoco and Tlaxcala; conclusions.</i>	52
1. Rainfall erosivity.	52
2. Runoff, soil loss, effects of the treatments on the erosivity.	53
3. Evolution of surface features.	54
vi. Restoration of the fertility tepetates.	54
1. Determination of chemical fertility in the laboratory.	54
2. Study of the agricultural productivity of cultivated tepetates.	57
vii. Conclusions.	63
1. Maps of soils and tepetates.	63
2. Characterization of tepetates.	64
3. Susceptibility to erosion of tepetates	65
4. Physical and chemical aspect of fertility in tepetates	67
5. Agricultural productivity of cultivated tepetates.	68
6. Socio-economic factors to for the agricultural rehabilitation of tepetate.	69
viii. References.	69

EDITORIAL

Esta obra es una síntesis de trabajos de investigación científica concerniente a la caracterización y la rehabilitación agrícola de los tepetates de los Estados de México y de Tlaxcala. Es una traducción del reporte científico final del proyecto TS2-A212-C de la comunidad Europea, escrito en francés, que se desarrolló de 1989 a 1992. Dicho proyecto fue el fruto de una cooperación científica entre cuatro instituciones, los mexicanos, el Colegio de Postgraduados de Montecillo y la Universidad Autónoma de Tlaxcala (con ayuda del COPLADET) y el Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM) de Paris y la Universidad Justus Liebig (Tropeninstitut) de Giessen, Alemania.

Este libro fue editado por TERRA con la autorización de la Comunidad Europea y publicado gracias a las aportaciones de ORSTOM.

El trabajo editorial fue de responsabilidad de un grupo de editores invitados, mientras que la traducción fue hecha por personal de la oficina de ORSTOM en México.

Este libro es una síntesis del conocimiento actual sobre los tepetates, horizontes endurecidos de suelos de origen volcánicos, que se encuentran en los Estados de México y de Tlaxcala. Es la razón por la cual el Comité Editorial de la revista TERRA estimó de gran interés su publicación para beneficio de agrónomos y edafólogos.

Primero se trata el medio ambiente de los tepetates y luego su distribución espacial y su manejo. Se presentan nuevos datos en cuanto al material parental, la génesis, las propiedades y la clasificación de tepetates.

La mayor contribución proviene de los trabajos experimentales de medición de la erosión en tepetates naturales y cultivados y de la rehabilitación de fertilidad y de su productividad agrícola. En el campo de la erosión y conservación de los tepetates recuperados y cultivados se destacan los datos concernientes a la erosividad de las lluvias, los factores y valores de escurrimiento y de erodibilidad de tepetates naturales y cultivados, así como la evolución de los estados de superficie y del régimen hídrico de los mismos. En el campo de la rehabilitación agrícola se trata especialmente de los factores de fertilidad química, tanto limitantes como favorables y de la fertilización, así como de la productividad agrícola de varios tipos de cultivo (trigo, maíz, frijol, haba, veza), del efecto del número de años de cultivos y del tipo de abono mineral o orgánico.

Finalmente, un estudio socioeconómico da una idea del interés y de la rentabilidad de la recuperación de los tepetates.

Es decir que este libro es un documento básico concerniente al conocimiento de los tepetates y su rehabilitación para la agricultura.

Paul Quantin
Editor Invitado

RESUMEN

Los tepetates son una de las causas de la degradación de los suelos en algunas regiones de los estados de México y de Tlaxcala. El estudio de los mismos tiene como objetivo mejorar el conocimiento de los suelos volcánicos endurecidos teniendo como meta su rehabilitación agrícola.

El programa comprendió dos operaciones principales: (1) Inventario, caracterización y cartografía de los tipos de tepetate. (2) Regeneración de la fertilidad de los tepetates y conservación de suelos.

Se elaboraron dos hojas de mapas morfoedafológicos a escala 1 : 50 000 (Texcoco y Apan). Se precisó la localización de los tepetates, así como la naturaleza y estratigrafía del material original. Los tipos de tepetate se caracterizaron mediante microscopía, mineralogía y criterios físico-químicos. Se propone una clasificación tomando en cuenta la estratigrafía y el comportamiento del fragipán o del horizonte petrocálcico, según el cementante.

En el laboratorio se determinó el tamaño óptimo (diámetro = 2-3 mm) de los agregados para un suelo agrícola estable. El estudio de la erosión se hizo en parcelas experimentales localizadas en cuatro sitios, con dos tipos de tepetate y uno de suelo. Se hicieron mediciones de intensidad de lluvias, escurrimiento y erosión, así como observaciones sobre la evolución del estado de superficie y de las propiedades físicas. El escurrimiento y la

erosión dependen de la erosividad de las lluvias y del manejo del suelo. Un tepetate cultivado al desnudo es muy erosionable. El surcado, con o sin una cubierta de maíz, es muy eficiente para reducir el efecto de lluvias poco erosivas, pero lo es mucho menos para las lluvias muy erosivas. El aumento del escurrimiento y de la erosión se debe al desmoronamiento de los agregados inferiores a 2 mm y a la formación de una costra en la superficie del suelo.

Un ensayo en invernadero permitió concluir que la fertilidad química de los tepetates está fuertemente limitada por una deficiencia de nitrógeno y fósforo lábil y otro en laboratorio que el fósforo aplicado permanece lábil. Una fertilización con N, P, y sin K, es, entonces, suficiente. La regeneración de la fertilidad es rápida pero varía según las plantas. El trigo y la veza con fertilización mineral (N, P) u orgánica tienen un rendimiento casi normal desde el primer año. Pero el maíz y el frijol, presentan rendimientos muy bajos en el primer año y se vuelven casi normales en el tercer año. Un agente biológico podría ser la causa de este comportamiento. El abono orgánico (estiércol + P) y una textura fina (< 2 mm) permiten un rendimiento óptimo.

Una encuesta de los sistemas económicos familiares mostró que los tepetates son un recurso necesario para las pequeñas explotaciones agrícolas (< 15 ha). El costo de los trabajos de rehabilitación de los tepetates, con ayuda del Estado, puede amortizarse en 8 años.

SUMMARY

The aim of the study of the Mexico and Tlaxcala tepetates is a better knowledge about indurated volcanic soils, which are a cause of desertification in this country, in order to rehabilitate agricultural soils. The program involved two main operations: (1) Inventory, characterization and mapping of tepetate types. (2) Improvement of tepetate fertility and soil conservation.

Two sheets of morpho-pedological map were made at 1/50000 (Texcoco and Apan). We know now more precisely the situation of tepetates, as well as the nature and the stratigraphy of parent material. The types of tepetate were characterized by microscopy, mineralogy and some chemical and physical properties. We propose a classification taking into account the stratigraphic level and the behavior of fragipan or of petrocalcic horizon, according to the cementing agent. A laboratory experimentation allowed to determine the optimum aggregate size ($d = 2-3$ mm) for stable agricultural soil. The study of erosion was made in experimental plots in four stations and on two types of tepetate and one soil. We made measures of rainfall intensity, runoff and soil loss, as well as, observations on the evolution of surface features and physical properties. Runoff and erosion depend on rainfall erosivity and soil treatment. A bare tilled

tepetate is very erodible. A ridging, with or without maize cover, resulted very effective to prevent erosion caused by weakly erosive rainfalls, but lesser effective for strongly erosive ones. The increase of runoff and erosion is due to the destruction of aggregates of less than 2 mm of diameter which forms a crust.

Greenhouse experimentation as well as chemical tests showed that tepetates fertility is strongly limited by a lack in nitrogen and available phosphorus. The added phosphorus remains mostly available. A mineral (N, P, without K) fertilisation was effective to reduce native deficiency of these elements. The improvement of fertility can be achieved in short time but it depends on the plant species. Wheat and vetch, with mineral or organic fertilization give a nearly normal yield since the first year. But for maize and bean the yield was very low in the first year, then became normal in the third one. That could be due to the action of biological agent. An organic fertilization (manure + P) and a fine texture (less 2 mm) allowed for an optimum yield.

Research on the family economic systems showed that tepetates are important soil resources for small farms (less 15 ha). The cost of tepetates improvement, with the help of the State, can be amortized after 8 years of culture.

RESUME

L'étude des tepetates de Mexico et de Tlaxcala a pour but une meilleure connaissance des sols volcaniques indurés, responsables en partie de la désertification de ces régions, en vue de leur réhabilitation agricole. Le programme a comporté deux opérations principales: (1) Inventaire, caractérisation et cartographie des types de tepetate. (2) Régénération de la fertilité des tepetates et conservation des sols. Deux feuilles de carte morpho-pédologique ont été levées à 1/50 000 (Texcoco et Apan). La localisation des tepetates a été précisée, ainsi que la nature et la stratigraphie du matériau originel. Les types de tepetate ont été caractérisés microscopiquement et selon leur minéralogie et leurs critères physico-chimiques. Une classification est proposée tenant compte de la stratigraphie et du comportement du fragipan ou, selon le ciment, de l'horizon pétrocalcique. Une expérimentation en laboratoire a permis de déterminer la taille de l'agrégat optimum ($d=2-3$ mm) pour obtenir un sol agricole stable. L'étude de l'érosion a été réalisée en parcelles expérimentales de quatre stations incluant deux types de tepetate et un sol. Elle a comporté des mesures d'intensité des pluies, du ruissellement et de l'érosion, ainsi que des observations sur l'évolution de l'état de surface et des propriétés physiques. Le ruissellement et l'érosion dépendent de l'érosivité des pluies ainsi que des façons culturales. Un tepetate cultivé à nu est

érodible. Un billonnage, avec ou sans couvert de maïs, est très efficace pour des pluies faiblement érosives, mais moins pour des pluies fortement érosives. L'accroissement du ruissellement et de l'érosion est dû à la fonte des agrégats inférieurs à 2 mm et à la formation d'une croûte.

Une expérimentation en serre et au laboratoire a montré que la fertilité chimique d'un tepetate est fortement limitée par une carence en azote et en phosphore labile. Le phosphore ajouté reste labile. Une fertilisation N, P, sans K, suffit. La régénération de fertilité est rapide mais varie selon les plantes. Le blé et la vesce avec fertilisation minérale (N,P) ou organique ont un rendement presque normal dès la première année. Mais pour le maïs et le haricot, le rendement est très faible en 1^{ère} année, puis devient normal en 3^{ème} année. Un agent biologique en serait la cause. La fumure organique (fumier + P) et une texture fine (< 2 mm) permettent un rendement optimum.

Une enquête sur les systèmes économiques familiaux a montré que les tepetates sont une ressource en terre agricole nécessaire pour les petites exploitations (< 15 ha). Le coût des travaux de réhabilitation, avec l'aide de l'Etat, peut être rentabilisé en 8 ans.

ARTÍCULO

El presente artículo tiene como objetivo principal analizar el impacto de las políticas económicas implementadas en el sector agrícola de Colombia durante el periodo 1980-1990. Se examina el efecto de las reformas estructurales y el rol del Estado en el desarrollo rural. Se concluye que las políticas de ajuste estructural han generado un deterioro de las condiciones de vida de los campesinos, especialmente en lo referente a la tenencia de la tierra y el acceso a los servicios básicos. Se propone una serie de medidas para revertir esta situación y promover un desarrollo agrícola sostenible.

El presente artículo tiene como objetivo principal analizar el impacto de las políticas económicas implementadas en el sector agrícola de Colombia durante el periodo 1980-1990. Se examina el efecto de las reformas estructurales y el rol del Estado en el desarrollo rural. Se concluye que las políticas de ajuste estructural han generado un deterioro de las condiciones de vida de los campesinos, especialmente en lo referente a la tenencia de la tierra y el acceso a los servicios básicos. Se propone una serie de medidas para revertir esta situación y promover un desarrollo agrícola sostenible.

I. INTRODUCCION

El estudio de los "tepetates", suelos volcánicos endurecidos de las cuencas de México y Tlaxcala, tiene como finalidad constituir una base científica de referencia para la rehabilitación agrícola de los suelos que perdieron su fertilidad. Los tepetates están situados sobre los piedemontes y planicies a ambos lados de la Sierra Nevada. La erosión desnudó amplias áreas de estas capas endurecidas casi estériles, contribuyendo a la desertificación de estas regiones que tienen una alta densidad de población rural. El fuerte crecimiento demográfico de la región implica la necesidad de recuperación de estas tierras estériles para desarrollar la agricultura.

El problema planteado a los científicos fue determinar la naturaleza, el origen y el proceso de formación de los materiales endurecidos en los suelos volcánicos. El segundo, determinar aquellas propiedades que pudiesen favorecer o restringir su uso agrícola, particularmente la fertilidad potencial, su estabilidad frente a la erosión, es decir su capacidad para convertirse en suelos fértiles y estables.

Por las razones anteriores, el programa de estudio abordó dos temas principales: (1) el inventario, caracterización y cartografía de los tepetates y (2) la regeneración de la fertilidad y conservación de los mismos. Un tercer tema, es el estudio del funcionamiento de un sistema tepetate, es decir, el proceso de endurecimiento. Sólo las dos primeras operaciones fueron llevadas a cabo. La tercera no pudo ser realizada, por falta de una metodología apropiada y confiable.

Este estudio tuvo una duración de tres años (1.04.89 al 30.03.92). Al interior del programa se desarrollaron dos proyectos: uno en la región de México, conducido por el Colegio de

Postgraduados de Montecillo (CP) y el ORSTOM; y el otro en la región de Tlaxcala, realizado por la Universidad de Giessen (UG) y un consorcio de la Universidad de Tlaxcala (UAT) y de Servicios del Gobierno de ese Estado. Por esta razón, el programa fue realizado en dos lugares distintos y por dos equipos: cuenca de México / CP-ORSTOM y cuenca de Tlaxcala / UG-UAT. La coordinación científica se dedicó a la concertación de los asociados, a fin de vigilar complementaridad en los trabajos y para desarrollar intercambios benéficos entre los equipos.

Los principales participantes en este campo fueron: (a) Equipo CP-ORSTOM: C. Zebrowski, D. Peña, K. Oleschko, J. Etchevers, C. Hidalgo, M. Delaune, P. Quantin, personal de los laboratorios y estudiantes del CP; (b) Equipo UG-UAT: G. Werner y R. Hessmann y personal de la UAT.

Los principales trabajos realizados y presentados en este informe son los siguientes:

I. INVENTARIO, CARACTERIZACIÓN Y CARTOGRAFÍA DE LOS TEPETATES

1.1. Cartografía de los suelos y de los tepetates

La cartografía de los suelos y de los tepetates, a escala 1:50 000 (a) de la vertiente oeste de la Sierra Nevada, Valle de México, fue efectuada por D. Peña y C. Zebrowski; y (b) la del noreste de la Sierra Nevada, Valle de Tlaxcala (complemento de mapas anteriores), por G. Werner. Esta cartografía permitió la identificación de los principales tipos de tepetates (correlación entre las dos regiones) y mostrar su distribución espacio-temporal.

1.2. Caracterización de los principales tipos de tepetates y suelos asociados

La caracterización de los principales tipos de tepetates y suelos asociados fue realizada por: observaciones microscópicas (petrografía - micromorfología), análisis de los constituyentes

minerales (mineralogía, sedimentología), determinación de las propiedades físicas y químicas y algunas dataciones de materiales.

Los principales resultados son: una clasificación de los tipos de tepetate; el establecimiento de la naturaleza y la edad de los materiales originales; el reconocimiento de la naturaleza de los cementantes, arcilla, silicio y calcárea; las propiedades mecánicas e hidrodinámicas; los factores físicos y químicos de fertilidad potencial.

2. REGENERACIÓN DE LA FERTILIDAD DE LOS TEPETATES Y CONSERVACIÓN DE SUELOS

2.1. Estudio experimental de la erosión y de la conservación de suelos

El estudio experimental de la erosión y de la conservación de suelos se hizo solamente con tepetates poco silicificados (fragipanes), el caso más común en esta región. Comprendió mediciones en el laboratorio y en el campo.

2.1.1. Laboratorio

En el laboratorio, K. Oleschko y M. Martínez determinaron el tamaño del "agregado óptimo" del tepetate roturado.

2.1.2. Campo

En el campo, la experimentación se hizo en pequeñas "parcelas de erosión":

a) Equipo CP-ORSTOM:

* H. Arias y M. E. Miranda midieron la erosión y el comportamiento hídrico de un tipo de tepetate en parcelas de tipo Wischmeier (los resultados de 1990 son incompletos en tepetate y suelo; en 1991, se cuenta con la información completa)

* J. L. Janeau y G. Jérôme estudiaron en 1991 la evolución de los estados de superficie (desmoronamiento de los agregados) de los tepetates rehabilitados.

b) Equipo UG-UAT: G. Werner, J. Baumann y sus asistentes de la UAT hicieron mediciones de erosión, escurrimiento y comportamiento hídrico de dos tipos de tepetates y en varios sitios durante 3 años (1989 a 1991). Se considera que sólo los resultados de 1990 y 1991 son realmente confiables.

2.2. Estudio de la regeneración de la fertilidad

El estudio de la regeneración de la fertilidad incluyó tres operaciones: caracterización de los tepetates de referencia, experimentación en el laboratorio y experimentación en el campo.

2.2.1. Caracterización de las propiedades físicas y químicas

La caracterización de las propiedades físicas y químicas de tepetates de referencia fue hecha por J. Etchevers, R. López, D. Peña y C. Zebrowski en asociación con los laboratorios del CP y ORSTOM.

2.2.2. Experimentación en el laboratorio e invernadero

La experimentación en laboratorio e invernadero fue conducida en el CP y en ORSTOM por J. Etchevers en colaboración con C. Hidalgo, L. Cruz y J. Mares; comprendió dos operaciones: un experimento en invernadero que mostró la existencia de una carencia en fósforo; un experimento de laboratorio sobre la dinámica de intercambio y disponibilidad de los elementos K y P absorbidos por los tepetates.

2.2.3. Experimentación agronómica en el campo

La experimentación agronómica en el campo tuvo dos aspectos: el agronómico y el socio-económico.

a) Experimentación agronómica realizada por el equipo CP-ORSTOM. Luego de algunas observaciones por C. Zebrowski y M. Ortiz en 1989 en parcelas de tepetates rehabilitados en

medio campesino en la región de México, C. Zebrowski, H. Navarro y A. Márquez pusieron en marcha un experimento en la región de Tlaxcala en 1990 y en 1991. Se pudo comprobar así el efecto de dos tipos de tepetates sobre varios cultivos en función del número de años de rehabilitación agrícola. La evolución de algunas propiedades del suelo (agua, nutrimentos) fue comparada con la evolución del rendimiento de los cultivos.

Una parte de las mediciones hídricas sobre el terreno se hizo en colaboración con J. Baumann y sus asistentes del equipo UG-UAT. Por otra parte, se tuvo experimentos comparados con dos tipos de tepetate, pero insuficientemente controlados, que fueron manejados por el CIFAP-Tlaxcala en colaboración con G. Werner.

b) Estudio socio-económico por el equipo CP-ORSTOM: H. Navarro, P. Zahonero y C. Zebrowski. Se trató de una encuesta sobre los costos de los trabajos de rehabilitación de los tepetates y de su rentabilidad en comparación con las estructuras familiares agrícolas. Los resultados de este estudio iniciado en 1991 no están todavía completamente analizados.

El presente informe es una síntesis de los diferentes informes y publicaciones de los principales participantes. En el proyecto comprende:

*un resumen,

*una breve presentación sobre el medio físico,

*los principales resultados de cada programa, a saber:

- 1) cartografía de los suelos y tepetates,
- 2) caracterización de los tepetates y materiales originales,
- 3) erosión y conservación de suelos y tepetates,
- 4) rehabilitación de la fertilidad de los tepetates,

*las conclusiones científicas y las consecuencias prácticas de la rehabilitación de los tepetates

*las principales referencias bibliográficas citadas por los participantes en sus informes.

II. MEDIO FÍSICO

1. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

La región estudiada se localiza al este de México, en los estados de México y de Tlaxcala entre 19°10' y 19°40' norte, 98°10' y 98°55' oeste (Figura 1). Se trata de las vertientes occidental y oriental de la Sierra Nevada, que forman parte del Valle de México y de los Valles de Puebla-Tlaxcala, respectivamente. Esta región se ubica en el dominio intertropical-norte. Su altitud es muy elevada: las cimas de la sierra volcánica con orientación norte-sur, se escalonan entre 3 000 msnm al norte y 5 465 msnm al sur mientras que las llanuras y las planicies de los Valles de México al oeste y de Puebla-Tlaxcala al este se ubican entre 2 200 y 2 400 msnm. La Sierra comprende sucesivamente de norte a sur tres aparatos volcánicos principales: Tláloc-Telapón (alt. 4 120 y 4 060 msnm), Iztaccshuatl (alt. 5 230 msnm) y Popocatepetl (alt. 5 465 msnm). Nuestro estudio se refiere sobre todo a las vertientes y planicies alrededor del Tláloc-Telapón.

2. GEOMORFOLOGÍA

Esta región se ubica en el altiplano central mexicano y en la intersección del Eje Neovolcánico (de edad Plio-Cuaternario) que atraviesa de este a oeste la República Mexicana o sea de Veracruz a Colima, pasando por la ciudad de México.

Este altiplano es un conjunto tectónico de planicies levantadas y hondonadas ocupadas por lagos y sedimentos. La sierra volcánica (Sierra Nevada) emerge del altiplano al que separa en dos grupos de valles: el valle de la ciudad de México al oeste y el de Puebla-Tlaxcala al este. En dichos valles, aparecen una multitud de conos volcánicos aislados. En cada vertiente de la Sierra se distinguen sucesivamente cuatro formas de

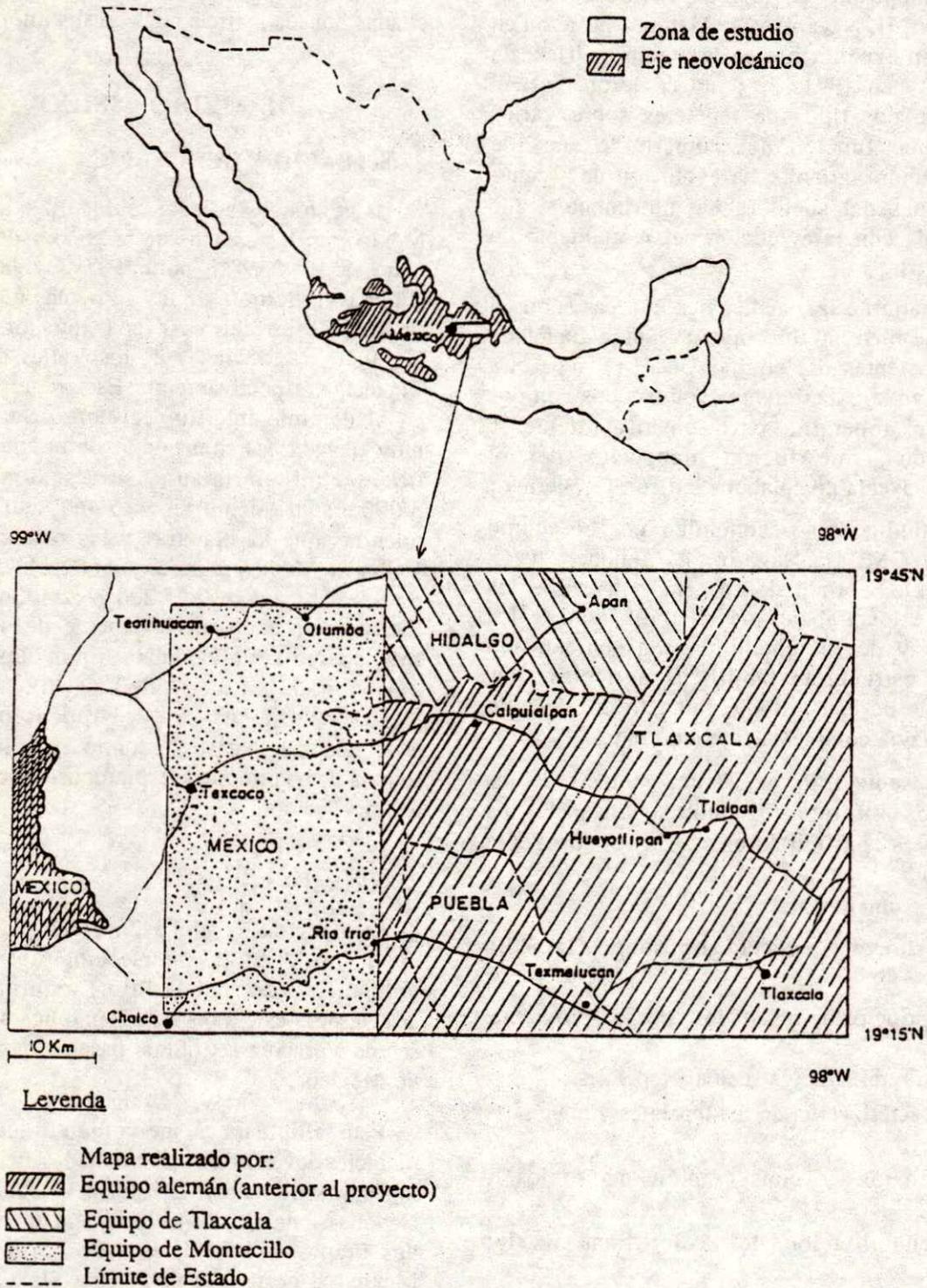


Figura 1. Mapa de situación.

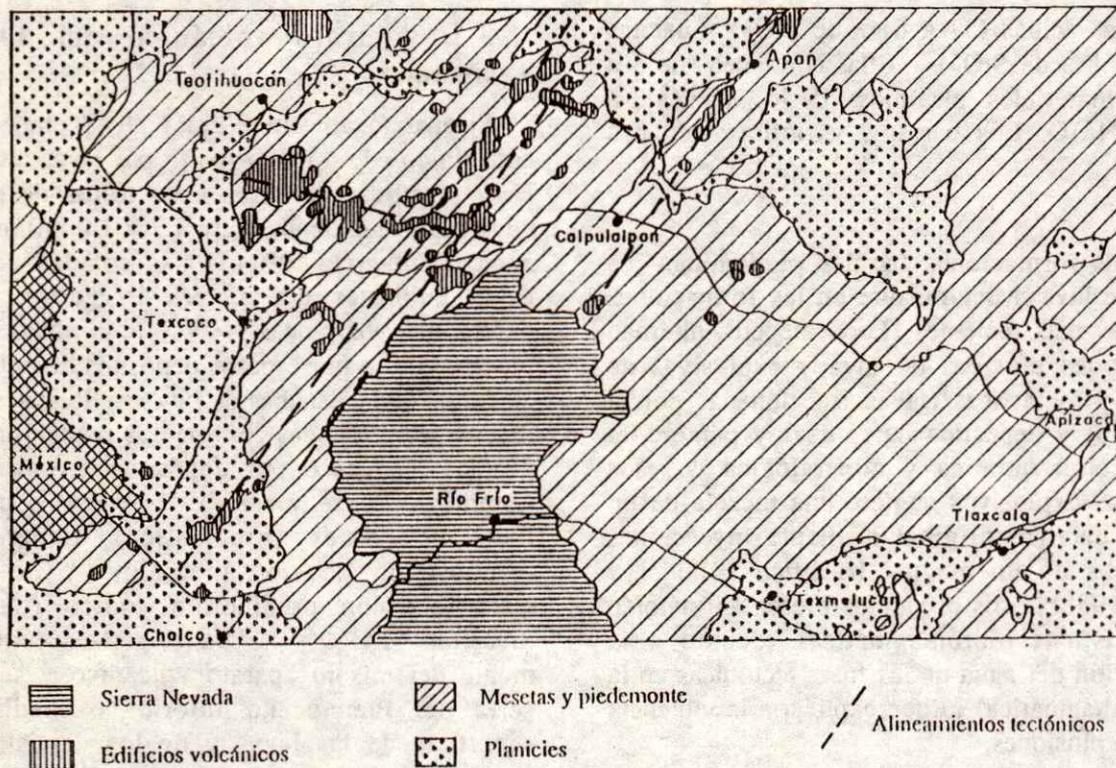


Figura 2. Esquema fisiográfico.

relieve (rfo abajo de la cima): sierra, piedemonte, glacis y llanura, lo que constituye una toposecuencia (Fig. 2).

La Sierra tiene un relieve de montaña escarpado y muy disectado arriba de los 2 800 a 3 000 msnm. El piedemonte es una forma de meseta volcano-sedimentaria con pendiente de 8 a 15% atravesada por barrancas. El glacis es una superficie aplanada, con pendiente débil de 3 a 5% y que une el piedemonte a la planicie. La planicie es de origen lacustre y sedimentario, colmada de sedimentos.

Se observan modelados glaciares y periglaciares sobre las cumbres de la Sierra (Tlálóc, Telapón, Iztaccshuatl, con excepción del Popocatepetl) por arriba de los 3 200 a 3 400 msnm.

3. GEOLOGÍA

Los sedimentos lacustres mamo-calcáreos de edad Cretácea fueron profusamente cubiertos por

formaciones volcánicas y volcano-sedimentarias de edad Cuaternaria. Las pocas apariciones de los mames cretáceos están en el borde de las fallas (horst de Tlaxcala).

3.1. Sierra Nevada.

La formación volcánica de la Sierra Nevada tuvo su inicio hace 1.7 millones de años (fin del Plioceno) y se prolongó hasta el Holoceno en el Iztaccshuatl y sigue activa en el Popocatepetl (Robin, 1984; Nixon, 1989). Esta formación parece haberse detenido desde hace 1 millón de años en la cumbre del aparato volcánico Tlálóc-Telapón (datación de Cantagrel, 1991), aunque sean visibles erupciones laterales recientes (0.1 a 0.01 millones de años) al norte y al sur (Río Frío) de este aparato.

La composición química de las lavas y de las piedras pómez es calco-alkalina, generalmente rica en sílice y en materiales alcalinos, sobre todo en sodio y potasio. Las lavas más frecuentes son

andesitas ácidas (57 a 61% de SiO₂) y dacitas (62 a 68% de SiO₂). Ellas contienen de 5 a 8% de materiales alcalinos, de los cuales 3 a 5% es Na₂O. Los basaltos y riolitas son más raros.

En las formaciones basales predominan los flujos de lava. Mientras que en las formaciones cúspideas más recientes (Popocatepetl), alternan formaciones efusivas de lava y explosivas de coladas piroclásticas (lavas fraccionadas por la explosión) y depósitos de cenizas y pómez. La composición química y mineralógica de esos productos explosivos sugiere una mezcla de un magma dacítico original mediante inyecciones periódicas de un magma basáltico (Boudal y Robin, 1988). Esos productos presentan también características hidromagmáticas (debido a la penetración del agua de las fosas tectónicas en la cámara magmática) lo que explicaría la violencia de las explosiones.

Las formaciones piroclásticas (cenizas, flujos y piedra pómez) sobre todo en forma de peleanas (avalanchas y lluvias de cenizas), cubrieron con capas de gran espesor, inmensas superficies de la Sierra, de los piedemontes y de las llanuras de los alrededores. Estas capas pueden también provenir de otros aparatos volcánicos ubicados alrededor de la Sierra Nevada. Esas formaciones superficiales pudieron también ser reacomodadas por las últimas glaciaciones (40.000 a 10.000 BP¹, según White, 1962 y Heine, 1973) bajo la forma de arenas, de corrientes lodosas o de tills², o por el viento (loess) o la erosión (aluviones y coluviones). Heine y Schönhals (1973), Miehllich (1984) y Hessmann (1991) atribuyeron la formación de las tobas (tobas volcanoclásticas) sobre los piedemontes y planicies que rodean la Sierra al efecto eólico. Sin embargo, esta interpretación es discutible (Quantin *et al.*, 1991).

¹ BP: Before Present, o sea antes de 1954.

² Till: Palabra inglesa indicando un depósito mornico no consolidado.

3.2. Aparato volcánico del Tláloc-Telapón.

El aparato volcánico del Tláloc-Telapón está constituido en su mayor parte por lavas andesíticas y dacíticas oscuras y en forma de cintas, cuya edad se extiende entre 1.7 y 1.0 millones de años (Cantagrel, 1991). Estas coladas de lava están cubiertas de manera irregular en las depresiones, barrancas y sobre todo abajo de los piedemontes o por espesos depósitos de peleanas, en forma de avalanchas de bloques de andesitas y de dacitas mezcladas con piedras pómez grises y cenizas blancas o por depósitos estratificados (laminitas, "base surges") de cenizas y pómez. Esos materiales piroclásticos tienen una composición de riolita alcalina y de latita cuarccifera con predominio sódico (nuestras muestras MXR 2 y 4). Su origen es probablemente del mismo aparato volcánico y su edad sería del Pleistoceno inferior o medio. La superficie de las lavas y de los depósitos de pómez fue alterada a suelo café rojizo arcilloso con haloisita. Este suelo fue parcialmente erosionado antes de ser cubierto por nuevos depósitos piroclásticos del Pleistoceno Superior y del Holoceno.

Se trata por una parte, de una serie de tobas, productos volcanoclásticos finos y parcialmente alterados en suelos que Heide-Weise (1973), Heine y Schönhals (1973) y luego Miehllich (1984) dataron entre 10 000 BP, los más recientes, y más de 20 000 BP los más antiguos. Por otra parte, las tobas de los piedemontes o directamente las arenas periglaciares de la Sierra, están cubiertas de depósitos Holócenos de cenizas grises y de piedras pómez provenientes de las últimas emisiones del Popocatepetl (Robin, 1984). Entre tobas y cenizas o intercalados dentro de las tobas, aparecen localmente depósitos de pómez riolíticas (sobre todo, pómez de Río Frío de 0.012 millones de años). Los materiales piroclásticos de las tobas, de las pómez y cenizas del Pleistoceno Superior pueden provenir del Iztaccfhuatl y del Popocatepetl (Boudal y Robin, 1988; Nixon, 1989) u otros volcanes de alrededor. Su composición según

nuestros análisis, les asemeja a riolitas, riolitas y riolitas alcalino-sódicas. Esos depósitos pudieron ser reorganizados localmente (depósitos eólicos, coluviones, aluviones).

4. Clima

4.1. Zonas climáticas

El clima de la región de México y Tlaxcala es un clima intertropical¹, diferenciado en función de la altitud (2 200 a 5 465 msnm) y de efectos de vertiente. Del Valle de México a la cima de la Sierra Nevada se distinguen cuatro zonas climáticas en función de su altitud, temperatura (T) y precipitación (P) (T y P = temperatura y pluviosidad promedios anuales).

- *Altitud 2 200 a 2 800 msnm; llanura, planicies y piedemontes:*

T: 15 a 11°C; P: 600 a 900 mm; época estival de lluvias de 6 meses (mayo a octubre); temporada seca invernal de 6 meses de los cuales 1 ó 2 meses sub-húmedos (abril y noviembre) y 4 a 5 meses sub-áridos (diciembre a marzo). El régimen hidro-térmico es ustic-isomesic². Es un clima templado con lluvias de verano y 6 meses de temporada seca invernal.

- *Altitud 2 800 a 3 400 msnm; Sierra inferior:*

T: 11 a 8°C; P: 900 a 1 200 mm; época seca atenuada por neblinas diurnas, con 5 a 4 meses sub-húmedos (noviembre a marzo). El régimen hidro-térmico es udic-isomesic. Es un clima templado más frío y más húmedo que en la llanura, con fuerte nubosidad estival o con neblinas y heladas nocturnas frecuentes en invierno.

- *Altitud 3 400 a 4 000 msnm; Sierra intermedia:*

T: 8 a 5°C; P > 1 200 mm; época seca muy atenuada por una fuerte nubosidad y neblinas; heladas nocturnas muy frecuentes en invierno.

El régimen hidro-térmico es perudic-isofrigid. Es un clima frío y perhúmedo.

- *Altitud > 4 000 msnm; Sierra superior:*

T < 5°C; régimen cryic; fuertes variaciones diurnas de temperatura; heladas y nieve muy frecuentes en invierno. Es un clima frío de tipo andino.

Los suelos que estudiamos están situados en las tres primeras zonas climáticas. Los tepetates están presentes solamente en la primera por debajo de los 2 800 msnm con régimen ustic-isomesic.

4.2. Distribución altitudinal del clima

La distribución del clima sobre las vertientes del piedemonte y de la Sierra (Figura 3) sigue una gradiente altitudinal: negativa para la temperatura y positiva para la lluvia y la humedad. Es una climotoposecuencia altitudinal. De 2 200 a 2 800 msnm, hay transición progresiva del régimen de humedad de ustic a udic y de pluviosidad de 600 a 900 mm/año. El efecto de la época seca se atenúa; el exceso pluviométrico (lluvia-evaporación) aumenta; la humedad de los suelos debajo de la cobertura vegetal permanente es mayor que el punto de marchitez. Así, de Chalco (SE de México, 2 240 msnm) a Río Frío (Sierra, 3 100 msnm), la temperatura disminuye de 15 a 10°C, la pluviosidad aumenta de 657 a 1 074 mm/año, el exceso pluviométrico estival se acrecienta de 290 a 710 mm y el déficit pluviométrico invernal disminuye de 200 a 80 mm.

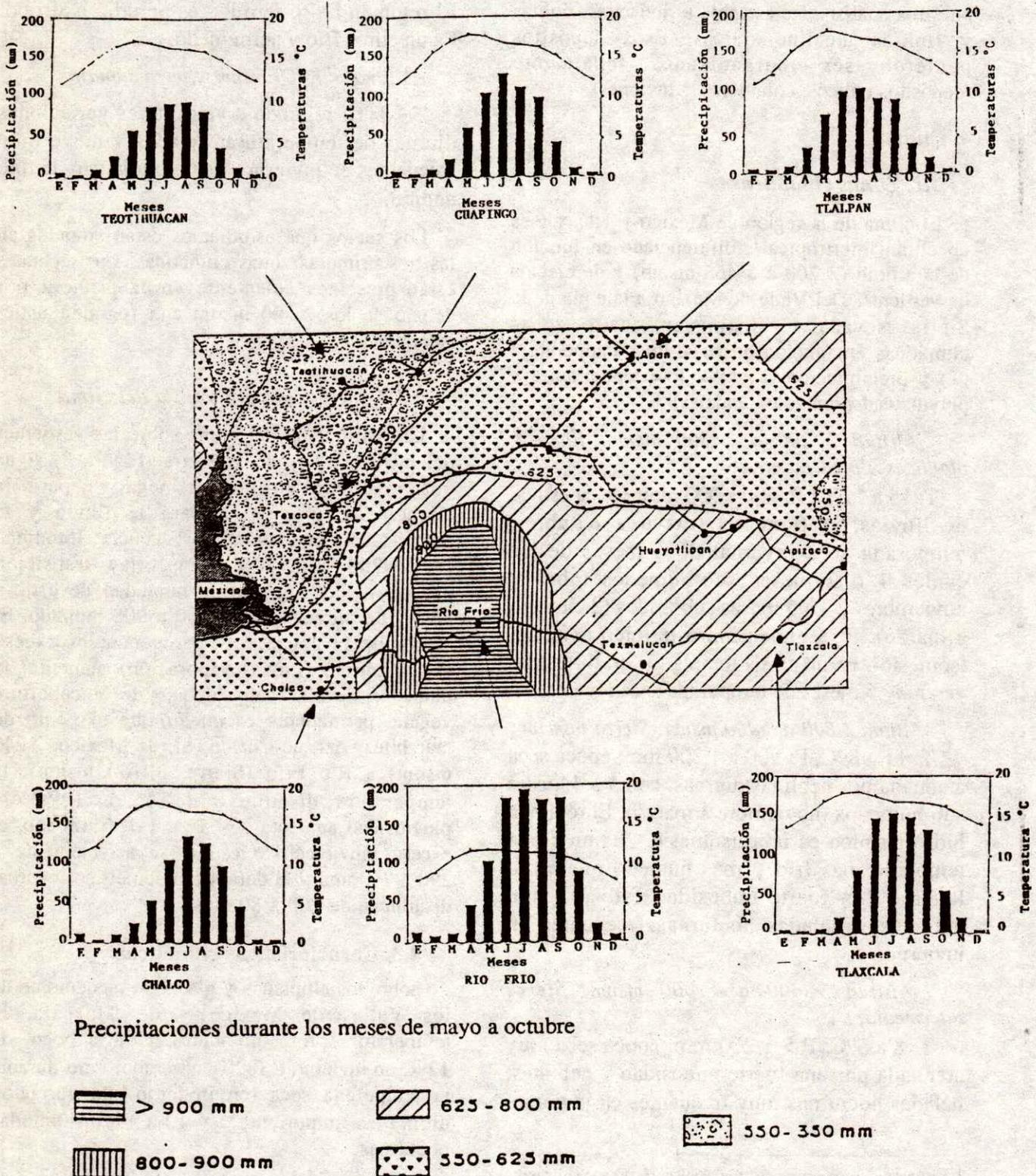
4.3. Características climáticas.

Sobre los altiplanos y glaciares de piedemonte de los Valles de México y de Tlaxcala, la temperatura promedio mensual varía poco, de 12°C en invierno a 18°C en verano. Pero durante la temporada seca (en invierno), la variación diurna es importante (> 10°C) con heladas nocturnas.

Por otra parte, se observa una gradiente de aridez latitudinal, desde el sur hacia el norte

¹ La temperatura promedio mensual varía poco: solamente 6°C en el transcurso del año.

² Régimen higro-térmico de la "Soil Taxonomy", 1975.



Precipitaciones durante los meses de mayo a octubre

Figura 3. Distribución de los climas, climogramas.

(Figura 3). En el Valle de México, la pluviosidad disminuye de 657 mm (Chalco) a 563 mm (Teotihuacan), el exceso pluviométrico estival de 290 a 190 mm y el déficit invernal aumenta de 200 a 220 mm. En el Valle de Tlaxcala, la precipitación disminuye de 803 mm (Tlaxcala) a 625 mm (Apan), el exceso pluviométrico de 330 a 240 mm y el déficit invernal se registra de 220 a 240 mm.

5. SUELOS Y TEPETATES

5.1. Origen de los suelos y tepetates

Los suelos de las regiones de México y de Tlaxcala se formaron a partir de materiales piroclásticos de origen volcánico y de edad Cuaternaria. Son suelos jóvenes (ricos en minerales volcánicos poco alterados) y complejos. Se constituyeron sobre una sucesión de depósitos del Pleistoceno Superior y del

Holoceno y de composición variada que analizamos detalladamente (ver más adelante). Un perfil de suelo presenta a menudo una serie estratigráfica de suelos de diferentes edades, lo que complica su caracterización y su clasificación.

5.2. Los suelos

La distribución de los principales grupos de suelos ocurre a lo largo de una climotoposecuencia o sea la distribución climática altitudinal (Miehlich, 1984; Dubroeuq *et al.*, 1989). Así, sobre la vertiente oeste de la Sierra (del Tlaloc a Texcoco) se observan sucesivamente (Figura 4): de 4 100 a 2 800 msnm, en la Sierra y clima regularmente húmedo (régimen údico), Andosoles; de 2 800 a 2 250 msnm, sobre el piedemonte y el glacis en clima subhúmedo (régimen ústico), una transición de

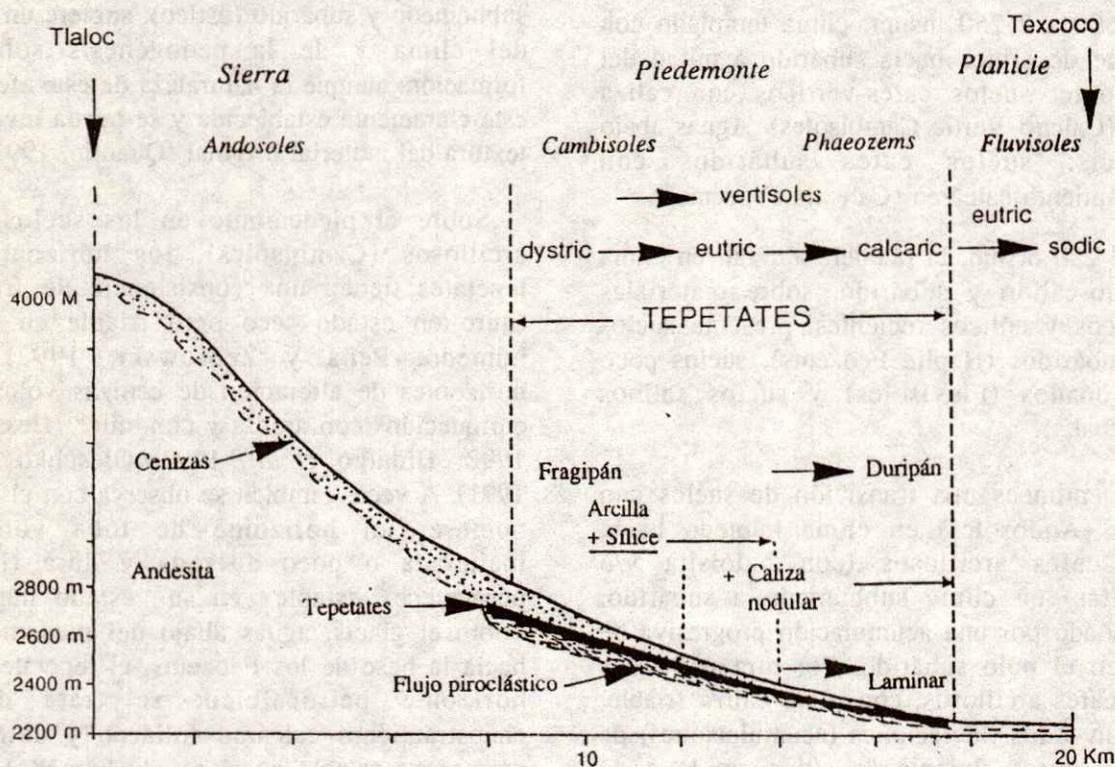


Figura 4. Climotoposecuencia de los suelos.

suelos cafés ándicos a suelos cafés con costra calcárea. Esta secuencia es progresiva.

Un análisis detallado muestra la sucesión siguiente:

-Arriba de los 3 400 msnm: clima perhúmedo y frío, Andosoles negros y desaturados (Umbric Andosoles) de tipo perhidratados melánicos y desaturados-melánicos.

-De 3 400 a 2 800 msnm: clima húmedo y templado frío, Andosoles negros o cafés y saturados de tipos húmicos-melánicos (Eutri-Umbric Andosoles) y saturados crómicos (Mollic Andosoles).

-De 2 800 a 2 600 msnm: clima subhúmedo y templado de transición, suelos cafés ándicos (Andi-Eutric Cambisoles) y suelos cafés-eutróficos (Eutric Cambisoles) o cafés debilmente lavados (Haplic Luvisoles).

-De 2 600 a 2 250 msnm: clima templado con gradiente de aridez hacia subárido a mitad del piedemonte: suelos cafés-vérticos con caliza friable (Calcari-Vertic Cambisoles). Aguas abajo y glacis: suelos cafés subáridos con encostramiento calcáreo (Calcaric Feozems).

-A 2 250 msnm, la planicie aluvial: en clima templado-cálido y subárido, sobre materiales fluvitáticos y eólicos recientes, presenta suelos cafés subáridos (Haplic Feozems), suelos poco evolucionados (Fluvisoles) y suelos salinos (Solonchaks).

Hay entonces una transición de suelos con alófono (Andosoles) en clima húmedo hacia suelos cafés arcillosos (con haloisita y/o esmectitas) en clima subhúmedo a subárido, acompañado por una acumulación progresiva de caliza en el polo subárido. Por otra parte, los suelos cafés arcillosos, con o sin caliza friable, presentan todas las acumulaciones (acumulaciones) de arcilla y eventualmente de sflice, en la parte profunda del suelo. Se observa también una evolución de la naturaleza de las arcillas: en la

parte alta del piedemonte, los suelos son de color café rojizo y la arcilla predominante es haloisita (mineral cercano a la kaolinita) en el conjunto del perfil. Aguas abajo, la parte superior del suelo es gris claro y vértico con predominio de esmectitas (beidelita, montmorillonita, interestratificados) y puede presentar nódulos calcáreos friables mientras que la parte profunda del suelo es café rojiza y con predominio de haloisita.

Esto sugiere que el clima se ha vuelto más árido desde la formación de los últimos depósitos.

5.3. Los tepetates

Los horizontes endurecidos, llamados localmente tepetates están intercalados en los suelos del piedemonte y de glacis. Su localización en el piedemonte debajo de un régimen climático subhúmedo y subárido (ústico), sugiere un efecto del clima y de la pedogénesis sobre su formación, aunque la naturaleza de este efecto no esté claramente establecida y se pueda invocar la textura del material original (Quantin, 1991).

Sobre el piedemonte en los suelos cafés arcillosos (Cambisoles), los horizontes de tepetates tienen una consistencia de fragipán (duro en estado seco pero friable en estado húmedo, Peña y Zebrowski, 1992). Son horizontes de alteración de cenizas volcánicas, enriquecidos con arcilla y con sflice (Hessmann, 1992; Hidalgo *et al.*, 1992; Oleschko *et al.*, 1991). A veces también se observa con el mismo nombre, un horizonte de toba volcánica inalterada o poco alterada y dura (la que permanece estable en su estado húmedo). Sobre el glacis, aguas abajo del piedemonte y hacia la base de los Feozems, el tepetate es un horizonte petrocálcico: se trata de un encostramiento calcáreo foliáceo y duro (que permanece estable en el estado húmedo) de un horizonte de alteración de toba o de brecha volcánica.

5.4. La erosión

La erosión ha removido, a menudo, el suelo superficial hasta dejar al descubierto los horizontes más duros de lava, de toba o de tepetate. En la Sierra, los suelos son poco evolucionados, de erosión lítica (Lithic Leptosoles). Sobre los piedemontes, los suelos de erosión fueron clasificados como tepetates.

Los volcanes aislados en la planicie tienen sobre su cúspide, suelos de erosión mientras que sobre el piedemonte, son suelos cafés con intercalación de tepetates. Además, los piedemontes ubicados al noreste de los volcanes aislados o al norte de la Sierra, se cubrieron a menudo de un suelo café sobre un manto de depósitos eólicos recientes.

6. VEGETACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LOS SUELOS

Se distinguen dos zonas principales: la Sierra, esencialmente forestal, y los piedemontes, mesetas, glaciares y planicies que corresponden a la zona agro-pastoral. La frontera agrícola se ubica entre 2 800 y 2 900 msnm. El límite de esta frontera agrícola es fisiográfica y sobre todo climática, marcando el límite del relieve de montaña y de riesgos de heladas de mucha importancia para el maíz, cultivo básico en México.

6.1. Vegetación

En la Sierra predomina el bosque, hasta aproximadamente los 4 000 msnm. En la parte alta se extiende un pastizal alpino, parecido al páramo andino. La composición del bosque se modifica con la altitud. En el nivel inferior hay una mezcla de robles (*Quercus sp.*), pinos (*P. leophylla*, *montezumae*, *pseudostrobus* o *rudis*), enebros, tejos y lauráceas, mientras que en el nivel superior más húmedo y frío, se encuentran pinos (*P. hartweggi*) y abetos (*A. religiosa*). En los claros entre los 2 800 y 3 100 msnm, se desarrollan también pastizales extensivos o estepas forrajeras cultivadas (avena) o en lo alto de las mesetas, se extienden cultivos de cereales, haba y papa.

6.2. Cultivos

En la zona agrícola, la utilización varía según las formas de relieve. En los llanos: cultivos y praderas intensivas con riego, esencialmente para la crianza de ganado lechero. Sobre los glaciares: cultivos intensivos de temporal o de riego y cultivos de hortalizas y florales. Sobre los piedemontes y planicies: agricultura alimenticia de temporal semi-intensiva raramente irrigada y fruticultura. La mayor parte de las tierras cultivadas fue acomodada en terrazas o en curvas de nivel, a menudo rodeadas de magueyes (*Cactus*), de nopales (*Opuntia*) o de árboles frutales. Las zonas erosionadas y quebradas en donde afloran los tepetates, sirven de sendero itinerante para el ganado.

Los principales cultivos son de cereales: maíz y cebada (el maíz es el cultivo básico), trigo y avena y leguminosas: ejote, haba y ayocote (*Phaseolus coccineus*).

6.3. Recuperación de las áreas erosionadas

Las zonas erosionadas con afloramiento de tepetate están en vías de restauración. Sobre las partes altas y las más quebradas, hay reforestación con pinos y eucaliptos, con trabajos de remodelación (terrazas con pendientes) o de conservación (roturación sobre la línea de plantación, zanjas o cortes oblicuos anti-erosivos). O bien agrícola, con remodelación de los suelos por roturación (ripeno profundo, luego arado y pulverización de los bloques de tepetate) con formación de banquetas con pendiente reducida rodeadas de bordes y zanjas. Nuestro estudio está dedicado especialmente a la experimentación de esos sistemas de recuperación de los tepetates.

III. CARTOGRAFIA DE LOS SUELOS Y TEPETATES

El reconocimiento de los suelos y de los tepetates se acompañó de un levantamiento cartográfico a 1/50 000 en las dos regiones de

este estudio: Valle de México, por el equipo CP-ORSTOM; Valle de Tlaxcala, por el equipo U. Giessen-U.A. Tlaxcala. Sin embargo, los dos responsables, C. Zebrowski y G. Werner se pusieron de acuerdo en lo referente a la caracterización de los materiales originales de los suelos y tepetates de los piedemontes y planicies; se hizo la observación en común de una toposecuencia en el límite de las dos regiones, al norte de la Sierra, así como un perfil de referencia en Tlalpan, Tlaxcala, y se intercambiaron observaciones.

1. MAPA DE LOS SUELOS Y TEPETATE DEL VALLE DE MÉXICO. HOJA DE TEXCOCO

Zebrowski y Peña (1992) levantaron el mapa de la vertiente oeste y norte del complejo volcánico Tláloc-Telapón. La superficie de esta zona es de 1 023 km² (102 314 ha).

Se utilizaron tres métodos en conjunto: (1) el análisis de las formas de relieve y de la cobertura superficial a partir de fotografías aéreas escala 1:25 000; (2) la observación de campo de los suelos, ordenada en cuatro climotoposecuencias; y (3) un estudio estratigráfico detallado de los materiales volcánicos originales. Fueron descritos y muestreados 64 perfiles de suelos. Se analizaron cerca de 300 muestras de referencia; 15 muestras de diferentes tipos de tepetate fueron escogidas para un análisis detallado de sus propiedades físicas y químicas. Pronto se vio que la presencia de horizontes de tepetate en los suelos estaba relacionada a tres factores principales: (1) a su situación en el piedemonte y en el glacis; (2) al clima templado xérico (subhúmedo a subárido); y (3) al material original piroclástico consolidado de tipo toba, con datación de más de 10 000 años (Miehlich, 1984). No se observaron tepetates en formaciones superficiales blandas (cenizas, depósitos eólicos, coluviones, aluviones). Además, los tipos de tepetate son en sí mismos dependientes del tipo de depósito, de su edad y

de su posición en una climotoposecuencia edafológica.

La cartografía tiene una base fisiográfica y edafológica. Por eso, las unidades del mapa son morfoedafológicas. Sin embargo, la leyenda de las unidades de suelos se presenta en la nota explicativa de acuerdo a los tres sistemas de clasificación siguientes: Soil Taxonomy (SMSS, 1990), Leyenda FAO-UNESCO (1985), Clasificación Francesa (CPCS, 1967, 1972; AFES, 1990).

1.1. Leyenda de las unidades cartográficas (unidades de mapeo)

Cinco conjuntos mayores de formas de relieve se distinguen sucesivamente: Sierra, estructuras volcánicas aisladas, piedemonte y glacis, barrancas, valles y llanos aluviales. Están subdivididos en unidades cartográficas.

Cada unidad cartográfica está definida por tres parámetros en el orden siguiente: forma de relieve, características aparentes de los suelos, símbolo de referencia en la unidad-suelo de la leyenda edafológica.

Los tepetates aparecen en el conjunto fisiográfico "Piedemonte y Glacis". Están en la intercalación entre los suelos de las zonas no erosionadas o bien se encuentran en la superficie en las zonas erosionadas. En este último caso, se diferencian tres grados de erosión de acuerdo a la proporción de tepetate que aflora así como del tipo de tepetate (t2, t3, ti).

1.2. Leyenda de los suelos (unidades de suelo)

Se diferencian tres conjuntos principales de suelos:

1º - Suelos "poco evolucionados-líticos", productos de una erosión severa que puede llegar hasta el substrato de roca dura: Litosoles => Leptosoles, Rankers (Regosoles sobre toba blanda).

2° - Suelos "evolucionados sin tepetate", desarrollados profundamente sobre materiales blandos de edad reciente (cenizas volcánicas, loess, aluviones): Andosoles sobre la Sierra, Cambisoles sobre algunos piedemontes, Feozems y Fluvisoles en la llanura.

3° - Suelos "evolucionados con tepetate", desarrollados sobre depósitos complejos y estratificados de materiales de origen piroclástico que contienen capas endurecidas. Esos materiales endurecidos se clasifican de acuerdo a tres series de depósitos: T2, T3 y Ti (indiferenciado) así como de acuerdo a la presencia de caliza formado en el suelo: sin caliza, con un poco de caliza y friable, con mucho caliza y duro. Los dos primeros son los fragipanes y el tercero es un horizonte petrocálcico.

Los suelos se clasifican de acuerdo con las características edafológicas predominantes en su parte superior ándico, vértico, lúvico, eútrico, etc.

La importancia de los tepetates está subrayada según como les haga aparecer el efecto de la erosión: profundos, poco profundos o aflorantes y de si se trata de fragipanes, de horizontes duros o petrocálcicos. Además, hay una unidad particular de tepetates reincorporados a la agricultura.

Esta cartografía permite evaluar las superficies de tepetate desnudo y estéril, de tepetate ya reincorporado a la agricultura así como de suelos con tepetate susceptible de sufrir desertificación por erosión. Hay 41 968 ha de suelos con tepetate lo que representa 41% de la superficie total de los cuales 14 216 ha ± erosión presentan tepetates al desnudo (13.9% de superficie total o 33.1% de los suelos con tepetate). De estas superficies erosionadas, 4 077 ha están reforestadas (28.7% de los tepetates desnudos) y 833 ha se han vuelto a cultivar en bancales, de los cuales 423 ha con rehabilitación de un suelo (roturación) o sean 5.8 y 3% de los tepetates desnudos, respectivamente.

Una imagen SPOT de esta región adquirida especialmente para nuestro estudio, fue reproducida recientemente en colores falsos a escala del mapa. Esto permitió controlar el mapa morfoedafológico y hacer resaltar los lineamientos estructurales (alineamientos de fallas y de volcanes). Su análisis detallado podría permitir la extrapolación de la cartografía de los suelos y de la erosión de los tepetates hacia las regiones vecinas.

2. MAPA DE LOS SUELOS Y TEPETATES DEL VALLE DE TLAXCALA, HOJA DE APAN

Se trata de un complemento al mapa de los suelos del estado de Tlaxcala al 1:100 000, publicado por G. Werner (1988). Apan se sitúa al noroeste de Tlaxcala y al noreste del aparato volcánico Tláloc-Telapón. Este mapa se hizo a escala 1:50 000 por G. Werner en 1991-92 (mapa y nota explicativa anexa). La superficie cubierta es de 700 km².

La leyenda del mapa es edafológica. Se utiliza la versión de 1975 del sistema de la FAO para no modificar el texto publicado en 1978. Es lamentable que no se proponga la leyenda revisada de 1985, ni equivalencias con la taxonomía americana de suelos ni el sistema francés para poder compararlo con el mapa de Texcoco.

Los tepetates aparecen entre los Cambisoles con horizontes de fragipán. El autor, luego de nuevas observaciones ya no los considera a los tepetates como duripanes. Sin embargo, los tepetates con encostramiento calcáreo laminario duro son horizonte petrocálcicos, y no fragipanes. Sería útil hacer una armonización de los textos de mapa y de suelos, por lo menos en la nota explicativa de Apan.

IV. CARACTERIZACION DE LOS SUELOS Y TEPETATES

Este estudio trata sucesivamente de los materiales originales, la clasificación de los tipos

de tepetate, las características de los fragipanes, su génesis y su cementación, sus propiedades (mecánicas, hidrodinámicas) y de los factores físicos y químicos que condicionan su fertilidad.

Es producto de las contribuciones de los miembros participantes en el programa. Las referencias y datos deben buscarse en los resúmenes elaborados y en las Actas del Simposio sobre Suelos Volcánicos Endurecidos (Terra, 10 (Número Especial), 1992), así como en los reportes de J. Etchevers, D. Peña y C. Zebrowski, K. Oleschko, R. Hessmann y G. Werner, escritos especialmente para el informe final del proyecto a la Comunidad Económica Europea así como en la monografía de DEA¹ de C. Hidalgo (1991).

1. MATERIALES ORIGINALES DE LOS SUELOS Y TEPETATES.

Los tepetates del piedemonte de la Sierra y de las planicies de Tlaxcala están interestratificados en una sucesión de depósitos volcano-sedimentarios y de paleosuelos. Esos depósitos se denominaron tobas (Heine y Schönhals, 1973; Miehllich, 1984; Werner, 1988).

1.1. Esquema estratigráfico

Un corte completo del piedemonte occidental de la Sierra cercana a Texcoco o perfil 30 (P30, cf. Hidalgo, 1991) muestra por lo menos cinco series de depósitos de arriba hacia abajo (Figura 5):

-H: depósito areno-limoso, eólico-coluviol, con fragmentos de alfarerías y obsidias; depósito reciente que formó el suelo humífero actual.

-T1: suelo vértico de color oscuro; depósito de cenizas volcánicas del Holoceno Inferior.

-T2: conjunto de 5 a 6 horizontes, de color gris claro o blanuzco, parecido a la toba 2T de

Miehllich (1984) y de edad entre 10 000 y 20 000 años BP.

-T3: conjunto de 3 a 4 horizontes, de color café rojizo, parecido a la toba 3T de Miehllich (1984) de edad entre 20 y 35 000 años BP.

-T4: un paleosuelo café rojizo y una alterita de brecha o toba gruesa proveniente de la pómez.

El conjunto T1 puede tener un depósito eólico de limo arenoso análogo a la serie 1T de Miehllich (1984). Este depósito se encuentra únicamente en el norte del Valle de México sobre los piedemontes con orientación N-NE de la Sierra Nevada y de los volcanes aislados.

El conjunto T2 presenta en realidad dos series de depósitos constituidos alternativamente de un paleosuelo vértico y de un tepetate. T2a: paleosuelo vértico sobre tepetate "t2a"; T2b: paleovertisol sobre tepetate "t2b". Lateralmente aparece, a menudo bajo t2a y t2b o intercalado, un banco de toba proveniente de piedra pómez blanca casi inalterada (llamada también tepetate). Así mismo, se distinguió (luego de análisis detallado) en T3 dos series de depósitos T3a y T3b. Este último depósito contiene un paleosuelo café (café-eutrofo tropical) sobre un tepetate "t3". Hay que tomar nota de una discrepancia estratigráfica entre las series T2 y T3 que marca una superficie de erosión.

Se nota en cada serie de depósitos que casi siempre, un paleosuelo recubre un material endurecido y parcialmente alterado con consistencia de toba, llamado tepetate. A veces se intercala localmente una verdadera toba poco alterada. Esta sucesión excepto en caso de erosión, ocurre en ambos lados de la Sierra y sobre las planicies de Tlaxcala, particularmente en Tlalpan. En este último sitio, hay además en la profundidad, otras cuatro series de depósitos parecidas a las de la serie T3 hasta llegar al sustrato antiguo de lava (Hessmann, 1992).

Los tepetates t2a, t2b y t3 tienen rastros edafológicos de horizonte de alteración y un

¹ DEA: Diploma de Estudios en Profundidad. Diploma Universitario francés que se obtiene 7 años del bachillerato.

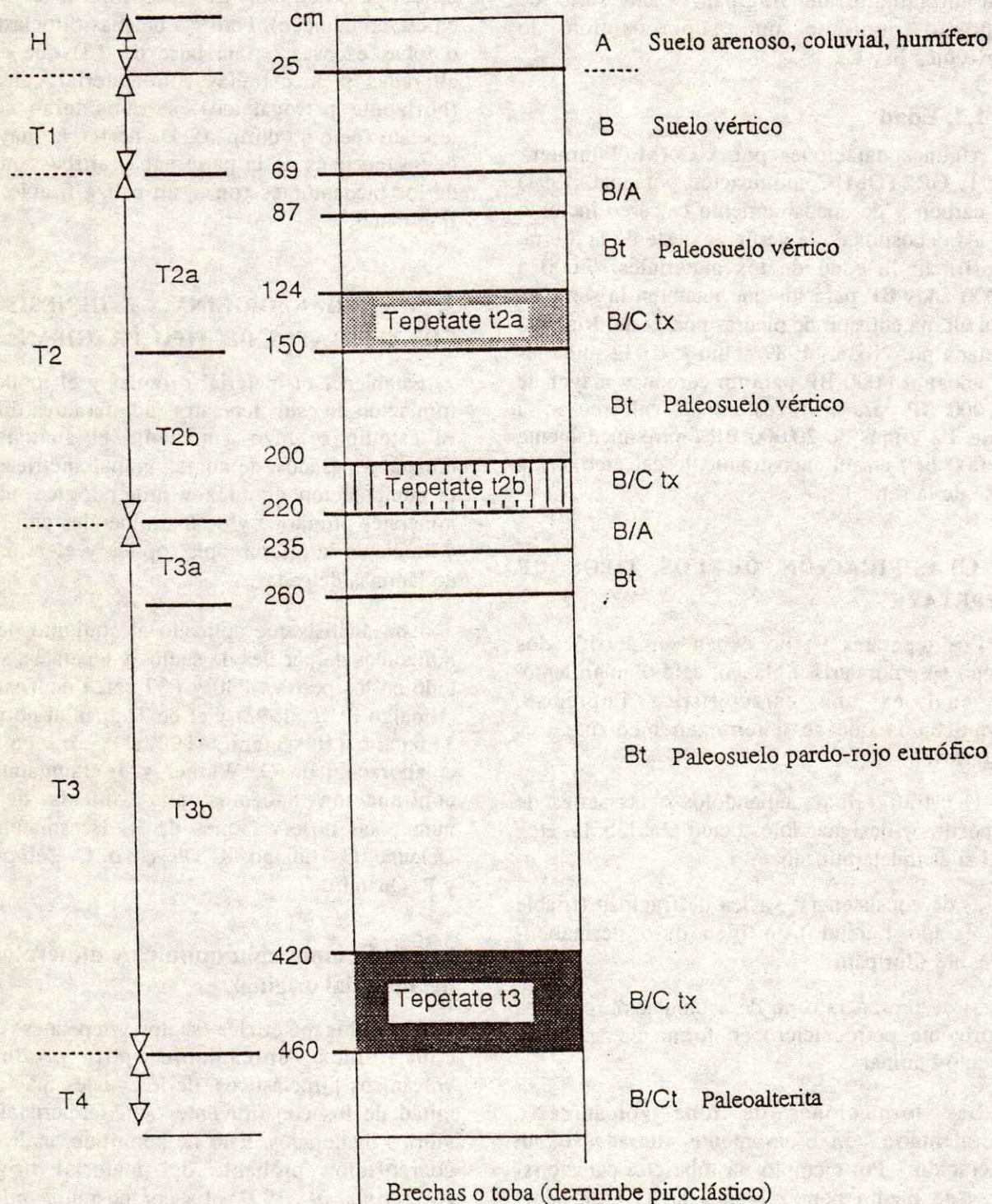


Figura 5. Estratigrafía de los depósitos piroclásticos, suelos y tepetates.

comportamiento de fragipán. Cada serie de depósito contiene una superposición de horizontes B y Cx.

1.2. Edad

Algunas dataciones por ^{14}C (M. Fournier, 1991; ORSTOM Comunicación personal, 1991) de carbón y de encostramiento calcáreo incluido en los depósitos de la vertiente oeste de la Sierra, confirman la edad de los materiales: 7 000 a 8 000 años BP para los que recubren la serie T2 y la última emisión de piedras pómez del Río Frío (datada por Nixon, 1989 como < 0.012 millones de años); 13 000 BP para un carbón y mayor de 10 000 BP para un revestimiento calcáreo en la serie T2 y más de 20 000 BP (aproximadamente 22 000 BP) en un encostramiento calcáreo, en la base de la serie T3.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE TEPETATE

Los tepetates ya no deben ser clasificados según su color: gris o blanco, café o amarillento, lo cual es una característica imprecisa. Proponemos que se determinen mediante tres criterios:

1) estratigráfico: aunándolos a las series de depósitos y designándolos como t2a, t2b, t3, etc., o si es indeterminado.

2) de consistencia: ya sea de fragipán (friable en estado húmedo), o bien duro permanentemente (duripán).

3) de presencia o no de acumulación calcárea (horizonte petrocálcico) en forma de encostramiento laminar.

Las formaciones de toba volcánica o sedimentaria con escasamente alteradas o sin alteración. Por ejemplo, la toba con características de piedra pómez blanca en la base de la serie T2, no debe confundirse con un tepetate que es un horizonte modificado por la pedogénesis; esta toba no puede ser asimilada a

un duripán (horizonte de suelo silicificado, duro en estado húmedo). Pero las brechas piroclásticas o tobas espesas (en la base de T3) que están alteradas y encostradas con material calcáreo (horizonte petrocálcico), se consideran como tepetate (pero no duripán). De hecho, la mayoría de los tepetates de la parte aguas arriba y media de los piedemontes con o sin caliza friable, son fragipanes.

3. MATERIAL ORIGINAL Y GÉNESIS DE LOS TEPETATES DE TIPO FRAGIPÁN

Establecer el material original y el modo de formación de estos tepetates fue una tarea difícil. El estudio se hizo mediante el análisis de minerales pesados, de curvas granulométricas, de la composición química y mineralógica de los minerales primarios y de los minerales arcillosos y mediante la microscopía (óptica y electrónica) de láminas delgadas.

Este análisis fue aplicado al conjunto de los horizontes de perfiles de suelos y tepetates, sobre todo en los perfiles P30 y P37 cerca de Texcoco (Hidalgo *et al.*, 1992) y el de Tlalpan al norte de Tlaxcala (Hessmann, 1992a y b, con la colaboración de G. Werner y J. Baumann). A continuación hacemos una síntesis de las numerosas observaciones de R. Hessmann, M. Delaune, C. Hidalgo, K. Oleschko, C. Zebrowski y P. Quantin.

3.1. Composición química y mineralógica del material original

Todos los materiales (suelos y tepetates) están constituidos únicamente por productos volcánicos piroclásticos, de los cuales más de la mitad de los constituyentes son fenocristales y vidrios inalterados. Esto ha permitido analizar la composición probable del material original (Quantin *et al.*, 1992). La composición química (Cuadro 1) de los materiales inalterados de las series T2 y T3 es semejante a la de las riolitas alcalinas sódicas, mientras que la de los depósitos

Cuadro 1. Composición química de los tepetates pertenecientes a las series T1, T2 y T3.

Serie	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂	K ₂ O
H-T1	67-69	16-15	2.7-2.2	2.6-1.9	5.3-4.7	4.5-4.7	1.9-1.0
T2	78-70	12-16	0.6-1.2	0.4-0.8	3.0-5.1	3.6-5.8	2.3-0.8
T3	78-73	12-15	1.0-1.3	0.6-0.9	3.4-4.7	3.5-4.4	1.8-0.9

superficiales (H, T1) es más básica y semejante a la de las dacitas (riodacitas alcalinas). Cada serie muestra una evolución del material más básico y sódico abajo, al más silíceo y potásico arriba. Se trata entonces de series magmáticas.

La característica constante de esos materiales es que son ricos en sílice y en sodio, lo que es importante para la formación de los tepetates. En cada serie de depósitos, se nota además que los horizontes de tepetate contienen un poco más de producto inalterado (insoluble en "triácido") que el horizonte B de suelo sobreyacente.

Los materiales riolíticos y riodacíticos eran en su origen ricos en vidrios alcalino-sódicos, de los cuales una gran parte fue alterada en minerales arcillosos y silíceos (ópalo-cristobalita). Sus fenocristales residuales contienen: plagioclasa del polo sódico (albita-andesina), feldespatos potásicos y sódicos (anortosa, sanidina), cuarzo, hornblenda, hiperstena, titano-magnetito. De los cuales predominan las plagioclasas, el cuarzo y la hornblenda. El análisis de los minerales pesados muestran dos conjuntos principales.

H-T1-T2a: Hornblenda < 80%, Hiperstena 20-40%, Augita 4-12%

T2b-T3: Hornblenda > 80%, Hiperstena < 10%, Augita < 4%

Se observa un aumento de los piroxenos en las formaciones más recientes, testigos de aportaciones de cenizas del Popocatepetl. El predominio (por lo menos 90%) de la hornblenda caracterizada al tepetate t3.

Los materiales de las series T2 y T3 tienen una composición química y mineralógica parecida a la de las piedras pómez riolíticas de Río Frío y a la de las dacitas del Papayo, que son

erupciones recientes entre el Iztaccihuatl y el conjunto Tláloc-Telapón (Nixon, 1989). Allí podría estar la fuente de esos materiales y de las primeras peleanas dacíticas del Popocatepetl (Boudal y Robin, 1988), mientras que los depósitos H y T1 provienen de las últimas peleanas dacíticas del Popocatepetl. Según Boudal y Robin (1988), los vidrios de esas peleanas son riolíticos-alcalinos-sódicos y esos productos serían una mezcla del magma riolítico y basáltico (luego de una nueva elevación del basalto en la cámara magmática).

3.2. Granulometría y sedimentología

En el depósito Holoceno H (P30-1) la distribución del tamaño de las partículas es bimodal (Figura 6) predominan las fracciones arena fina (63-200 μm) y arcilla (<2 μm). Esta curva es comparable a la de cenizas del Popocatepetl alteradas en el suelo (Figura 7a). Miehl (1991) interpreta este hecho como el efecto de una alteración y no como una clasificación debido al transporte aéreo. También muestra (Figura 7b) que este efecto es observable en la secuencia de las "tobas" 1T, 2T, 3T. Esto se traduce por un aumento de la fracción arcilla a expensas de las arenas finas. Observamos una evolución parecida de H hacia T1, T2 y T3. Hay en efecto tres modos: arena fina, limo fino (6-20 μm) y arcilla. El limo fino se desarrolla mediante fragmentación de las arenas; la arcilla es el producto de la alteración de los vidrios.

En esta distribución no aparece el limo grueso (20-63 μm) que habitualmente caracteriza a un loess (Pye, 1987). Estos depósitos son, por lo tanto, cenizas volcánicas redepositadas y no loess.

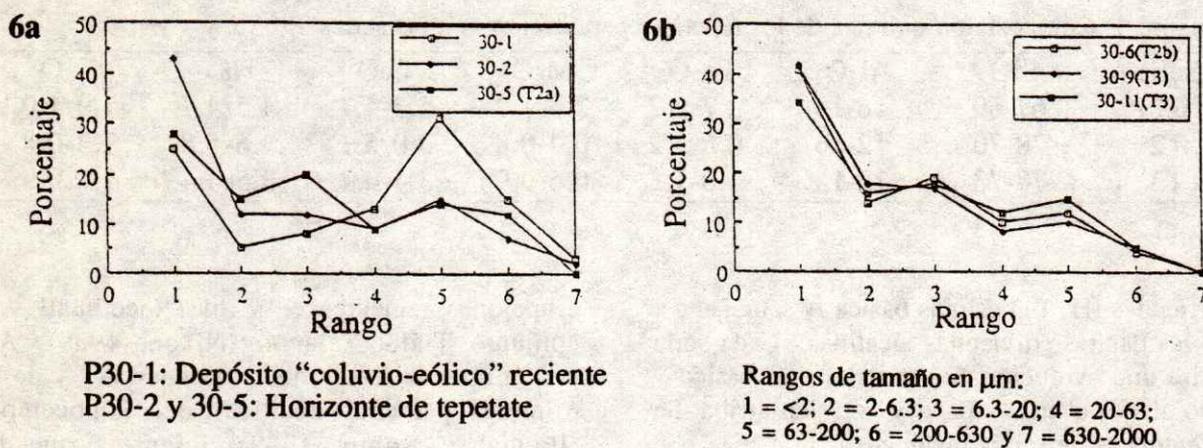


Figura 6. Distribución por tamaño de partículas de un suelo con tepetate (P.30, Texcoco).

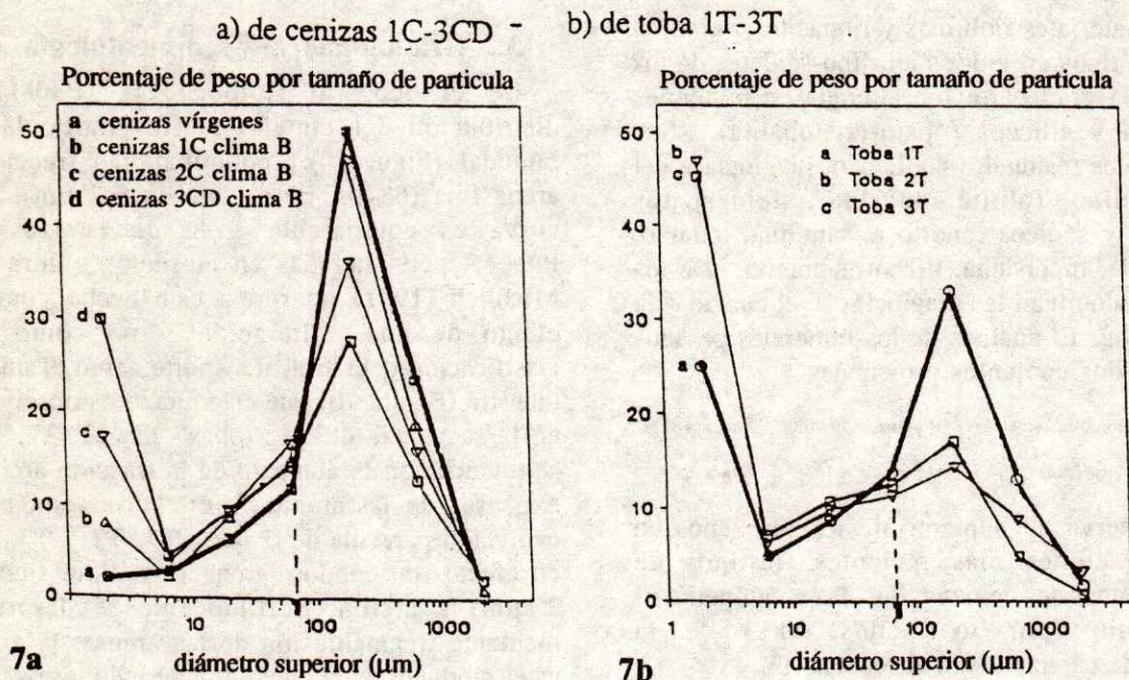


Figura 7. Distribución por tamaño de partículas de cenizas y de toba (Miehlich, 1991).

Además, en cada serie de depósito, el horizonte B del suelo presenta un poco más de arcilla y menos arenas que el tepetate subyacente; éste es menos alterado y se considera como horizonte C.

3.3. Materiales de alteración: arcillas, sílice, caliza, óxidos de hierro

En los perfiles de la parte media de los piedemontes (P30 - Tlalpan), se observa una sucesión en la composición de las arcillas:

- en H y T1: arcillas mal cristalizadas y un poco de haloisita
- en T2a: un interstratificado con esmectita y haloisita,
- en T2b: 80% de esmectita bien cristalizada y 20% de haloisita,
- en T3a: 80% de haloisita y 20% de esmectita mal cristalizada,
- en T3b: 90% de haloisita y un poco de interstratificado indeterminado.

Una pequeña cantidad de mineral silíceo, la cristobalita, está presente en la serie T2 y aumenta en la base de la serie T3. La calcita está presente solamente y localmente (nódulos, filamentos) en la serie T2b que tiene caracteres de vertisol. Óxidos de hierro y manganeso mal cristalizados revisten las arcillas en la serie T3 o se concentran en nódulos o revestimientos en la base de T3. Se puede notar que la composición de las arcillas es la misma en el horizonte B de suelo y en el tepetate en cada serie de depósitos.

En los perfiles de la parte alta de los piedemontes (P37) en clima más húmedo, predomina la haloisita en el conjunto de las series T2 y T3. No obstante, la cristobalita está presente en la mayor parte del perfil. Los óxidos de hierro están mal cristalizados. No hay formación de calcita.

La composición química global del producto de alteración pone en evidencia un exceso de sílice en comparación con la composición aparente de arcillas, sobre todo en la serie T3 y en el tepetate t3, en la base del perfil P30. Este exceso es menor en la serie T2b con carácter de

vertisol. Sin embargo, es aún mucho mayor en todo el perfil P37, ubicado aguas más arriba del P30. Este exceso corresponde con la presencia en cantidad significativa de sílice libre (cristobalita, ópalo) así mismo que con la interstratificación de esmectita en el mineral haloistítico. Es entonces probable que los productos de alteración, cualquiera sea el tipo de arcilla formada, hayan sufrido una silicificación.

3.4. Micromorfología: rasgos del material y rasgos edafológicos

La observación microscópica de las láminas delgadas de los diversos horizontes de las series T2 y T3 muestra rasgos heredados del material original y otros consecuentes de la pedogénesis.

a. Rasgos heredados del material

a.1. El "esqueleto"

El "esqueleto" arenoso está formado de fragmentos angulosos de fenocristales, de vidrios, de lapilli de lava y pómez. Su distribución no clasificada llamada porfírica, indica un depósito aéreo de cenizas o de peleanas más que un proceso de redistribución a través del viento o del agua. No hay o hay escasas capas que indiquen un proceso sedimentario clásico. En los horizontes de las series T2a y T2b, los cristales de cuarzo permanecen límpidos, sin rastros de desgaste por el viento o el agua; algunos fenocristales quedan rodeados de su ganga vidriosa. En la base de la serie T3, algunos cristales aunque angulosos, tienen caras ligeramente esmeriladas; se trata de una corrosión química y normal en los suelos tropicales. En este nivel, los lapilli están alterados y los vidrios son más escasos y en su mayoría alterados.

a.2. La matriz.

La matriz de los horizontes de tepetate t2a y t3 aparece masiva y poco fragmentada, tal como es el caso de una alteración sin modificación estructural de una toba o de una cinerita (toba

fina, de ceniza fina consolidada por un cementante). Un corte en el tepetate t2a de color gris claro, muestra de abajo hacia arriba la transición de una estructura masiva con una estructura dividida por fisuras planares verticales (efecto de retracción) y penetrada cada vez más por tubos biológicos en la zona de contacto con el subsuelo sobreyacente. El tepetate t2a con una alteración parcial a arcilla, es entonces un horizonte C. El tepetate t3 de color café, muestra una estructura similar, masiva, finamente recortada de fisuras verticales y perforada por tubos biológicos. Esta estructura parece ser heredada de la toba inicial y solamente "recortada" por la pedogénesis. Sin embargo, la matriz café rojiza y "punteada" poco birrefringente, manifiesta una alteración *in situ* a arcilla y una redistribución del hierro ligada a la pedogénesis pero con poca redistribución plásmica, como es el caso de un horizonte C de un suelo fersialítico tropical con la estructura conservada del material parental.

Por lo contrario, el tepetate t2b de color gris claro, muestra una fragmentación poliédrica gruesa de la matriz y una reorganización plásmica reticular que es característica de un vertisol. Este horizonte friable no debería llamarse tepetate.

Según Hessmann (1992), en cada serie de depósito la parte de la matriz es más importante en el horizonte B de suelo que en el tepetate; evidentemente, pasa lo contrario en cuanto al esqueleto. Así, en Tlalpan, en la serie T2a, la matriz ocupa el 78% del volumen del horizonte B y únicamente el 59% en el tepetate t2a; en la serie T3, 72% en B y 65% en el tepetate t3.

b. Rasgos edafológicos

Los horizontes de paleosuelo y de tepetate de cada serie de depósito abundan en rasgos edafológicos, signos de una transformación del material original durante la formación del suelo.

b.1. Fisuras

La matriz está fragmentada sobre todo en los horizontes B, en fisuras debidas al proceso

estacional de expansión-retracción. Se organiza en agregados gruesos prismáticos o poliédricos: hay reorganización plásmica de las arcillas y óxidos de hierro (birrefringencia, estriación, puntuación). Este proceso está bien claro en los horizontes vérticos, es menor en los horizontes cámbicos y muy atenuado en los tepetates típicos (t2a y t3).

b.2. Actividad biológica

La actividad biológica es bien marcada por la presencia de vacíos biológicos (tubos de raíces y cavidades) rellenos por bolitas fecales de artrópodos, restos de raíces, fitolitos silicificados. En los tepetates t2a y t3, los tubos biológicos cortan la estructura masiva del material.

b.3. Redistribución de materia

Una redistribución de materia está siempre presente en forma de revestimientos en los vacíos o de nódulos en la matriz:

- revestimientos de arcilla en los vacíos biológicos y en las fisuras, bajo la forma de un relleno de argilanes amarillo límpido en las cavidades o de un depósito orientado de argilanes micro-laminados sobre las paredes del vacío, marcas de iluviación periódica. Esos revestimientos laminados de arcilla están a menudo cubiertos por óxidos de hierro y manganeso en los horizontes café rojizo o a veces intercalados por depósitos de limo,

- redistribución de los óxidos de hierro y de manganeso en la matriz en nódulos difusos o punteados en los horizontes de la serie T3,

- concentraciones esparcidas de calcita en los horizontes vérticos de la serie T2b, en nódulos friables de micrita en la matriz o en filamentos (*mycelium*) en los espacios vacíos,

- silicificaciones presentes en la mayoría de los horizontes, sobre todo en las series T2a y T3 pero difíciles de evidenciar, ya que están íntimamente asociadas a los depósitos de arcilla. En los vacíos, su formación es edáfica, mientras que en la matriz podría ser también anterior a la pedogénesis.

3.5 Naturaleza y génesis del cementante

a. Localización

Los revestimientos y rellenos de los vacíos, esencialmente por arcilla acompañada de sílice y de óxidos de hierro y manganeso, no son particulares de los tepetates. Sin embargo, Hessmann (1992) observó que el relleno de los macroporos está siempre un poco más desarrollado en los horizontes de tepetate t2a y t3, que en los horizontes B sobre-yacentes. Por ejemplo en el perfil de Tlalpan, se observó 25% de relleno en el horizonte B y 54% en el tepetate de la serie T2a; 47% de relleno en el horizonte B y 62% en el tepetate de la serie T3. Este hecho fue confirmado por Oleschko (1992). Por esta razón, la conductividad hidráulica en los tepetates es reducida, provocando una acumulación de materia. Esto es confirmado por una disminución de la macroporosidad y de la conductividad y un ligero aumento de la densidad aparente con respecto al horizonte B de suelo sobreyacente (Werner, 1992; Oleschko, 1992).

b. Naturaleza del cementante

La naturaleza del cementante es aún controvertida. Los revestimientos arcillosos probablemente no son (a pesar de su abundancia) el cementante de los tepetates de tipo fragipán, puesto que la arcilla es plástica y expansible. Estos revestimientos favorecen la acumulación de otros materiales sobre todo de sílice y de óxidos de hierro, cuyo endurecimiento luego de la deshidratación provoca una cementación (Flach *et al.*, 1992). El papel de la sílice en los duripanes es conocido (Soil Taxonomy, 1975); la presencia de gel de sílice podría explicar el comportamiento de fragipán de los tepetates. Por eso, hicimos un análisis detallado de las formas y localización de la sílice en los horizontes sobrepuestos de suelo y en los tepetates.

c. Formas y localización de sílice libre

La existencia de sílice libre se manifestó al comparar las composiciones química y minera-

lógica del producto global de alteración, en particular bajo la forma de cristobalita.

c.1. Microscopía óptica con contraste de fase

La microscopía óptica de contraste de fase (Hessmann, 1992) muestra ópalo y una localización en revestimiento e intercalación entre los argilanes microlaminados de los vacíos biológicos o alrededor de algunos minerales del esqueleto, de lapilli de lava en la matriz y de fitolitos de ópalo.

c.2. Microscopía electrónica con exploración y microanálisis químico

La microscopía electrónica de barrido y el microanálisis químico *in situ* de láminas delgadas (Hessmann, 1992; Hidalgo 1991; Oleschko, 1992) confirmó la existencia de esas concentraciones de sílice:

* en las fisuras y los vacíos biológicos, sobre todo entre las laminillas de argilanes microlaminados, donde es más abundante hacia el centro del vacío, por lo que se considera producto de la pedogénesis.

* en la matriz, con excepción de algunas películas de sílice alrededor de los granos del esqueleto (plagioclasas, lapilli), la concentración de sílice es difusa, íntimamente mezclada con la arcilla y con las partículas finas de vidrio alterado.

El plasma matricial de los horizontes B y C (tepetate) de las series T2a y T3, es más silicoso y rico en cationes básicos que los argilanes presentes como revestimientos en los vacíos. Es una mezcla de arcilla y de sílice con vidrios alterados. No se logró determinar si ese producto se debe únicamente a la pedogénesis o si se produjo durante una primera alteración hidromagmática en el momento de ocurrir del depósito volcánico con posterior alteración pedogénica.

Por lo contrario, en los horizontes del suelo vértico de la serie T2b, no hay diferencia significativa entre la composición de la matriz y de los argilanes, la que es cercana a la de la arcilla (esmectita), o sea poco o no silicificada.

Por otra parte, se puede ver que las silicificaciones son más evidentes en la base de la serie T3, en donde las características del tepetate (t3) son las más marcadas pero no son más claras en el tepetate que en el horizonte B del suelo sobreyacente.

c.3. El análisis químico selectivo por disolución secuencial

El análisis químico selectivo por disolución secuencial (mediante NaOH 0.5 N) de las formas de la sílice muestra que, no hay alofano (o a lo máximo, solamente indicios) pero siempre hay una cantidad notable de sílice libre (no ligada al aluminio de las arcillas). Una pequeña parte (0.3 a 0.5% del suelo) se encuentra bajo la forma de gel muy soluble, mientras que la mayor parte (1 a 2% del suelo) es un producto más estable, compuesto probablemente de ópalo. Este producto más estable, es más abundante en el tepetate t3 que en el horizonte B de suelo sobreyacente, lo cual es, probablemente, un signo de la induración del tepetate.

Una estimación de la sílice libre (gel, ópalo, cristobalita) probable se hizo mediante un análisis químico global del producto de alteración (extracto triácido) y una aproximación de la composición de los minerales arcillosos. El porcentaje de sílice sería de 5 a 10% en los horizontes de la serie T2a, menos de 5% en T2b y de 10 a 20% en la serie T3 de los cuales 15 a 20% están en el tepetate t3.

c.4 Origen de la sílice

El origen de la sílice debe buscarse en la alteración de los vidrios riolíticos sódicos. En la presencia de sodio, la disolución de sílice es muy intensa, suministrando soluciones ricas en ese elemento. En soluciones medianamente concentradas, la sílice contribuye a la formación de arcillas. Pero en solución concentradas, precipita

en forma de gel, volviendo a cristalizarse en ópalo o en cristobalita. La formación pudo haberse producido al momento del depósito ya sea mediante un proceso de alteración hidromagmática de los vidrios en cristobalita y/o posteriormente por hidrólisis durante la pedogénesis. En el último caso, es dependiente del régimen de drenaje: un régimen ustic favorece sucesivamente la disolución de la sílice y la formación de arcilla y luego, su concentración y su precipitación bajo la forma de geles de sílice. Después, la fuerte deshidratación lleva a la cristalización en la forma más estable ópalo. La formación de fitolitos, organismos vegetales silicificados, contribuye también al almacenamiento y luego al suministro adicional de sílice.

3.6. Génesis del tepetate

El origen del tepetate sigue siendo controvertido en cuanto a su modo de formación y a su proceso de cementación.

a. Modo de depósito del material original

Es aceptado por todos que el proceso de formación de tepetates se inicia con erupciones de cenizas volcánicas. Para algunos, las cenizas fueron redistribuidas por el viento a la manera de un loess (Heine y Schönhals, 1973; Miehlich, 1984; Hessmann, 1992a; Oleschko, 1992). Sus argumentos están basados en tres características principales de los tepetates: distribución granulométrica bimodal, esqueleto mineral en forma de fragmentos angulosos, fitolitos silicosos en el conjunto del material. Sin embargo, hemos visto que este material no contiene una forma bien desarrollada del limo grueso que caracteriza a los loess y que su distribución bimodal en arena y arcilla se debe a una alteración meteórica en el suelo. El esqueleto mineral quebrado en fragmentos angulosos es característico de los productos piroclásticos. Además, siempre se encuentran fitolitos silicosos en los suelos jóvenes de cenizas volcánicas (Andosoles), tanto en clima húmedo con bosque denso como en clima xérico

con pradera (Quantin, 1991). No hay rasgos sedimentarios evidentes, salvo en casos particulares. Por eso, se trata muy probablemente de depósitos de proyecciones de cenizas volcánicas finas que no fueron (o fueron escasamente) transportadas por el viento o por el agua, luego de haber sido depositadas.

b. Proceso de cementación

La consolidación del material original, ¿es anterior o es consecuencia de la pedogénesis? En los tepetates típicos (t2a y t3), la abundancia de rastros edáficos, de acumulación de arcilla, de óxidos de hierro y de sílice, correlacionada con un régimen climático ustic, favorece la idea de la pedogénesis. Sin embargo, esos rasgos se observan tanto en el horizonte B del suelo como en el tepetate; por lo tanto, no son suficientes para explicar la característica masiva y consolidada de este último.

El tepetate conserva en parte, la estructura, masiva de una toba fina: siempre está menos fragmentado y menos alterado que el suelo sobreyacente, aunque deriva de la misma serie, piroclástica: es un horizonte C en un material consolidado. Hay siempre una pareja: horizonte B de suelo blando sobre horizonte C de tepetate. La consolidación probablemente no es una consecuencia de la pedogénesis. Por el contrario, lo compacto de la toba original redujo la velocidad de alteración y provocó acumulaciones de arcilla, sílice y óxidos de hierro y hasta de caliza ya que se trata de las series de la parte baja de la climotoposecuencia. Una pedogénesis en un régimen climático ustic favorece las acumulaciones de materia y refuerza así la consolidación de la toba original. La sílice y los

óxidos de hierro que recubren las arcillas contribuyen después de una deshidratación, al endurecimiento de esos materiales.

Para explicar esta alternancia de un material consolidado y de un material blando, pensamos que las series de depósitos piroclásticos provienen de erupciones freato-plinianas. Estas presentan sucesivamente un depósito de flujos (*base-surge*) y depósitos de cenizas finas (Fisher y Schminck, 1984). Estos depósitos habrían sido consolidados poco después de su deposición, mediante una alteración hidromagmática de las partículas finas de vidrio que constituyen la matriz.

4. PROPIEDADES DE LOS TEPETATES DE REFERENCIA

Las propiedades de algunos tepetates empleados como referencia en este estudio fueron analizadas para servir de base en los estudios experimentales. Dieciocho muestras de seis tipos de tepetates fueron seleccionadas por Peña y Zebrowski (1992), en función de su clasificación de las series T2, T3 o Ti (indeterminada) y de su contenido calcáreo (Cuadro 2).

Los resultados de dicho estudio están publicados en las Actas del Simposio Suelos Volcánicos Endurecidos (Terra 10 (Nº Especial), 1992) por Peña y Zebrowski; Arias y Miranda; Etchevers y Etchevers *et al.* Estos datos se complementan con otros estudios de tepetates de los tipos t2 y t3 poco o no calcáreos del Valle de México (Hidalgo, 1992; Hidalgo *et al.*, 1992) y de Tlaxcala (Werner, 1992).

Cuadro 2. Contenido calcáreo de las muestras de tepetates t2, t3 y ti seleccionadas como referencias.

Tepetate	0,2 % CaCO ₃	2-3 % CaCO ₃ friable	5 -15% CaCO ₃ duro
t2	3 muestras	sin	1 muestra
t3	5 muestras	1 muestra	1 muestra
ti	sin	sin	1 muestra

4.1. Propiedades físicas

a. Color, minerales arcillosos y presencia de caliza

- Serie T2: colores: gris a café claro; arcillas: esmectitas, interestratificadas y ópalo.
- Serie T3: colores: café a café rojizo; arcillas: haloisita; óxidos de hierro y ópalo.

La distinción anterior entre tepetates de las series T2 o T3 es justificada. Pero la presencia de material calcáreo no es particular de ninguna de las series. Este material también aparece en tobas gruesas o brechas de otras series volcánicas anteriores. Con frecuencia no es evidente en los tepetates t2 ó t3, aunque el análisis químico revela trazas (1 a 2 %) y que se localiza bajo formas friables (revestimientos, nódulos). La distinción de los tepetates no calcáreos o moderadamente calcáreos, como vamos a verlo, no está justificada por propiedades físicas o químicas bien diferenciadas. Sin embargo, los tepetates con encostramiento calcáreo duro tienen un comportamiento muy particular.

b. Estructura

Todos los tepetates moderadamente o no calcáreos, tienen una estructura masiva, débilmente fragmentada por grietas de retracción en forma de red prismática o poliédrica gruesa. Los tepetates encostrados con caliza dura, tienen a menudo una estructura laminar de revestimientos calcáreos.

c. Textura

Los resultados del análisis granulométrico no son homogéneos en cada serie. Difieren según el método utilizado (Bouyoucos en el C.P.M., Sedigraph en el ORSTOM) o según el endurecimiento de los materiales. Es así que la granulometría de los tepetates encostrados por caliza revela tener poca arcilla, cuando sus propiedades de retención de agua y de intercambio catiónico son similares a los de los demás tepetates.

Todos los tepetates poco o no calcáreos contienen por lo menos 25% de arcilla (< 2 μ m) y el contenido en arcilla puede variar de 25 a 54% (Cuadro 3). Pero no hay una textura específica de las series T2 o T3: cada una presenta dos grupos de textura (1 y 2).

d. Dureza, resistencia

Se hicieron mediciones del comportamiento de los tepetates en estado seco al aire y a diferentes grados de humedad (saturación, capacidad en el campo, punto de marchitez). Se trata de la dureza de la superficie (penetrómetro, cónico), de la resistencia a la compresión o a la deformación (módulo de ruptura). Las principales conclusiones de esta fase del estudio son:

1. Los tepetates poco o no calcáreos de las series T2 y T3 tienen un comportamiento de

Cuadro 3. Textura de los tepetates de referencia t2, t3 y ti.

Tipo de tepetate	Tipo de textura	Arcilla	Limo	Arena
		%		
Poco o no calcáreo t2	1 Arena arcillo-limosa	25-34	13-24	50-60
	2 Arcilla limosa	36-42	34-42	22-30
t3	1 Arena arcillo-limosa	31-40	11-16	48-53
	2 Arcilla limosa	46-54	22-25	24-29
Moderadamente calcáreo t3	Arena limosa	8-15	12-22	68-75
Calcáreo encostrado t2, t3, ti	Arena limosa	7-9	9-12	80-82

fragipán; en el estado seco, su resistencia a la penetración ($< 20 \text{ kg/cm}^2$) y a la compresión ($< 10 \text{ kg/cm}^2$) es baja; además son friables. En húmedo, son plásticos, poco resistentes y se deforman sin estallar.

2. Los tepetates encostrados con caliza dura de todas las series tienen comportamiento de duripán, tanto en el estado seco como en el húmedo; son muy duros a la penetración (100 a 200 kg/cm^2) y a la compresión (40 a 60 kg/cm^2); estallan repentinamente en fragmentos.

3. Los tepetates moderadamente calcáreos tienen un comportamiento intermedio, más cercano al de un fragipán: en el estado seco son bastante duros a la penetración (20 a 50 kg/cm^2) y a la compresión (15 a 25 kg/cm^2) y son friables; en el estado húmedo, son menos duro, más friable y más plástico.

e. Retracción, Expansión

Esta medición (en cilindro) se hizo en los laboratorios de ORSTOM con suelos y tepetates. desde el estado saturado en agua al estado seco, hasta la máxima retracción. La retracción es de por lo menos 15% del volumen en el caso de los tepetates de la serie T2, constituidos por arcilla de tipo esmectitas y de 5% en los de la serie T3, constituidos por haloisita y óxidos de hierro. Se observa que por lo menos 80% de la retracción concierne al volumen poral de los microporos del fondo matricial, es decir del espacio interparticular ($< 0,2 \mu\text{m}$).

f. Disolución del cementante y disgregación

Los tepetates fueron sometidos a tres pruebas de comportamiento, en agua destilada, HCl 1 N y NaOH 1 N.

Los tepetates t2 y t3, poco o no calcáreos con comportamiento de fragipán, se desagregan parcialmente o casi totalmente en el agua (19 a 67% de los agregados),

Los tepetates moderadamente calcáreos se desagregan parcialmente en HCl 1 N. Después de

la desaparición del cementante calcáreo, se comportan como fragipán,

Los tepetates con encostramiento calcáreo duro permanecen estables después de un tratamiento con HCl 1 N o NaOH 1 N (pero se debió haber aplicado sucesivamente estos dos reactivos, ya que un cementante silicatado se agrega probablemente al cementante calcáreo). Esos tepetates tienen un comportamiento de duripán.

g. Conductividad hidráulica

Esta medición se hizo en laboratorio en cilindros de tepetate. Luego de la saturación en agua y expansión, las grietas de retracción y la porosidad gruesa se cerraron en su mayoría. Por lo anterior, la conductividad hidráulica es siempre muy lenta (0.3 a 0.5 mm/hora) en los fragipanes poco o no calcáreos. Sin embargo, es más elevada (2 a 10 mm/hora), calificada de lenta, en los tepetates con encostramiento calcáreo. La arquitectura rígida del cementante calcáreo mantiene una porosidad gruesa.

La permeabilidad es mucho más elevada (10 mm/hora) en el campo debido a las grietas de retracción, pero disminuye en los fragipanes en el transcurso de la época de lluvias, debido a su expansión.

h. Densidad, porosidad, capacidades en aire y en agua

Los valores de la densidad real llevada a cabo en el CP (promedio 2.3 g/cm^3) son muy inferiores a la realidad. Pero las obtenidas en mejores condiciones por Werner (1992) y por el ORSTOM, están comprendidas entre 2.5 y 2.7 g/cm^3 y el promedio es de 2.63 g/cm^3 . Finalmente, se retuvo un valor promedio de 2.65 g/cm^3 (el utilizado habitualmente para los suelos arenosos) para el cálculo de la porosidad total.

Las mediciones de densidad aparente obtenidas mediante varios métodos, son más confiables. En muestras secas ($< \text{pF } 2.5$), la densidad aparente de los tepetates varía de 1.2 a 1.6 g/cm^3 . Los valores más frecuentes están entre

Cuadro 4. Valores de densidad aparente y de porosidad calculada (vol. %)

Serie Tepetate	Mediciones con tepetate seco (pF 2.5) ⁽³⁾						Tepetate a saturación
	Da g/cc	Pt %	P < 10 µm	Pf < 0.2 µm	Pm 0.2-10 µm	Pg > 10 µm	Pt %
T2 (1)	1.35-1.45	49-45	42-40	30-26	16-12	7-5	55-53
T2 (2)	1.36-1.41	48-46	44-36	33-29	11-07	9-4	-
T3 (1)	1.20-1.50	56-43	56-41	41-27	15-12	2-0	64-65
T3 (2)	1.48-1.60	45-40	38-29	30-9	20-06	9-3	-
T3K (1)	1.55	41	37	27	10	4	35
TK (1)	1.35-1.45	49-45	43-35	34-27	12-07	12-2	42-39

(1) Tepetates del Valle de México, mediciones CP y ORSTOM.

(2) Tepetates de Tlaxcala, mediciones U.A.T.-U.G.

(3) Da: densidad aparente. Pt: porosidad total calculada. P: Porosidad. Pf: porosidad fina. Pm: Porosidad mediana. Pg: Porosidad gruesa.

Pf: H₂O en pF 4.2 -Pg: H₂O en pF 2.5 -Pm: H₂O en pF 2.5-pF 4.2, en volumen. T3k, con caliza friable; TK con encostramiento calcáreo duro.

1.35 y 1.5 g/cm³ y el promedio se aproxima a 1.45 g/cm³. Partiendo de estos valores, la porosidad total calculada varía de 40 a 55% y el valor promedio es de 45% (Cuadro 4). Esos valores no son significativamente diferentes en las dos series T2 y T3, ni en los tepetates con encostramiento calcáreo duro. Sin embargo, la porosidad total en el horizonte de suelo de una misma serie es un poco superior (de 2 a 7%) al del tepetate subyacente.

Es importante notar que el tepetate de tipo fragipán saturado en agua tiene una densidad aparente menor (1.2 a 1.5 - promedio 1.3 g/cm³) y en consecuencia una porosidad total más elevada (48 a 56% - promedio 51%) o sea un aumento relativo promedio de 13%. Así, por el hecho de la expansión del material, el volumen de agua medido a saturación puede ser superior a la porosidad total calculada con tepetate seco.

Se ve que la porosidad total es siempre superior a 40%. Pero la macroporosidad (> 10 µm) es inferior a 10% del volumen y a

veces inferior a 5%, sobre todo en los tepetates de la serie T3. Esto significa un drenaje lento y una baja capacidad de aireación para un buen desarrollo de las raíces de las plantas; de ahí la esterilidad de esos materiales. Sin embargo, la microporosidad (< 10 µm) global es siempre superior o igual a 30%, aún en los tepetates encostrados con caliza. El volumen de la porosidad promedio (10-0.2 µm), que corresponde a la reserva de agua útil para las plantas, es a menudo superior o igual a 10% del volumen. Esta reserva es normalmente suficiente para un buen desarrollo de las plantas. No obstante, la porosidad fina (< 0.2 µm) interparticular en la matriz fina del tepetate, representa más de 25% del volumen. El agua retenida con fuerza en sus poros no es accesible a la planta. Por otra parte, este volumen poral microscópico aumenta considerablemente durante la rehumectación (+ 15% del volumen total saturado), provocando así la expansión de los tepetates de tipo fragipán y la reducción del espacio de los macroporos. Esto no se produce en los tepetates con encostramiento calcáreo duro.

Cuadro 5. Propiedades químicas de las series de tepetates T2, T3 y Ti y Tk.

Serie	pH	CaCO ₃	C	N	Ca	Mg	K	Na	Bases intercambiables			P-Olsen
									EBS	CEC	PSB	
Tepetate (agua)		%	% ₀₀	% ₀₀	----- meq/100 g -----			%	ppm			
T2	7.3-7.8	1.4-1.8	0.12-0.20	0.03-0.05	7-9	6.1-6.3	1-1.3	0.6-1.2	15-17	18-21	75-82	1.4-3
media	7.5	1.6	0.15	0.04	7.7	6.2	1.2	0.9	16	20	80	2.3
T3	7.6-8.2	1.9-2.5	0.08-0.24	0.02-0.07	7-14	7-12	1-3	0.5-4	16-31	17-41	60-100	2.5-2.8
media	7.8	2.2	0.14	0.025	12.3	8.4	2.1	1.6	24	30	80	2.6
Ti	8.6-8.9		0.08-0.20	0.02-0.03	18.8	4.5-5.4	0.6-1	0.6-1	25-26*	18-24	100	-
media	8.7	2.5	0.14	0.025	18.8	5.0	0.8	0.8	25*	21	100	-
TK(1)	8.3-8.9	5-14	0.15-0.36	0.02-0.07	41-45	8-12	1.2-2.6	1-1.3	55-60*	26-34	100	-
media	8.7	8	0.22	0.04	43.7*	10.3	2.0	1.2	57*	29	100	2.0

(1) TK tepetate con encostramiento calcáreo.

(2) exceso de Ca soluble.

4.2. Propiedades químicas

A las doce muestras utilizadas para el análisis físico, se agregaron tres muestras de tepetate poco calcáreo de las series T3 o Ti. Los resultados rangos y promedios se resumen en el Cuadro 5.

a. pH (agua), CaCO₃

El pH es siempre un tanto alcalino ya que hay por lo menos 1% de caliza, aún cuando esto no sea siempre evidente en el terreno, por lo tanto, la capacidad de intercambio catiónico está siempre saturada con cationes básicos,

Los tepetates t2 y t3 de tipo fragipán poco o no calcáreo, tienen un pH inferior o igual a 8 y menos de 2.5% de carbonato de calcio equivalente. Los tepetates con encostramiento calcáreo duro, tienen un pH superior a 8.5 y más de 5% de carbonato de calcio equivalente.

b. Carbono, Nitrógeno.

Todos los tepetates contienen sólo trazas de carbono (0.1-0.3%) y de nitrógeno (0.02-0.04%). Además, este carbono está fuertemente

mineralizado (C/N ≈ 5). Por consiguiente casi no hay nitrógeno disponible para las plantas.

c. Bases intercambiables, C.E.C

Los contenidos en bases intercambiables son siempre elevados, sobre todo en calcio y magnesio; las de potasio son importantes y muy frecuentes superiores o iguales a 1 meq/100g. Estos elementos son ampliamente suficientes para abastecer a las plantas en su demanda.

Los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) están un poco sobrestimados. La CIC efectiva es en general, parecida a la suma de las bases en el caso de los tepetates poco calcáreos. Es de alrededor de los 15 meq/100 g en los de la serie T2, de 15 a 25 meq/100 g en los de la serie T3 y probablemente inferior o igual a 25 meq/100 g en los tepetates con encostramiento calcáreo. En estos últimos el calcio soluble provoca una sobre saturación de la CEC pero este valor es por lo menos de 15 meq/100 g en todos los tepetates en ausencia de ácidos húmicos.

Debe hacerse notar la presencia relativamente importante de sodio (1 meq/100 g, > 5% de CIC),

Cuadro 6. Contenido en fósforo y potasio de los tepetates de la serie T2 y T3 y de un suelo.

	Serie T3				Serie T2		Suelo
	Hueyotlipan		San Pablo		Hueyotlipan		C
	C(1)	NC(2)	C	NC	C	NC	
K tot‰	2.4	2.5	2.2	2.3	2.4	2.8	1.9
K interc.‰	0.52	0.63	0.35	0.58	0.60	0.80	0.36
P tot. ppm	510	420	580	380	270	230	740
P Olsen ppm	6.4	3.0	4.8	2.4	4.2	2.7	30.4

(1) C tepetate cultivado.

(2) NC tepetate no cultivado, inicial.

lo que podría justificar una cierta dispersión y movilidad de las arcillas a pesar de la abundancia del calcio (Robert y Tessier, 1992).

d. Reservas y disponibilidad en potasio y en fósforo

Veintiún muestras de tepetate t3, 4 de t2 y 3 de suelos fueron analizadas por Etchevers (1992) para determinar la disponibilidad en K y P. Los resultados son los siguientes (Cuadros 6):

Las reservas minerales en potasio son elevadas (2 a 3‰) así como su disponibilidad en forma intercambiable (0.6 a 0.8‰) en todos los tepetates. Esa disponibilidad disminuye un poco en los tepetates cultivados.

Las reservas de fósforo mineral son moderadas (400 ppm) en los tepetates t3 o bajas (200 ppm) en los tepetates t2. Su disponibilidad en forma asimilable por la planta es muy baja (2-3 ppm) en todos los tepetates. Esos valores aumentan ligeramente en los tepetates cultivados y fertilizados con fosfatos. En comparación, son mucho más elevadas en los suelos cultivados. Todos los tepetates tienen una carencia severa en fósforo mineral (y orgánico).

V. EROSION Y CONSERVACION DE LOS SUELOS Y TEPETATES

Este estudio se hizo en dos regiones distintas: una cerca de Texcoco por el equipo CP-

ORSTOM, la otra al norte de Tlaxcala por el equipo UG-UAT.

A. REGION DE TEXCOCO: EXPERIMENTACION CON TEPETATE T3 Y SUELO, ESTACION DE SAN MIGUEL TLAIXPAN

Los resultados de caracterización y de medición fueron presentados por Arias y Miranda (1992), Jérôme (en colaboración con Janeau, 1992), Martínez *et al.* (1991). El tepetate es de tipo t3.

1. PROPIEDADES INICIALES DEL SUELO Y TEPETATE

Se trata del análisis de muestras del P 30: suelo (S) = horizonte 1; tepetate (T) = t3 horizonte 11 del dicho perfil.

1.1. Propiedades físicas.

El tepetate es más arcilloso, menos denso y más poroso que el suelo. Retiene más agua, pero su reserva útil es un poco inferior y su porosidad gruesa es casi nula, su conductividad hidráulica es muy lenta. Sin embargo, es muy friable.

Luego de la fragmentación por roturación del tepetate, la porosidad total alcanza de 53 a 58%, permitiendo una macroporosidad suficiente y una velocidad de infiltración de por lo menos 50 mm/hora (Cuadro 7).

Cuadro 7. Características físicas de un tepetate t3 y de un suelo⁽¹⁾.

	Granulometría					Da	P tot	Humedad volúmica			K	Dureza		
	A	Lf	Lg	Af	Ag			CC	PF	RU		Hum.	Seco	
	----- % -----						%	----- % -----			mm/h	kg/cm ²		
S	25	13	13	31	18	1.56	41.1	33.8	20.0	13.8	-	-		
T	34	34	12	15	5	1.47	44.5	44.4	32.3	12.1	0.25	5	16	

(1) Da: Densidad aparente - Ptot: Porosidad total - CC: Capacidad en el campo - PF: Punto de marchitez - RU: Agua útil - K: Conductividad hidráulica: A: Arcilla - Lf y Lg: Limo fino y grueso - Af y Ag: Arena fina y gruesa.

Cuadro 8. Características químicas de un tepetate t3 y de un suelo.

	pH	Bases intercambiables					CIC*	S	Mat. Org.		P	
		Ca	Mg	K	Na	SB			C	N	Pt	Pas
		----- meq/100 g -----					%	----- % -----	----- ppm -----			
S	6.4	0.8	3.6	0.4	0.15	4.95	12.6	39	7.1	0.74	600	30
T	7.6	6.7	7.8	1.5	0.90	16.2	19.0	88	1.7	0.43	500	3

S%: Saturación en bases intercambiables - Pt: Fósforo total - Pas: P (Olsen) disponible - Suelo: S - tepetate: T.

1.2. Propiedades químicas.

El tepetate es más alcalino, contiene más bases intercambiables (sobre todo Ca y K) que el suelo y está saturado en bases (los valores de CIC están sobre estimados). Pero es deficiente en nitrógeno y en fósforo disponible. Esta deficiencia puede paliarse con una fertilización de 120 unidades de N y 80 unidades de P₂O₅/ha, sobre las ensayos de tepetate cultivados en maíz (Cuadro 8).

2. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL AGREGADO ÓPTIMO DE TEPETATE.

El agregado óptimo obtenido por fragmentación del tepetate es el que suministra las mejores propiedades físicas para el desarrollo de las plantas: reserva útil en agua, porosidad al aire y velocidad de infiltración suficientes, manteniendo siempre una buena estabilidad estructural.

2.1 Experimentación en el laboratorio.

Un método de fragmentación controlada (Martínez *et al.*, 1991) permitió someter siete clases de tamaño de agregado (de 40 a 0.5 mm) a las mediciones siguientes: estabilidad en una lluvia simulada, capacidad de retención en agua, velocidad de infiltración, porosidad, pérdida de materia por escurrimiento y por efecto "splash", desmoronamiento de los agregados bajo la lluvia simulada (método de Dexter, 1976), etc... Finalmente, todos los agregados superiores a 2 mm son estables pero son los fragmentos de 3.4 a 2.4 mm de diámetro que constituyen el agregado óptimo: estabilidad de 98%, velocidad de infiltración máxima sin efecto de oclusión de los poros, elevada capacidad de retención en agua (29% en peso y 39% en volumen) comparable al de un suelo arcillo-limoso. Una fragmentación más fina sería peligrosa para la estabilidad de los agregados.

Cuadro 9. Distribución del tamaño de los agregados de tepetates después de varios laboreos.

	D 10	D 50	D 60	D 60/10
Tamaño de los agregados (mm)	0.2	2.9 - 4.3	4.5 - 9.3	25.0-42.0

2.2. Experimentación en el campo.

La fragmentación del tepetate se obtuvo en parcelas experimentales mediante una roturación profunda ($h = 55$ cm), varios pasos de arado y pulverizaciones (discos) sucesivas de manera de poder obtener un agregado promedio de 3-4 mm. El resultado final fue el siguiente (Cuadro 9).

El tamaño medio de agregado que se logró fue satisfactorio, pero no fue posible obtener una fracción homogénea; ya una parte importante pasó a formar parte de la fracción fina (<0.5 mm) inestable y susceptible de ocluir la porosidad.

3. PARCELAS EXPERIMENTALES DE MEDICIÓN DE LA EROSIÓN, PROTOCOLO Y MÉTODOS.

Las parcelas de este estudio fueron ubicadas en San Miguel Tlaixpan sobre el piedemonte oeste de la Sierra del Tláloc-Telapón a 2 560 msnm y con una pendiente de alrededor de 8-9%. Sus dimensiones fueron 22 m de largo por 2 m de ancho siguiendo el modelo de Wischmeier, con algunas excepciones descritas a continuación.

En 1990, se establecieron seis parcelas sobre tepetate (t3) desnudo, sin cultivar, pero con diversos tratamientos: 1. Testigo desnudo; 2. Roturación; 3, 4, 5 y 6. Roturación y fragmentación mediante arado y discado de las parcelas. Las parcelas 3 y 4 tenían 22 m de largo mientras que la 5 y la 6 tenían 10 y 5 m de largo respectivamente, para probar el efecto de longitud de pendiente. En el suelo desnudo se pudo

comparar los efectos de la roturación, de la fragmentación del tepetate y de la longitud de pendiente. Las mediciones se iniciaron el 7 de agosto de 1990 y duraron solamente dos meses (agosto-septiembre) al final de la temporada de lluvias.

En 1991, se tuvieron siete parcelas de las cuales cinco se establecieron sobre tepetate y dos sobre suelo no erosionado, con cultivo de maíz (var. Criollo, suelo con surcos de acuerdo a curvas de nivel):

-En tepetate los tratamientos fueron: 1: Testigo tepetate desnudo; 2: Roturación (en 1990) y desnudo; 3: Roturación (en 1990) y arado (1990-1991), surcado y desnudo; 4 y 5: Idem 3 y cultivo de maíz.

-En suelo 7 los tratamientos fueron: Suelo, arado, surcado y desnudo; 8: Idem y cultivo de maíz.

Así, se pudo comparar suelo y tepetate y el efecto del cultivo de maíz. Las observaciones en 1991 duraron del 5 de mayo al 24 de octubre, durante toda la temporada de lluvias.

Se midieron las intensidades de las lluvias (pluviógrafo) y del escurrimiento (limnógrafo), la pérdida en tierra (sedimento en la tina). En el mismo tratamiento en relación a la evolución de los parámetros se midieron los siguientes factores: densidad aparente y porosidad, velocidad de infiltración, humedad del suelo, granulometría, estado de la superficie del suelo y desaparición de los agregados (Jérome, 1992) y finalmente el rendimiento del cultivo del maíz en 1991. Esas mediciones permitieron determinar, por un lado, los parámetros de la erosión:

régimen de las lluvias y erosividad (E₁₃₀), intensidad del escurrimiento y pérdida de tierra y por otra parte, la evolución de las propiedades del suelo y del tepetate que condicionan la erosión y la fertilidad. Además, el análisis de los estados de superficie explica el proceso de esta evolución y de la erosión.

4. SEGUIMIENTO DE LAS PROPIEDADES DEL TEPETATE Y DEL SUELO.

El cultivo del maíz en 1991 se hizo siguiendo las prácticas campesinas mexicanas. Después de arar y confeccionar los surcos en curvas de nivel (13 de mayo), el maíz se sembró a golpes, formando así surcos intercalados. El 8 de julio se hizo una primera escarda para mover la tierra de la cima en el fondo del surco y hacer una primera acolladura del maíz. El 6 de agosto, se practicó una segunda escarda para cavar un surco entre las filas y completar la acolladura del maíz, produciendo así el surco final en el lugar del surco inicial. Es por eso que se deben distinguir tres períodos de observación: 1) del 6 de mayo al 8 de julio, 2) del 8 de julio al 6 de agosto, y 3) del 6 de agosto al 24 de octubre.

El desnivel cima/fondo del surco varía de 15 a 25 cm y produjo una barrera para el

Cuadro 10. Evolución de la porosidad.

Período	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Suelo	56.4	50.9	55.3	51.5	50.0	48.9
Tepetate	58.1	53.2	57.7	54.3	51.1	50.6

1. inicio y 2. fin de período.

Cuadro 11. Evolución de la velocidad de infiltración.

Período	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Tepetate (a)	96	45	48	28.0	21	10
Tepetate (b)	52	16	24	12.0	8	2
Suelo (a)	68	32	16	8.0	10	4
Suelo (b)	52	00	12	2.4	5	0

1. inicio y 2. fin de período.

escurrimiento superficial de las lluvias durante el primer y el tercer período de trabajo del suelo.

4.1. Evolución de la porosidad en 1991 (porosidad total en %).

El aumento de la porosidad del tepetate de 44% inicialmente a 58% luego de la aradura, se mantuvo gracias a la escarda. Sin embargo, bajó a casi 50% el fin de la temporada de lluvias a causa del asentamiento de los agregados (Cuadro 10).

4.2. Evolución de la velocidad de infiltración, en 1991 (en mm/hora).

La observación se hizo sobre la cima del surco (a) y entre los surcos (b) (Cuadro 11).

El fuerte aumento de la velocidad de infiltración de menos de 1 mm/h en el tepetate saturado inicial a 50-100 mm/h en el tepetate arado, decrece progresivamente en la cima del surco hasta 10 mm/h. En el fondo del surco, este valor cae rápidamente a casi 0 por el efecto combinado de una costra de deposición y por la proximidad al horizonte de tepetate, muy poco permeable cuando está saturado con agua (expansión). Sobre la cima del surco, la disminución de permeabilidad se debe a la compactación y sobre todo a la formación de una costra estructural en la superficie. La

evolución de la velocidad de infiltración en el suelo es parecida a la de los tepetates pero aún más rápida y más acentuada, por su inestabilidad estructural y la presencia de un pie de arado (compactación del suelo vértico subyacente).

4.3. Evolución de la humedad del suelo

a. Relación entre humedad de suelo y lluvias (en 1991)

La humedad (expresada con base en el peso seco) se midió dos veces por semana durante los seis meses de la época de lluvias en las parcelas de suelo arado, desnudo y cultivado (N° 6 y 7) y las de tepetate arado, desnudo y cultivado (N° 3 y 4). Se observó primeramente una evolución paralela de todas las parcelas aradas (suelo y tepetate), pero la humedad del suelo arenarcilloso fue alrededor de 5% inferior a la del tepetate arcillo-limoso. El tepetate roturado se comportó entonces como un suelo arcillo-limoso cuya capacidad de retención de agua en el campo (CC) se sitúa entre 25 y 30% y en el punto de marchitez (PF) entre 15 y 17%. En el tepetate arado el impacto de la cobertura de maíz sobre la humedad del suelo no es evidente, excepto durante la corta época seca del mes de agosto, cuando la humedad en suelo con maíz fue ligeramente inferior y por debajo del PF, situación que se atribuyó a la mayor

evapotranspiración en ese estado de desarrollo de la planta.

En segundo lugar, se nota un paralelo entre la humedad del suelo y del tepetate con el régimen de lluvias (Figura 8). Luego de las primeras lluvias en mayo, seguidas de sequía, la humedad disminuyó y se hizo cercana y hasta un poco inferior al PF. Durante un período de lluvias abundantes (del 8 de junio al 7 de julio), la humedad aumentó hasta CC y más. Luego, fluctuó entre CC y PF durante un período de lluvias irregulares y descendió cerca del PF a fines de agosto (época seca corta). Finalmente (Figura 9) volvió a elevarse bruscamente cerca de la CC durante las fuertes lluvias de septiembre 2-octubre 20 (2 al 20). La infiltración de las lluvias en el tepetate arado y en el suelo durante este período fue buena. Los valores por encima de la CC durante las fuertes lluvias indican no obstante un límite de drenaje en la parte basal del suelo y del tepetate arado.

b. Impacto de los tratamientos sobre la humedad del suelo y del tepetate

Se calculó un porcentaje de los valores donde la humedad del suelo es inferior al PF (déficit) o por encima de la C (exceso) y entre ambos (agua disponible) durante los dos últimos meses de lluvia en 1990 y de los seis meses de lluvia en 1991. Los promedios de los valores obtenidos (Cuadro 12) ponen en evidencia el efecto de los tratamientos.

Cuadro 12. Porcentaje de valores de humedad en función de los tratamientos.

Porcentaje de valores de humedad ⁽¹⁾	<PF	PF ~ CC	> CC
1 - Tepetate desnudo	57	28	15
2 - Tepetate roturado, desnudo	40	32	28
3 - Tepetate roturado, arado, sin surco, desnudo	33	39	28
4 y 5 - Tepetate roturado, arado, sin surco, desnudo (90)	32	48	20
Tepetate, arado, con surco y maíz (91)	33	28	39
6 - Suelo roturado, arado, con surco, desnudo (91)	32	32	36
7 - Suelo roturado, arado, con surco y maíz (91)	34	43	23

(1) Los números entre paréntesis se refieren a la temporada.

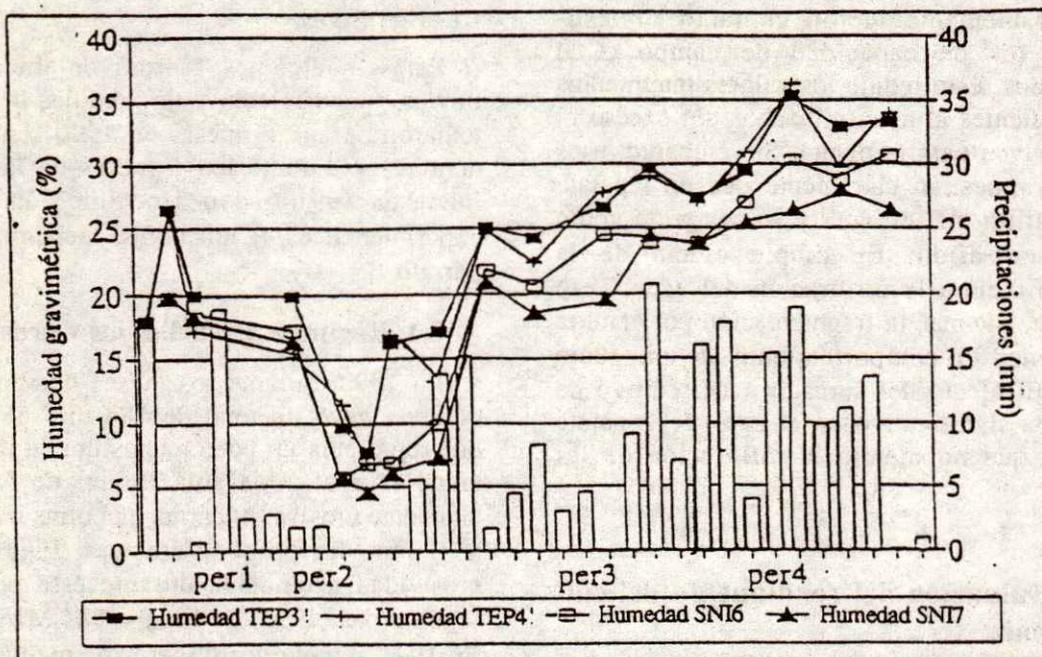


Figura 8. Relación precipitación humedad superficial: primer período.

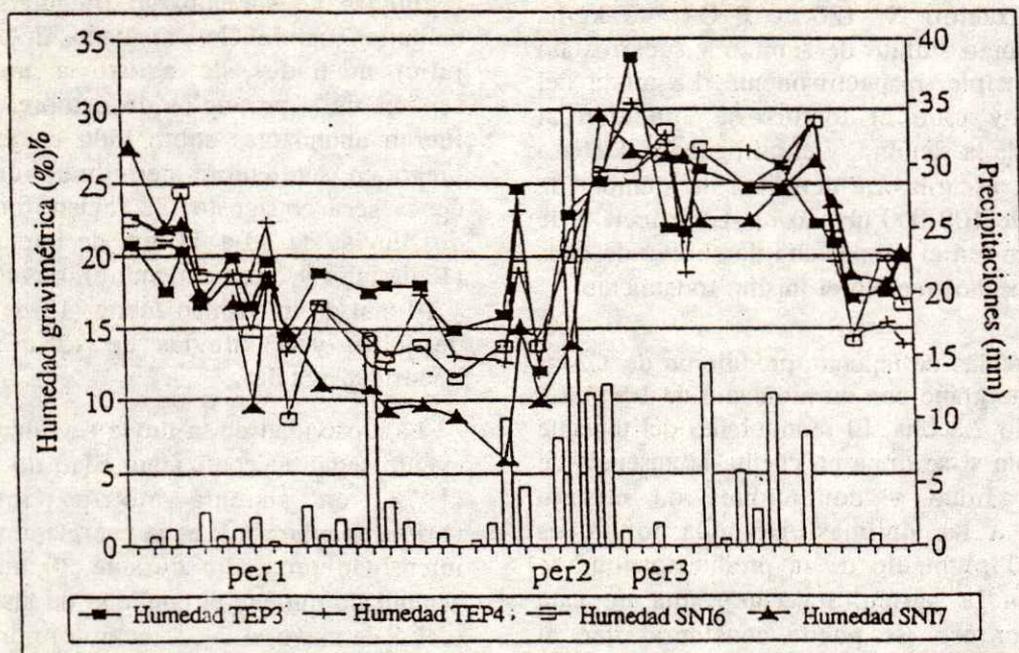


Figura 9. Relación precipitación-humedad superficial: tercer período.

Los valores umbrales del punto de marchitez (PF) probablemente fueron un tanto sobrestimados y los de capacidad de campo (CC) subestimados. Esto redujo los valores intermedios correspondientes al agua utilizable, sin exceso ni déficit nocivos para la planta. Sin embargo, esos resultados muestran claramente que un tepetate natural infiltra mal el agua y se comporta como un material árido. El simple efecto de la roturación mejora la infiltración del agua. Pero se necesita, además, la fragmentación por aradura para obtener el comportamiento de un suelo agrícola. El efecto del surcado o del cultivo de maíz no es significativo en el caso del tepetate arado, ya que no mejora la infiltración de las lluvias.

4.4. Evaluación del rendimiento del cultivo del maíz

En el segundo año de observación del tepetate subsoleado y arado, las parcelas 4 y 5 se cultivaron con maíz criollo (variedad local) con una fertilización N: 120, y P₂O₅: 40 kg/ha aplicado como sulfato de amonio y superfosfato de calcio triple, respectivamente. La mitad del nitrógeno y todo el fósforo se aplicaron al momento de la siembra, y el nitrógeno restante a la primera escarda. La densidad de siembra de maíz fue de 100 000 plantas/ha. La parcela 7 de suelo arado (en el primer año de cultivo después de un barbecho) recibió el mismo tratamiento.

Las parcelas de tepetate produjeron de 1.24 a 1.74 t/ha de grano con un promedio de 1.5 t/ha y la del suelo 2.8 t/ha. El rendimiento del tepetate es aceptable si se toma en cuenta la ausencia de abono orgánico y condiciones de manejo inferiores a las óptimas. De toda forma, es superior al promedio de la producción que se obtiene en la agricultura campesina de esta región. Por eso, se puede considerar que el tepetate así fragmentado, adquirió las propiedades de un suelo agrícola.

5. MEDICIONES DE ESCURRIMIENTO Y DE EROSIÓN

Estas mediciones fueron: de intensidad de lluvias, escurrimiento y de pérdidas de tierra. Se tomaron durante 2 meses en 1990 (septiembre a octubre) y durante los 6 meses de la época de lluvia en 1991 (mayo a octubre). El protocolo experimental es el mismo ya mencionado en el párrafo 3.

5.1. Régimen de las lluvias y erosividad

En 1990, durante los meses de septiembre y octubre, cayó un total de 184 mm de lluvia, lo que representa un poco menos que la pluviosidad anual normal. Una sola lluvia, de 54 mm fue altamente erosiva, mientras que otras cinco, de 15 a 21 mm, fueron poco erosivas (Figura 10). La erosividad acumulada durante este período fue según Arias (1992) de EI₃₀ = 684 MJ/ha*mm/h. En 1991, durante los 6 meses de medición (mayo a octubre), cayeron en total 669 mm de lluvia (Fig. 11), un poco menos que la pluviosidad anual promedio (750 mm). La distribución de las lluvias fue, sin embargo, irregular. Se pueden delimitar cuatro ciclos: mediados de mayo, junio-julio, mediados de agosto a mediados de septiembre y principios de octubre. Las lluvias fueron abundantes sobre todo en junio-julio y luego en septiembre pero hubo una pequeña época seca en agosto. Se registraron solamente dos lluvias de 30 a 34 mm de intensidad fuerte (13 de julio y 2 de septiembre), dos lluvias de 18 y 19 mm de intensidad fuerte (13 de mayo y 10 de julio) y 13 lluvias de 15 a 21 mm de intensidad regular.

La erosividad de la lluvia se calculó por cada evento según el coeficiente EI₃₀ de Wischmeier (1978) en sistema métrico internacional (MJ/ha*mm/hora). E es la energía cinética, I₃₀ la intensidad promedio durante 30 mn. El valor acumulado durante el conjunto de las mediciones (del 6 de mayo al 24 de octubre) por un total de lluvias de 669 mm, es de alrededor 3 500 (Jérôme, 1992).

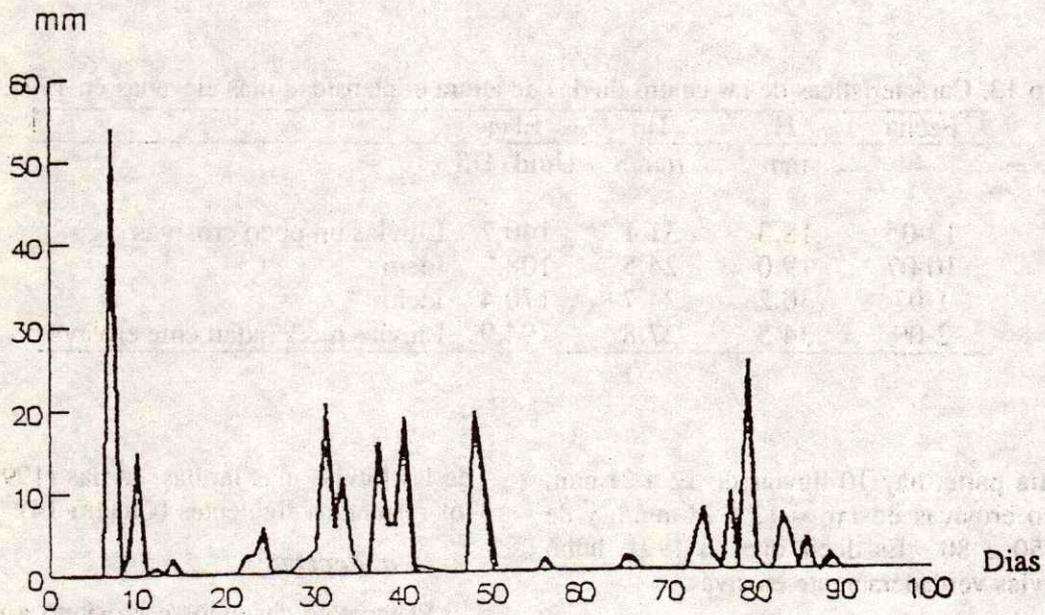


Figura 10. Precipitación en 1990 (agosto a septiembre) en San Miguel Tlaixpan.

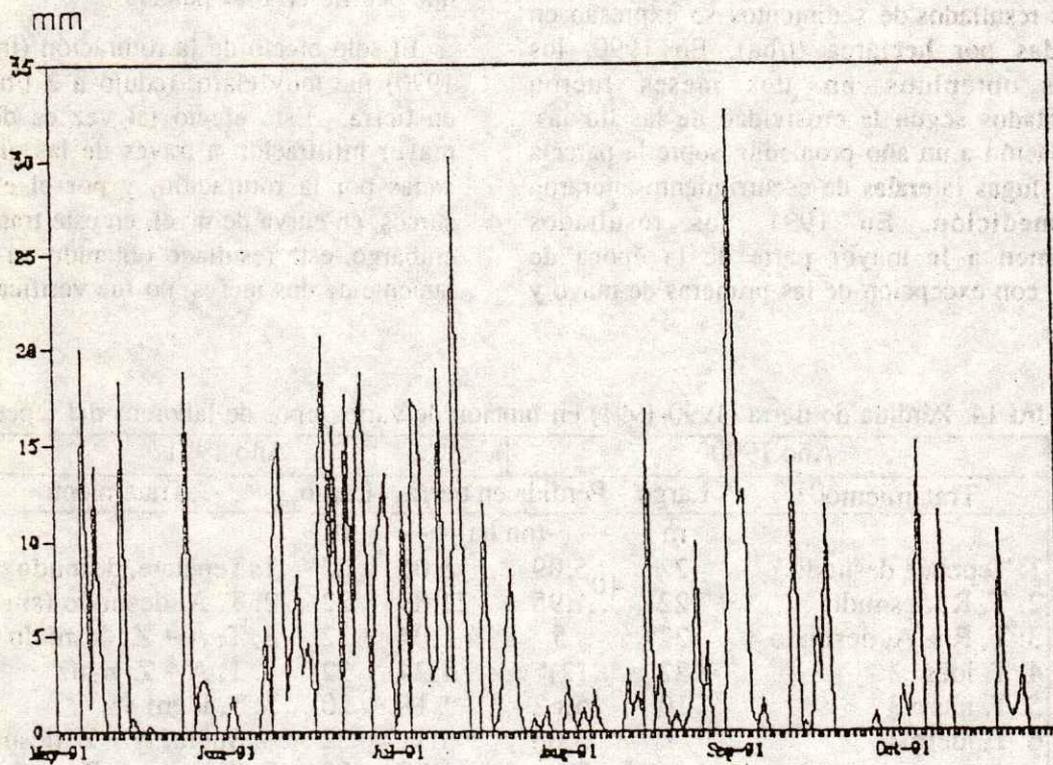


Figura 11. Precipitación en 1991 (mayo a octubre) en San Miguel Tlaixpan.

Cuadro 13. Características de las cuatro lluvias de altura e intensidad más elevadas en 1991.

Fecha	H	I ₃₀	EI ₃₀	
	mm	mm/h	Unid. US	
13-05	18.3	31.1	140.7	Lluvias un poco erosivas
10-07	19.0	24.5	108.7	Idem
1-07	30.2	24.7	170.4	Idem
2-09	34.5	27.8	194.9	Lluvias moderadamente erosivas

Por otra parte, hay 10 lluvias de 12 a 21 mm, muy poco erosivas de I₃₀ = 12 a 24 mm/h y de EI₃₀ = 50 a 80. Es decir que en 1991, hubo pocas lluvias verdaderamente erosivas.

5.2. Mediciones de la erosión

Los resultados de sedimentos se expresan en toneladas por hectárea (t/ha). En 1990, los valores obtenidos en dos meses fueron extrapolados según la erosividad de las lluvias, con relación a un año promedio; sobre la parcela 4 (2)*, fugas laterales de escurrimiento alteraron esta medición. En 1991, los resultados conciernen a la mayor parte de la época de lluvias, con excepción de las primeras de mayo y

de las lluvias más tardías. Arias (1992) presenta los resultados siguientes (Cuadro 14):

a. Tepetate

El tepetate desnudo se erosionó a pesar de su dureza superficial pero a una tasa reducida de 5 t/ha/año. Esto se debe al fuerte escurrimiento que ocurrió en esas parcelas.

El solo efecto de la roturación (tratamiento 2, 1990) fue muy claro, redujó a 2 t/ha la pérdida en tierra. Este efecto tal vez es debido a una mayor infiltración a través de las grietas provocadas por la roturación, y por el efecto de los surcos, en curva de nivel, en este tratamiento. Sin embargo, este resultado obtenido en 1990 en solamente de dos meses, no fue verificado en 1991.

Cuadro 14. Pérdida de tierra (1990-1991) en función de varios tipos de laboreos del tepetate.

Año 1990			Año 1991		
Tratamiento ⁽¹⁾	Largo	Pérdida en tierra	Largo	Tratamiento	
	m	----ton ha----	m		
1: Tepetate desnudo	22	5.09	5.05	22	1: Tepetate, desnudo
2: T, R, desnudo	22	1.95	21.89	22	2: T, A, desnudo (sin B)
3: T, R + A, desnudo	22	5	1.04	22	3: T, A + Z, desnudo
4: T, idem 3	22	(2)*	1.24	22	4: T, A + Z, maíz
5: T, idem 3	10	5.62	1.18	10	5: T, idem 4
6: T, idem 3	5	5.66	1.1	22	6: Suelo, A + Z, desnudo
			1.79	22	7: Suelo, A + Z, maíz

(1) T: tepetate; R: roturado; A: Arado; Z: Surcado.

El efecto de la aradura, sin formación de surcos en la parcela 2 en 1991, generó una fuerte pérdida en tierra de 22 t/ha, a pesar de una buena permeabilidad inicial y de una baja erosividad de la mayoría de las lluvias. Aunque el tepetate roturado tuvo una estructura estable, es evidente que los agregados más finos fueron fácilmente erosionables. Es notable que solamente dos lluvias mayores o a lo mucho cuatro, fueron los responsables de tal erosión.

El efecto de surco, en la parcela 3 en 1991, fue espectacular, ya que redujó la pérdida en tierra de 22 a 1 t/ha, impidiendo así completamente la erosión a escala de parcela. Pero esto no significa que lluvias superiores a 35 mm y de intensidad I_{30} mayor a 30 mm/h, no sean altamente erosivas. En general a partir de 50 mm/h durante 30 minutos, ningún surco resiste la presión del agua acumulada entre los surcos.

El efecto de la cobertura del maíz sobre la erosión en 1991 no aparece, enmascarado probablemente por el efecto del surcado. La pérdida en tierra se mantuvo alrededor de 1t/ha.

No se observó un efecto de la longitud de pendiente ya sea en el tepetate arado-desnudo en 1990 o en arado-surcado y cultivado con maíz en 1991. Este hecho, ya conocido (Roose, 1981, Casenave y Valentin, 1989) se pudo comprobar otra vez aquí.

b. Comparación suelo-tepetate

Los resultados de erosión son un tanto diferentes en suelo que en tepetates arados y acamellonados. El efecto del acamellonamiento es primordial, a pesar de una menor estabilidad estructural del suelo y de una rápida baja de infiltración después del encostramiento del suelo.

5.3. Intensidad del escurrimiento

Los responsables de las mediciones de escurrimiento no publicaron sus resultados. Parece que hubieran tenido problemas imprevistos en la interpretación de los hidrogramas suministrados por los limnógrafos (es lamentable que no hayan medido el volumen total escurrido en cada lluvia). Sin embargo, Arias (1992) en su reporte de síntesis presenta evaluaciones relacionadas a las tres lluvias erosivas de los días 10.07, 13.07 y 2.09 de 1991. Los resultados del volumen escurrido por parcela son exagerados a raíz de un error sistemático de cálculo. Luego de la evaluación de este error y corrección, se ha podido estimar un valor aproximado de la tasa de escurrimiento "r", en porcentaje del volumen de lluvia correspondiente (Cuadro 15).

Estas cifras son probables, y nos permiten comparar los efectos de los tratamientos. Obviamente en el tepetate desnudo (saturado en agua después de expandirse) el escurrimiento es

Cuadro 15. Valor de la tasa de escurrimiento "r" en función de varios tipos de laboreos del tepetate.

Número de las parcelas			1	2	3	4	5	6	7
	H	I_{30}	Valor r % volumen de las lluvias						
Fechas de las lluvias	mm	mm/h							
10.07	19.0	24.5	83.4	48.2	0.6	0.0	23.4	14.8	14.7
13.07	30.2	24.7	92.1	38.2	23.6	11.3	0.3	23.2	21.4
2.09	34.5	27.8	88.1	48.3	8.9	2.1	0.0	0.2	1.2
Promedio	83.7*	25.9	88.5	44.6	12.3	4.9	5.4	11.8	11.5

* Suma total de las lluvias.

cercano a 90% del volumen de lluvia. El efecto de la roturación y de la aradura sin surcado en la parcela 2, redujo a la mitad el valor "r". En las otras parcelas los resultados variaron de una lluvia a otra en razón de trabajo del suelo para desplazar el surco (ver párrafo 4 más arriba). En efecto el 8 de julio poco antes de la lluvia del 10 del mismo mes, una primera escarda cerró el surco inicial a expensas del primer surco. Luego el 6 de agosto, la segunda escarda permitió formar el surco final sobre las hileras de maíz.

Es evidente que el nuevo surco redujo a cerca de 0 el escurrimiento durante la fuerte lluvia del 2 de agosto, tanto en el tepetate como sobre el suelo. La escarda precedente a principios de julio, resultó ser poco eficaz durante la fuerte lluvia del 13 de julio.

La comparación de los valores promedios de "r" muestra que el escurrimiento es dos veces más elevado en el suelo (12%) que en el tepetate roturado (5%), debido a la menor estabilidad del primero y consecuencia de su permeabilidad reducida. Por otra parte, en el tepetate, parece que la cobertura de maíz (parcelas 4 y 5) redujo a la mitad la tasa de escurrimiento en relación a la parcela 3 de tepetate desnudo.

6. EVOLUCIÓN DE LOS ESTADOS DE SUPERFICIE Y DEL DESMORONAMIENTO DE LOS AGREGADOS

Se trata de la observación de las reorganizaciones estructurales y en particular de la formación de costras y de la disminución del tamaño de los agregados a la superficie del suelo. Este trabajo de Jérôme (1992) en 1991, fue

dirigido por J.L. Janeau según el método de Valentin (Casenave y Valentin, 1989).

6.1. Períodos de trabajo del suelo y régimen de las lluvias en 1991

En los párrafos 3 y 4 de esta sección describimos el protocolo de los tratamientos de las parcelas y los trabajos para el cultivo del maíz, en particular del surcado. El laboreo del suelo determinaron tres períodos de observación de los estados de superficie, los cuales correspondieron con el régimen de las lluvias, de acuerdo al esquema siguiente (Cuadro 16):

6.2. Evolución de los estados de superficie en las parcelas surcadas

Este estudio consiste en una observación y una cartografía de la superficie del suelo para caracterizar el desarrollo de las costras sobre la cima y en el fondo de los surcos. Se hizo al principio y al final de cada uno de los tres períodos, es decir seis veces durante la época de lluvia.

Empezando del estado fragmentario y rugoso inicial, se formó primero una costra estructural sobre la cima del surco y luego apareció una costra de depósito en el fondo del surco en donde se sembró el maíz. La primera escarda destruyó el primer surco y lo recubrió de materiales fragmentados, iniciando así un segundo surco para acollar el maíz. Una segunda costra estructural seguida por una de depósito se volvió a formar sobre la cima y en el fondo de los nuevos surcos. La segunda escarda regeneró el surco entre las hileras de maíz, cuyo fondo a menudo coincidió el horizonte compacto

Cuadro 16. Períodos de trabajo del suelo y régimen de las lluvias en 1991.

Lluvias mm	Primeras			Fuertes		Débiles		Fuertes	Débiles	
	37.2	19	0	283.6	84.7	25.7	50			
Fechas	6-5	13-5	17-5	25-5	8-7	19-7	6-8	31-8	21-9	24-10
Trabajos	A + Z.		Se		1ºE		2º E+Z			
Períodos	1º			2º		3º				

A+Z: Arado + Surco; Se: Siembra - 1º E: 1a. escarda - 2º E+Z: 2a. escarda + surco.

(tepetate o suelo arado). Esta operación dió forma final al surco, y a la acolladura del maíz. Se formó entonces, rápidamente una costra estructural y otra de depósito. Pero el surco final conservó sobrepuestas la primera costra de depósito del surco inicial y la segunda costra estructural debajo de la última.

Una costra estructural (S) se formó sobre los surcos por oclusión de los vacíos y cementación de partículas finas agregados y por el desmoronamiento parcial de los agregados más finos. Se formó bajo el efecto "splash" de la lluvia. Es vesicular, porque aprisiona burbujas de aire, y friable, pero casi impermeable. Se mantiene rugosa pero menos que la superficie inicial.

La costra de depósito (D) apareció en el fondo de los surcos. Es laminar, formada por una sucesión de capas arenosas claras y arcillo-limosas café. Es densa, endurecida, impermeable y menos friable que la costra estructural "S". En el caso del tepetate arado, esta costra contenía capas irregulares de pequeños agregados, los más gruesos recubriendo a los más finos (sedimentación invertida) y se mantuvo un poco rugosa y friable. En el caso del suelo, los sedimentos estaban mejor clasificados, fueron más densos y más firmes y la costra más lisa y más dura.

En el caso del tepetate arado, la formación de las costras S y D fue inicialmente lenta y sucesiva: el depósito D en el fondo del surco se formó sólo cuando toda la superficie de la cima del surco tenía una costra S, es decir cuando la lluvia se infiltraba lentamente y escurría mucho. En el segundo y sobre todo en el tercer período y a pesar de la escarda, la formación de las dos costras fue más rápida y más intensa. Fue también el periodo de lluvias más erosivas (10 y 13 de julio al inicio del 2º período; 2 de agosto en el 3º período). Parece que una mayor fragmentación de los agregados por la escarda intensificó el encostramiento, formando al final una costra D más dura.

En el suelo arado, más inestable que el tepetate, el proceso fue más rápido y finalmente la costra de depósito más gruesa y más firme que en el tepetate arado.

Esos hechos se reflejan en las mediciones de porosidad y de infiltración (ver el párrafo correspondiente), en un asentamiento y una fuerte disminución de la permeabilidad, sobre todo durante el tercer período. Esta disminución fue menos fuerte en el tepetate que en el suelo, así como en la cima que en el fondo del surco.

6.3. Desmoronamiento de los agregados en las parcelas surcadas

El desmoronamiento de los agregados se midió a través de la evolución de su diámetro, tomando en cuenta dos clases de tamaño: gruesa y fina. Se hizo esta observación al principio y al final de cada período con suelo y tepetate, desnudo o cubierto de maíz. Además, hubo mediciones del diámetro mínimo (D min), el agregado más pequeño no desmoronado incorporado a la costra S. El aumento del D min se correlaciona con la erosividad de las lluvias (EI₃₀) (Casenave y Valentin, 1989; Boiffin, 1984).

En el tepetate roturado el desmoronamiento de los agregados fue lento y progresivo durante los tres períodos, cualquiera que fuese el diámetro de los agregados y no se observó un desmoronamiento total. La disminución del diámetro no se debió al efecto "splash" y no hubo correlación con la erosividad de las lluvias (EI₃₀). La disminución del tamaño ocurrió por fisuración y fragmentación superficial bajo el efecto de una alternancia humectación-deseccación provocando una expansión-retracción de cada agregado.

En el suelo, por lo contrario, desde el primer período de lluvias y debido al laboreo el desmoronamiento de los agregados fue espectacular (Figura 12). La disminución fue proporcional a la erosividad de las lluvias (EI₃₀) sobre todo durante las lluvias altamente erosivas

del primer y tercer períodos (Figura 13). El desmoronamiento total de los agregados fue significativo desde las primeras lluvias fuertes y se generalizó en el transcurso del último período (Figura 14). Son los pequeños agregados los que se desmoronaron primero y más rápido. En efecto, son muy inestables, muy sensibles al efecto "splash" y por lo tanto a la intensidad erosiva de las lluvias. Obviamente, los agregados más gruesos fueron los más resistentes.

El efecto de protección de la cobertura de maíz sobre el desmoronamiento de los agregados no fue evidente en el tepetate roturado, ni aun en el suelo. Esta se observó sólo durante el tercer período. Esto sugiere que la protección del maíz se hace sentir tardíamente y localmente y que por consecuencia, su efecto es limitado. Eso se confirmó mediante la observación del D min.

La medición del D min de los agregados no integrados en la costra, mostró lo siguiente: en el curso de los períodos 1 y 2, los agregados menores (< 2 mm) se desmoronan sin dejar más que a los mayores (20 hasta > 50 mm) los cuales desaparecieron al final de cada período y la costra se hizo lisa. En el período 3 sólo hubo agregados inferiores a 10 mm desde el inicio y que desaparecieron rápidamente. Esta evolución fue la misma con o sin capa vegetal y más rápida en el suelo que en el tepetate roturado. Hay que evitar entonces una fragmentación demasiado fina, es decir dejar agregados > 2 mm.

6.4. Medición de los "puntos cuadrados", evolución del relieve superficial en parcela surcada

Se trata de estudiar la variación de la altura promedio de la superficie de los surcos "Hb" y del fondo de los surcos "Hs". En el primer período, la disminución de Hb precedió al aumento de Hs. Por lo tanto, el asentamiento y la formación de la costra S precedieron al depósito y a la formación de la costra D. En el segundo y sobre todo el tercer período, el proceso fue más rápido y casi simultáneo. No hubo efecto de la cobertura vegetal. La evolución fue un poco más rápida en el suelo que en el tepetate. La

disminución de la altura promedio del conjunto de la superficie al fin de las lluvias no puede ser interpretado solamente como un efecto de la erosión, ya que hubo un asentamiento generalizado y una formación de costras.

6.5. Evolución de los estados de superficie en parcelas no surcadas.

En la parcela de tepetate arado sin surcos y desnudo, la superficie inicial fue irregular y con terrones grandes. Esta se cubrió rápidamente de una costra estructural, primero las partículas finas y luego los agregados gruesos, debido al desmoronamiento de los agregados finos. Luego se formó una costra de depósito en las pequeñas depresiones. El desmoronamiento de los agregados fue progresivo y ocurrió primero en los más finos. Entonces se formaron cavidades de erosión en la superficie, por efecto de las lluvias más fuertes (fines de junio), que luego se profundizaron. Así se manifestó el efecto del escurrimiento no controlado, al contrario de lo ocurrido en las demás parcelas donde el fenómeno controlado mediante los surcos. En estas parcelas sin surcos, se observó una disminución generalizada del relieve de la superficie lo que se explica por el asentamiento y también por la erosión laminar.

6.6. Conclusión

Siempre se forman costras superficiales, primero estructurales sobre las superficies en relieve y luego de depósito en las depresiones. Estas se deben al impacto de las lluvias más fuertes. El proceso de degradación es más rápido sobre el suelo cuyos agregados son inestables y se desmoronan rápidamente. La cobertura de maíz interviene demasiado tarde para reducir este efecto. Es el encostramiento el que aumenta el escurrimiento y desencadena la erosión.

B. REGION DE TLAXCALA: EXPERIMENTACION CON SUELO Y TEPETATE 12 Y 13.

Los resultados fueron presentados por Baumann (1992) y provienen de tres estaciones:

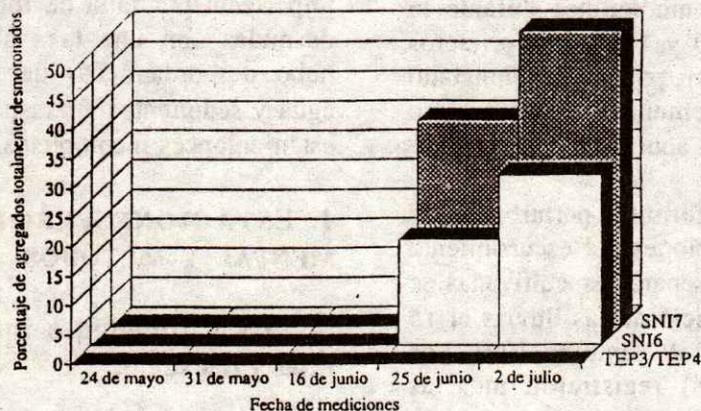


Figura 12. Evolución del desmoronamiento total de agregados en la superficie: primer período.

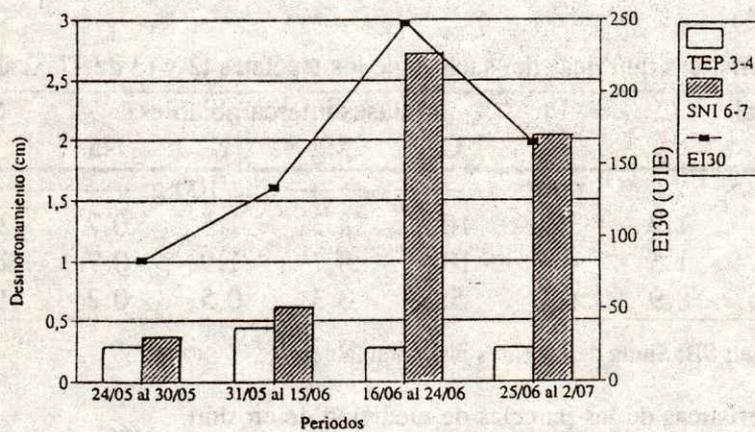


Figura 13. Relación entre el desmoronamiento de los agregados y la erosividad (EI₃₀): primer período.

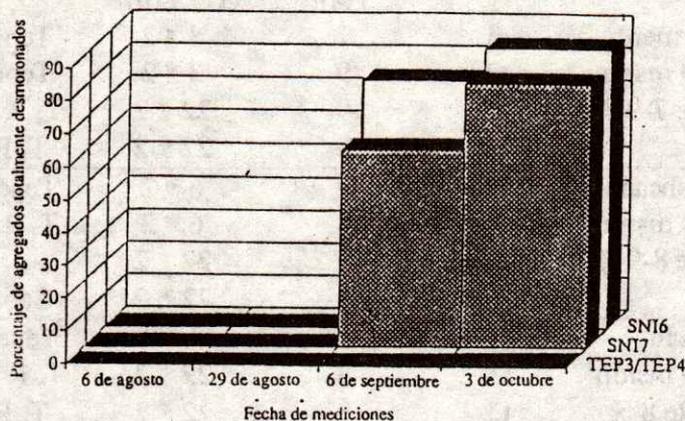


Figura 14. Evolución del desmoronamiento total de agregados en la superficie: tercer período.

El Carmen, Matlahocan y Tlalpan, situadas entre 2500 y 2600 msnm con una pendiente de 8 a 9%. Hubo dos años de mediciones durante la época de lluvias de 1990 y 1991. Los primeros resultados de 1989 con parcelas demasiado pequeñas e insuficientemente equipadas, no fueron tomadas en cuenta aquí.

Unos cuantos hechos fortuitos perturbaron las observaciones. Las mediciones del escurrimiento y de la erosión sobre las parcelas cultivadas se realizaron después del inicio de las lluvias el 15 de mayo en 1990 y el 20 de junio en 1991. Los pluviógrafos (mexicanos) registraron mal las fuertes lluvias en 1990, por lo que fueron remplazados en 1991 por aparatos alemanes más confiables y asociados a pluviómetros para el control del volumen global. Finalmente, el

sistema recolector del escurrimiento fue insuficiente para las lluvias fuertes (el equipo era imperfecto por falta de fondos). En las parcelas desnudas con una tasa alta de escurrimiento, hubo desbordamiento de las tinajas y pérdida de agua y sedimentos en suspensión. Los resultados están entonces incompletos.

1. ESTACIONES, PROTOCOLO EXPERIMENTAL Y MÉTODOS.

1.1 Propiedades iniciales de los tepetates y del suelo.

Las propiedades químicas (Cuadro 17) y físicas iniciales de los tepetates t2 y t3 son parecidas y comparables a las del tepetate t3 de Texcoco. Son pobres en carbono orgánico y en

Cuadro 17. Características químicas del suelo y de los tepetates t2 y t3 de Tlaxcala.

Material	C	Pt	Bases intercambiables				SB
			Ca	Mg	K	Na	
	%	ppm	me/100 g				
t2	1.2	300	10.3	8.3	1.5	0.7	20.8
t3	1.5	420	10.5	8.7	1.9	0.7	21.8
Suelo	8.9	450	5.0	3.3	0.5	0.2	9.0

Pt: Fósforo total; SB: Suma de las bases intercambiables.

Cuadro 18. Características de las parcelas de medición de erosión.

Parcela	Material	Pendiente (%)	Dimensión L * l (m)	Tratamiento
El Carmen alt. 2600 msnm pendiente 7-9 %	t3	7	3 * 2	Tepetate desnudo
	t2	9	3 * 2	Tepetate desnudo
	t2	9	22 * 2	T, R + A, desnudo
	t2	9	22 * 2	T, R + AZ, maíz
Matlahocan alt. 2500 msnm pendiente 8-9 %	t3	9	6 * 2	Tepetate, desnudo
	t3	8	6 * 2	T, R, Tlaxistle (1)
	Suelo	9	22 * 2	desnudo
	Suelo	9	22 * 2	Sabana arbustiva
Tlalpan alt. 2600 msnm pendiente 8 %	t3	8	3 * 2	Tepetate, desnudo
	t3	8	22 * 2	T, R + A, desnudo
	t3	8	22 * 2	T, R + AZ, maíz
	t2	8	3 * 2	Tepetate, desnudo

(1) Tlaxistle (*Amelanchier denticulata*): Arbusto local sembrado

fósforo, pero ricos en bases intercambiables, sobre todo en calcio, magnesio y potasio. Además, son poco alcalinos. El suelo es más rico en carbono pero más pobre en bases intercambiables, principalmente en potasio y es poco ácido. El tepetate t2 es tan arcilloso como el t3 pero se puede hinchar más, ya que está constituido de esmectitas y debido a eso es más inestable que el t3. El suelo es más arenoso e inestable que los tepetates.

1.2. Estaciones y protocolos

Se puede entonces comparar el comportamiento de los dos tipos de tepetates: desnudos y no roturados; roturados (R: roturado, A: arado) y desnudos o con maíz (AZ: arado + surco) así como del suelo desnudo y bajo capa de sabana arbustiva natural (Cuadro 18).

Nota - Una parcela experimental de 500 m² sobre t3 arado, sembrada con maíz, fue instrumentada con un sistema colector asociado a una rueda de "Coshocton" como partidor de agua, pero la imperfección de esta instalación no permitió tomar en cuenta los resultados.

1.3. Métodos

a. Régimen de lluvias

Las lluvias se midieron con un pluviógrafo problema del aparato en 1990, mencionado anteriormente, los pluviómetros se instalaron a una distancia de 1 a 2 km de las parcelas y a 2.5 m de altura, por razones de seguridad. En 1991, un pluviómetro fue colocado cerca de las parcelas para controlar la caída real de lluvia.

b. Escurrimiento

Se calculó el escurrimiento a partir del volumen medido en las tinas de recepción de las aguas.

c. Pérdidas de tierra

Se calculó las pérdidas de tierra midiendo el peso de los sedimentos recolectados en las tinas.

d. Régimen de humedad del suelo

Se determinó el régimen de humedad mediante las mediciones *in situ* (entre 0 a 15 y 0 a 30 cm de profundidad) de la humedad volumétrica del suelo. Se instaló entre las parcelas el equipo de medición, un aparato TDR (Time Domain Reflectometry) de Soil Moisture Equipment. Por otra parte, se determinó la tensión capilar del agua en los mismos sitios. Estas mediciones se hicieron una a dos veces por semana, de junio a octubre.

2. RÉGIMEN Y EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS EN 1991

2.1. Régimen de las lluvias

La cantidad de lluvia registrada en las tres estaciones de abril a octubre de 1991 varió poco: de 779 mm en El Carmen, 775 mm en Matlahocan y 803 mm en Tlalpan. Sin embargo, fue superior en más de 100 mm a la cantidad de agua registrada en San Miguel Tlaixpan (Texcoco).

Las lluvias se reparten en tres períodos: abril-mayo, junio-julio, septiembre-octubre, por dos períodos secos (15 de mayo a 8 de junio; 10 a 30 de agosto). Las lluvias más intensas tuvieron lugar en junio-julio y en septiembre (Figura 15). Las lluvias fueron en la mayor parte inferiores a 20 mm y poco intensas. Sólo 6 a 8% de las lluvias fueron superiores a 20 mm e intensas (> 25 mm/h).

2.2 Erosividad de las lluvias

Las tres estaciones se distinguen por una cantidad de lluvias casi igual, una fuerte variación de la intensidad y de la erosividad de las lluvias (Figuras 15, 16, 17) que se expresa por la suma de los coeficientes EI₃₀ (de Wischmeier, en unidades americanas) y AI_m (de Lal) (Cuadro 19).

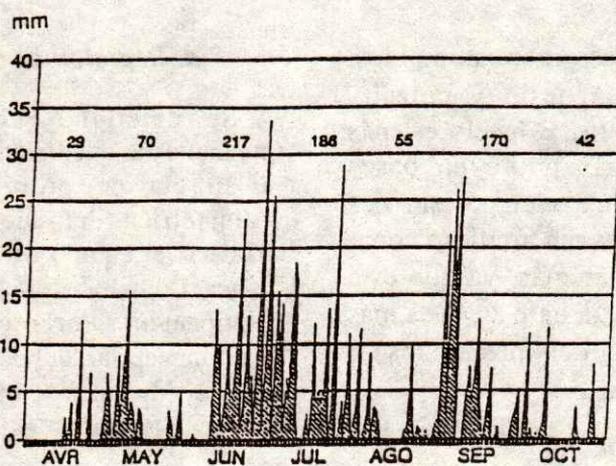


Figura 15. Precipitación en 1991 (abril a octubre), El Carmen.

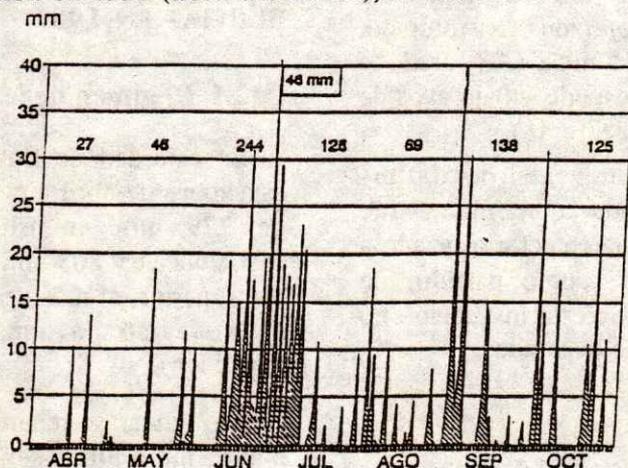


Figura 16. Precipitación en 1991 (abril a octubre), Matlahocan,

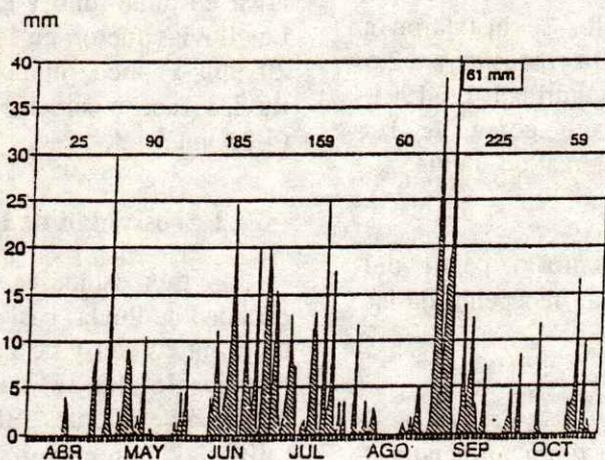


Figura 17. Precipitación en 1991 (abril a octubre), Tlalpan.

Cuadro 19. Características de las lluvias en los sitios de Tlaxcala.

Parcela	Lluvia		EI ₃₀ (U.Am)	AI _m
	H mm	N días		
El Carmen	779	120	234	26
Matlahocan	775	96	429	418
Tlalpan	803	112	357	330

Se puede ver que la erosividad aumenta con la irregularidad de las lluvias (inverso al número de días de lluvias).

Hay pocas lluvias verdaderamente erosivas. Pueden clasificarse en función de los valores de intensidad I₃₀(mm/h) y EI₃₀ (MJ/ha * mm/h) en:

- altamente erosivas "AE" para I₃₀ > 50 mm/h y EI₃₀ > 1000
- medianamente erosivas "ME" para I₃₀ ≈ 30-50 y EI₃₀ ≈ 400-1000
- poco erosivas "PE" para I₃₀ ≈ 25-30 y EI₃₀ ≈ 200-400

La estación El Carmen recibió seis lluvias erosivas: tres ME y tres PE, de las cuales cinco fueron en junio-julio (18, 26 y 29 de junio; 8 y 24 de julio) y una a principios de septiembre (6 de septiembre). En Tlalpan, hubo ocho lluvias erosivas, de las cuales fueron dos AE, tres ME y tres PE, que cayeron una el 1 de mayo, cuatro en junio-julio (16, 25 y 29 de junio y 21 julio) y tres al final de agosto-inicio de septiembre (31 de agosto-1 y 6 de septiembre). En Matlahocan, hubo 13 lluvias erosivas: una AE, tres ME y nueve PE; nueve en junio-julio (10, 17, 19, 23, 25 y 28 de junio; 4, 6 y 8 de julio) y cuatro en septiembre-octubre (1 y 5 de septiembre; 2 y 23 de octubre).

Se puede ver que las lluvias erosivas se concentraron sobre todo en junio-julio, cuando la cobertura del maíz estaba aún poco desarrollada. De hecho no hubo más que de tres a cinco eventos susceptibles de provocar una erosión seria y solamente uno o dos (en Matlahocan y Tlalpan) una erosión muy fuerte, mientras que en la estación cercana a Texcoco,

no hubo en 1991 más que una sola lluvia medianamente erosiva.

3. MEDICION DE LA EROSION EN 1990-1991

Las pérdidas de suelo se midieron en 1990 y en 1991 y se expresaron en toneladas por hectárea (t/ha). El cuadro siguiente presenta los resultados y el valor "r" del escurrimiento promedio anual (en porcentaje del volumen de lluvia) en función de los tratamientos de cada parcela (Cuadro 20).

3.1. Tepetate desnudo

Las pérdidas de tierra fueron un poco diferentes en los dos tipos de tepetate en El Carmen de 6 t/ha sobre t2 y en Matlahocan de 7 a 10 t/ha sobre t3. Esos valores sobre t3 son comparables a 5 t/ha obtenidos cerca de Texcoco para una menor erosividad de las lluvias. Los elevados valores, 41 a 51 t/ha sobre t3 obtenidos en Tlalpan, parecen anormales.

3.2. Tepetate arado y desnudo

Las pérdidas fueron muy elevadas: de 76-78 t/ha sobre t2 en El Carmen, 128 t/ha sobre t3 en Tlalpan (en Tlalpan hubo dos lluvias altamente erosivas). Estos valores son muy superiores a las mediciones hechas cerca de Texcoco, alrededor de 22 t/ha, debido al hecho que las lluvias aquí fueron mucho menos erosivas. La roturación del tepetate aumentó entonces, enormemente su erosividad.

Cuadro 20: Pérdida en tierra y escurrimiento en la región de Tlaxcala.

Parcela	Tepetate-tratamiento	Long	Pérdida en tierra		Escurrim. total valor r prom.	
			1990	1991	1990	1991
		m	---- t/ha ----		---- % ----	
El Carmen	t3 tepetate, desnudo	3	7.2	8.0	-	70
	t2 tepetate, desnudo	3	6.0	6.3	-	67
	t2 T, R, A, desnudo	22	76.0	78.0	-	34
	t2 T, R, AZ, maíz	22	9.0	9.0	-	11
Matlalohecan	t3 tepetate, desnudo	6	9.8	8.8	62	75
	t3 T, R, Tlax. *	6	17.0	26.0	52	61
	S Suelo, desnudo	22	18.0	47.0	30	34
	S Suelo, Sab.*	22	0.3	0.3	6	10
Tlalpan	t3 tepetate, desnudo	3	51.0	41.0	66	68
	t2 tepetate, desnudo	3	21.0	7.5	66	65
	t3 T, R, A, desnudo	22	-	128.0	-	43
	t3 T, R, AZ, maíz	22	2.6	26.0	8	21

Long.: longitud de las parcelas (* 2 m de ancho) - T: Tepetate - S: suelo - RR, A: roturado, arado
- AZ: arado-surcado - *Sav: pradera arbustiva - *Tlax: arbustos de tlaxistle.

3.3. Tepetate arado, surcado y sembrado con maíz

En 1990, tanto en el t2 de El Carmen como en el t3 en Tlalpan, las pérdidas de suelo se redujeron entre 9 y 2.6 t/ha, respectivamente. El efecto de los surcos y de la cobertura de maíz fue eficaz pero menos, sin embargo, que en la parcela cercana a Texcoco.

Pero en 1991, las pérdidas de suelo fueron elevadas: 23 t/ha en el t2 de El Carmen, 26 t/ha en el t3 de Tlalpan. Estos valores suponen que hubo una ruptura parcial de los surcos por efecto de las lluvias de fuerte intensidad ($I_{30} > 30$ mm/h y $EI_{30} > 400$).

3.4. Tepetate sembrado de tlaxistle

El tlaxistle (*Amelanchier denticulata*) es un arbusto frutal originario de esta región, su crecimiento es lento y su cobertura muy espaciada lo que explica una pérdida de tierra de

17-26 t/ha superior al tepetate desnudo, debido al laboreo de este material en la plantación.

3.5. Suelo no arado

Bajo una sabana arbustiva natural no hay erosión del suelo. Pero el suelo desnudo, sin trabajo, sufrió una pérdida en tierra de 18 t/ha en 1990, año poco erosivo y de 47 t/ha en 1991 debido a las lluvias altamente erosivas.

4. ESCURRIMIENTO EN 1990 - 1991

En 1990, los resultados fueron imperfectos a causa del mal funcionamiento de los pluviógrafos. Aquí se presentan únicamente los resultados de las parcelas de las estaciones de Matlalohecan y de Tlalpan. Aun en 1991, la medición de la tasa de escurrimiento "r" fue aproximada, ya que en los tinacos de recepción del agua escurrida de algunas parcelas, ésta se desbordó cuando cayeron las lluvias más fuertes.

En estas parcelas probablemente los resultados están subestimados.

En el tepetate desnudo t2 y t3, la tasa promedio anual de escurrimiento llegó a 70% pero alcanzó por lo menos 85% durante las lluvias más fuertes. Los trabajos de roturación y de aradura redujeron esta tasa a 34% en el t2 y a 43% en el t3. El efecto de los surcos y de la cobertura del cultivo de maíz restringió fuertemente el escurrimiento; en 1990 a 8% sobre t3 en Tlalpan, pero en el mismo sitio en 1991 la tasa se elevó a 21%. Sin embargo, en el t2 de El Carmen en 1991, la tasa fue de sólo 11%. Esos últimos valores indican un probable desbordamiento del escurrimiento por encima de los surcos y hasta una ruptura de los mismos en Tlalpan en 1991 debido a las fuertes lluvias. El escurrimiento fue muy elevado en la parcela sembrada de tlaxistle, cerca de 60% en 1991, cifra que corresponde a un poco menos del escurrimiento observado en el tepetate desnudo.

El suelo bajo sabana natural presentó una baja tasa de escurrimiento (10% en 1991) mientras que en el suelo desnudo la tasa aumentó a 34%.

5. CORRELACIÓN ENTRE LOS COEFICIENTES EI_{30} Y AI_m DE EROSIVIDAD Y LOS RESULTADOS

Los dos coeficientes, uno de Wischmeier: EI_{30} (en unidades americanas), el otro de Lal: AI_m , calculados para todas las lluvias de 1991, tienen valores parecidos. Son correlacionables con la pérdida de suelo, en un suelo desnudo.

De hecho, se observó una cierta correlación entre esos índices y la tasa de escurrimiento en el suelo desnudo (0.6) o bajo sabana (0.7) y con la erosión (0.5) y el escurrimiento (0.6) en el suelo desnudo (no bajo sabana).

En los tepetates t3 arado y desnudo, la correlación con la erosión fue buena (0.8), pero curiosamente muy débil (0.2) con el escurrimiento. En los tepetates t2 arado y desnudo, hubo una muy buena correlación con el escurrimiento (0.6) y la erosión (0.5).

En los tepetates arados, surcados y bajo cubierta de maíz, no existe una correlación con el escurrimiento. Tampoco hay correlación con la erosión en tepetate t2 en El Carmen, con lluvias moderadamente erosivas mientras que hay una bastante buena (0.7) en tepetate t3 en Tlalpan, debido a las lluvias altamente erosivas. El efecto de lluvias muy erosivas es determinante sobre la evolución de los tepetates cultivados, aun en presencia de surcos y bajo cobertura de maíz.

6. RÉGIMEN HÍDRICO DE LOS TEPE-TATES CULTIVADOS

El método de medición de humedad (T.D.R.) no es perfecto. Los resultados son aleatorios cuando el suelo está cerca de la saturación con agua. Además la separación de las dos sondas no es estrictamente constante hasta 30 cm de profundidad, lo que llevó a una cierta distorsión de los valores medidos de 0 a 15 y 0 a 30 cm de profundidad (en las parcelas de Tlalpan y de Matlahocan). La ventaja es que las mediciones se repiten frecuentemente en el mismo lugar sin perturbar el suelo. Finalmente, los resultados de humedad volumétrica son comparables a los obtenidos en las estaciones cercanas de Texcoco para el suelo de superficie (0 a 15 cm).

Se observó un paralelo entre el régimen de las lluvias y el contenido en agua del tepetate cultivado (0 a 15 cm) en la estación de El Carmen (Figura 18). En la profundidad (15 a 30 cm), la curva se desfasó ligeramente conforme al tiempo de latencia necesario de la infiltración del agua. El tepetate roturado, arado y cultivado con maíz, se comportó como un suelo permeable. La curva de tensión de humedad fue evidentemente inversa: la tensión aumentó en período seco hasta un valor cercano al punto de marchitez (16 a 20% de agua en volumen) para disminuir después en el período de lluvias frecuentes hasta llegar a un valor cercano a capacidad de campo y hasta un poco más (PF 2: 32 a 34% de agua en volumen). Se llegó a un límite de velocidad de infiltración debido al comportamiento menos permeable del subsuelo. Los resultados obtenidos

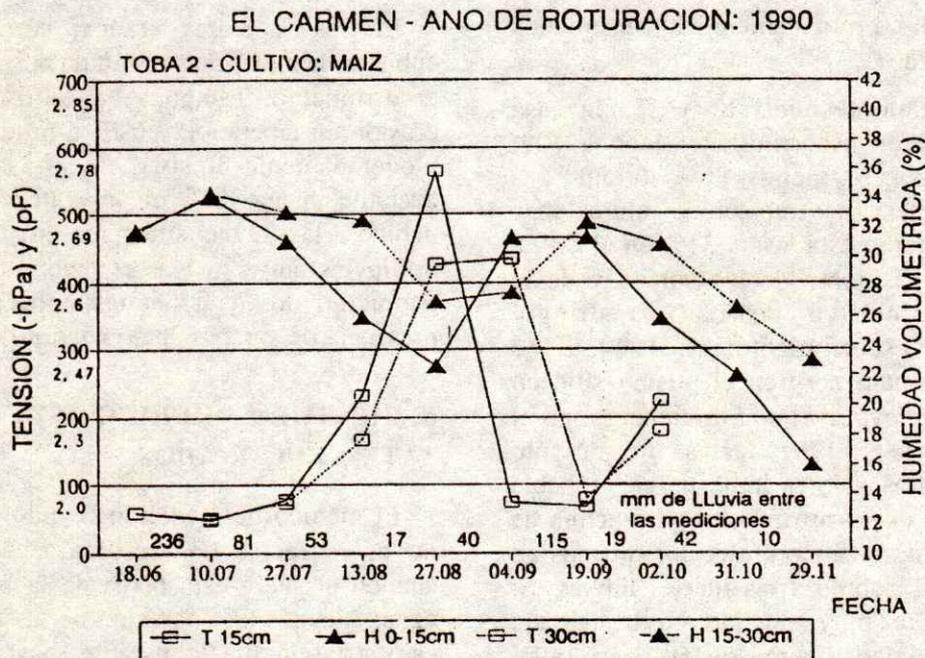


Figura 18. Evolución de la humedad (% vol.) y de la tensión del tepetate t2 sembrado en maíz en 1991, El Carmen.

con las parcelas de tepetate t3 cultivadas con maíz en El Carmen y en Tlalpan fueron similares. Sin embargo, se observa que el régimen hídrico es más regular, amortiguando las variaciones del régimen de las lluvias sobre un tepetate cultivado desde hace 5 años con relación al del primer año de cultivo (de textura más gruesa). Hay un mejoramiento de la reserva en agua y por lo tanto, de las propiedades agrícolas del tepetate luego de 5 años de cultivo.

C. COMPARACION ENTRE LAS ESTACIONES DE TEXCOCO Y DE TLAXCALA: CONCLUSIONES

Las cuatro estaciones estudiadas tienen una situación comparable: tepetates t2 y t3 de propiedades parecidas, altitud cercana a los 2 500 - 2 600 msnm, pendiente de 8-9%, régimen climático ustic con 6 meses de época seca. Pero la cantidad de lluvia y sobre todo la erosividad de las lluvias difiere enormemente.

I. EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS

La pluviosidad fue 100 mm más elevada en la vertiente de Tlaxcala con relación a la de Texcoco. La erosividad global de las lluvias en EI30 (u. amer.) aumentó de 200 en San Miguel Tlaixpan (Texcoco) a 234, 357 y 429, sucesivamente, en El Carmen, Tlalpan y Matlahocan. En región "tropical seca", el rango de variación es de 200 a 600 (Roose, 1981). La erosividad promedio observada en 1991 varía entonces de débil a mediana. De hecho, el número de lluvias efectivamente erosivas es reducido: es el número y la intensidad de esas lluvias lo que hace la diferencia entre parcela y otra: dos a tres lluvias medianamente erosivas en El Carmen, dos lluvias altamente erosivas y tres lluvias medianamente erosivas en Tlalpan; una lluvia altamente erosiva y tres lluvias medianamente erosivas en Matlahocan. Tan solo esas lluvias causaron 60 a 80% de la erosión total. Las lluvias altamente erosivas pueden clasificarse según los parámetros $I_{30} > 50$ mm y

El 30 20-50. Una sola lluvia altamente erosiva provoca una fuerte erosión.

2. ESCURRIMIENTO, PÉRDIDAS EN TIERRA, EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA EROSIVIDAD

Los tepetates t2 y t3 desnudos tienen un comportamiento que difiere poco. La tasa de escurrimiento promedio anual fue de 70% y alcanzó 80 a 90% durante las lluvias fuertes. La erosión fue de 5 t/ha/año en la estación menos erosiva (Texcoco) y cerca de 10 t/ha/año en la más erosiva (Matlalohcan).

La roturación de un tepetate reduce la tasa de escurrimiento casi la mitad (40%), provocando infiltración.

El efecto de roturación y de la aradura es variable según la erosividad de las lluvias: en la estación menos erosiva la tasa de escurrimiento fue de 10-20% y la erosión de 21 t/ha. En la región de Tlaxcala, para lluvias más intensas, el escurrimiento alcanzó 30-40%; y sobre todo la erosión aumentó rápidamente de 72-78 t/ha, con lluvias medianamente erosivas, a 128 t/ha con lluvias altamente erosivas. Sin acción anti-erosiva, el tepetate arado es entonces altamente erosionable.

El efecto del surcado en el suelo desnudo o sembrado con maíz, fue espectacular en la estación menos erosiva. El escurrimiento se redujó en 5% y la erosión a 1 t/ha. Pero el escurrimiento aumentó con la intensidad de las

lluvias: 10% en la estación moderadamente erosiva, 20% en la parcela más erosiva y sobre todo la erosión aumentó un poco, 23 t/ha en tepetate t2 en El Carmen y 26 t/ha en t3 en Tlalpan. A partir de cierto límite, el escurrimiento ya no fue retenido y existió el riesgo de ruptura de surcos y de erosión fuerte. El efecto de la cobertura de maíz, demasiado tardía, no es evidente.

El suelo bajo sabana arbustiva natural tuvo una baja tasa de escurrimiento: 10% y prácticamente nada de erosión. Sobre el mismo suelo, privado de su manto vegetal en la parcela más erosiva, la tasa de escurrimiento subió a 34% y la pérdida en tierra a 47 t/ha. El suelo arado y con surcos al desnudo en la parcela menos erosiva, tuvo una tasa de escurrimiento de 12% y una erosión de solamente 1 t/ha. El resultado es idéntico con el suelo sembrado con maíz. En caso de lluvia poco erosiva, el surcado fue suficiente para controlar escurrimiento y erosión.

Los resultados son comparables a las mediciones hechas en una región tropical seca, en suelos ferruginosos tropicales, con una pluviosidad anual promedio de 850 mm (Roose, 1981) en lo que concierne a la tasa de escurrimiento en suelo bajo sabana, 10-15%; en suelo desnudo: 35-43%; en suelo cultivado 10-40%; pero las tasas de erosión allí son menos elevadas que en los suelos y tepetates de México: suelo bajo sabana, 0.2-0.7 t/ha, suelo desnudo, 10-35 t/ha y suelo cultivado, 1-14 t/ha.

Cuadro 21: Tasa de escurrimiento en función del laboreo de la Cangahua (Ecuador), (Custode *et al.*, 1992)

Pluviosidad (promedio 660 mm. variación de 490-750 mm)	Tasa r		Erosión t/ha
	Promedio	máxima	
	%	%	
Cangahua desnuda*	20-34	60-90	96.6
Cultivo tradicional	7-14	30-55	18.9
Cultivo mejorado	2-9	9-55	4.5

*Con escarda superficial

Los mismos resultados son comparables con los obtenidos en Ecuador en cangahua, material parecido a los tepetates (Custode *et al.*, 1992) durante un período de 5 años (1987-1991) (Cuadro 21).

3. EVOLUCIÓN DE LOS ESTADOS DE SUPERFICIE

La observación de la evolución de los estados de superficie, así como de la porosidad de la permeabilidad y de la humedad en la parte superior del tepetate cultivado y del suelo, permitieron seguir el proceso que condiciona el comportamiento del escurrimiento y de la erosión. Dicho comportamiento se modificó rápidamente a raíz de la formación de costras superficiales; estructurales sobre los relieves y de depósito en las depresiones. La evolución es más rápida en el suelo que en el tepetate roturado. En este último, el proceso se acelera luego de la repetición del trabajo del suelo (escardas). Una fragmentación excesiva del tepetate, inferior a 2 mm, favorece el desmoronamiento de los agregados y el encostramiento. En cuanto a la infiltración, ella disminuye mientras que el escurrimiento y la erosión aumentan. Contrariamente a lo que se pensaba, el tepetate arado no fue perfectamente estable; se fragmentó, se asentó y se encostró. Sin algún manejo anti-erosivo (surco) es muy erosionable por lluvias fuertes, aunque el surcado puede ser insuficiente. El método mexicano de surcado del maíz, multiplicando las operaciones de fragmentación es peligroso. Convendría hacer el surco de una sola vez y sembrar directamente el maíz en el surco. Además, los surcos deberían ser compartimentados para reducir los riesgos de ruptura en caso de lluvias fuertes.

IV. REHABILITACION DE LA FERTILIDAD DE LOS TEPETATES

En el capítulo II, "Caracterización de los suelos y tepetates", evocamos las propiedades físicas y químicas de los tepetates que limitan su

fertilidad potencial, a saber: (1) su capacidad y su macroporosidad accesible al aire es demasiado restringida, lo cual tiene como consecuencia una baja permeabilidad y una restricción al desarrollo de las raíces de las plantas, y (2) su deficiencia de N y P asimilables.

En el capítulo III, "Erosión y conservación de suelos y tepetates", vimos cómo una fragmentación apropiada del tepetate mejoraba la infiltración y el almacenamiento de las aguas de lluvia y su macroporosidad, desarrollando así las propiedades físicas de un suelo agrícola.

Este cuarto capítulo trata: (1) de la determinación en el laboratorio de la fertilidad química potencial de los tepetates y de la dinámica de los elementos P y K; (2) de los estudios agronómicos en el campo en el medio rural, relacionado a la evaluación de los rendimientos de los cultivos y a las condiciones de adquisición de esas producciones.

1. DETERMINACIÓN DE LA FERTILIDAD QUÍMICA EN EL LABORATORIO.

Los resultados fueron presentados por Etchevers (1992). Los análisis se hicieron en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del CP y en el Laboratorio de Química del ORSTOM (Bondy).

1.1. Pruebas en macetas, determinación de los elementos limitantes.

a. Método.

Se empleó el método de Chaminade (1964) aplicado a cinco muestras de tepetate roturado (t2 y t3, con o sin CaCO₃) del Valle de México. La fertilidad se estimó de peso seco de cuatro cortes sucesivos de *Lolium perenne*.

Todas las muestras, incluyendo al testigo, recibieron una aportación de nitrógeno, porque se consideró que este elemento esta carencial. El testigo se comparó con macetas con fertilización mineral completa (N, P, K, Ca, Mg, microelementos), el testigo (+ N), y seis tratamientos, cada uno con un elemento faltante

Cuadro 22: Pruebas en macetas, determinación de los elementos limitantes.

Tratamiento	T	P	K	Ca	S	Micro	Tot	Mg
% R Tot.	26	28	106	107	108	108	100	-
TMS/J	70	79	295	312	305	307	289	297

T: Testigo -Tot: fertilización completa %R Tot.%de materia/Tot. -TMS/J: tasa de materia seca por día.

(P, K, Ca, Mg, S o microelementos). La eficacia de cada tratamiento fue calculada como el porcentaje de materia seca acumulada en relación con el rendimiento del tratamiento óptimo (con fertilización completa). Se calculó también la tasa promedio de materia seca producida por día o por cada tratamiento.

b. Cuadro de resultados.

El experimento mostro que hubo carencia de fósforo. Sin este elemento, como en el caso del testigo, la planta se desarrolló mal, aun en presencia de nitrógeno y de todos los otros elementos esenciales. Esos otros elementos (K, Ca, Mg, S, microelementos) fueron suministrados en cantidad suficiente por todos los tepetates probados (la deficiencia en Cu y Zn sugerido por el análisis químico no es detectada mediante este método). Nitrógeno y P fueron los dos elementos que más limitaron la fertilidad potencial de los tepetates (Cuadro 22).

1.2 Análisis químico de la dinámica del fósforo y del potasio.

a. Método y muestras.

a.1 Métodos

Se determinaron diferentes formas de los elementos P y K: soluble y directamente asimilable por la planta; lábil o intercambiable, fijado por adsorción sobre las arcillas y fácilmente convertible en formas solubles; no lábil, incluido en la fracción mineral, insoluble o lentamente convertible en forma lábil y luego soluble (reserva mineral).

Se hicieron los siguientes análisis: P y K total obtenido por fusión completa; P y K extraíble; disueltos en ácidos fuertes (HNO_3 - HClO_4); P lábil; disuelto en bicarbonato de sodio (pH: 8.5, Olsen); K intercambiable extraído con acetato de amonio (pH: 7); K soluble en el CaCl_2 (0.01 M); El P soluble fue demasiado escaso y no puede ser evaluado. El P y el K extraíbles son las reservas susceptibles de transformarse en P lábil o en K intercambiable y luego en formas solubles.

El análisis de la dinámica de los elementos P y K consistió en una incubación de una muestra de suelo seco y molido a 2 mm, humedecida a capacidad en el campo en estufa a 30° C después de ser tratada con fosfato monopotásico, (80 ppm de P y 100 ppm de K), durante dos meses.

La extracción de P Olsen luego de 1 día, sirve para calcular el valor bP. Este coeficiente corresponde al fósforo lábil después de 24 horas es decir el no adsorbido, por reacciones rápidas de carácter superficial. Los valores siguientes obtenidos en diversos intervalos de tiempo durante 2 meses o hasta 3 meses para algunas muestras, permiten calcular el kP índice del P residual después de un año aplicación del fósforo soluble. Las mediciones de K soluble y de K intercambiable permiten evaluar la relación de equilibrio entre las dos formas y seguir esta evolución en el curso del tiempo.

a.2. Muestras.

Se muestrearon tepetates cultivados y suelos a 0-20 cm de profundidad. Esas muestras (25 en total) se escogieron en función del tipo de

tepetate t2 o t3 y de su tiempo bajo cultivo en dos sitios: Hueyotlipan (Valle de Tlaxcala) y San Pablo (Valle de México). Para simplificar, los resultados se agrupan en períodos de año 0 (primer año de cultivo), 1 a 3, 4 a 5 y 9 a 15 años de cultivo. Los suelos de referencia se cultivan desde hace más de 15 años.

b. Resultados.

Para información previa, recordamos algunos valores de P y de K determinados en tres horizontes de tepetate (perfil P30) (Cuadro 23).

Esos primeros resultados recuerdan que hay poco fósforo mineral susceptible de solubilizarse y disponible. Pero hay mucho potasio del cual existe una parte extraíble importante y susceptible de transformarse en forma intercambiable soluble.

Los resultados del estudio de la dinámica de P y K son presentados en el Cuadro 24.

b.1. Fósforo.

El bP muestra que parte del fósforo agregado fue rápidamente adsorbido pero que una parte importante permanece en forma lábil: cerca de

Cuadro 23: Contenido en fósforo y en potasio de los tepetates t2a, t2b y t3.

	P tot	P ext	P res	K tot	K ext	K res
	----- % -----					
t2a	0.43	0.29	0.14	14.5	2.6	11.9
t2b	0.32	0.25	0.07	8.3	3.3	5.0
t3	0.48	0.36	0.12	7.0	2.4	4.6

P, K, tot: total; P,K, ext: extracto triácido (arcillas, óxidos); P, K, res: residuo insoluble (minerales primarios).

Cuadro 24: Análisis químico de la dinámica del fósforo y del potasio.

Tepetate Parcela	Años de cultivo	N. de muestras	pH (agua)	Fósforo				Potasio		
				P ext	P lábil	bP	kP	Kext	K sol.	K int.
				----- ppm -----				% -- meq/100 g --		
t3-H	0	6	7.1	190	3.0	0.58	0.71	2.1	0.44	1.52
	1-2-3	3	6.9	210	3.5	0.58	0.70	2.0	0.32	1.11
	4-5	2	6.6	220	4.8	0.61	0.71	2.0	0.33	1.12
	10-15	2	6.5	230	12.2	0.59	0.84	2.0	0.49	1.46
t3-SP	0	2	7.1	170	2.4	0.64	0.56	1.9	0.37	1.38
	4	1	7.5	370	51.5	0.55	0.78	2.9	1.85	4.50
	9	1	7.4	200	4.3	0.63	0.55	1.5	0.27	1.08
t2-H	0	2	7.7	100	2.7	0.72	0.73	2.3	0.53	1.96
	1	1	8.0	110	3.2	0.72	0.79	2.0	0.52	1.50
	4	1	7.3	120	5.2	0.61	0.64	2.0	0.57	2.01
Suelo H	3	2	6.4	330	37.1	0.58	0.76	1.6	0.47	1.07
	SP 16-60	2	6.4	260	11.0	0.56	0.58	1.8	0.14	0.53

H: Hueyotlipan; SP: San Pablo; Pext, K ext: P o K extraíbles; Plab: P lábil (Olsen); K sol.: K soluble; K int. K intercambiable; bP: Plab 1 día/P agregado (80 ppm); kP: límite Plab/P agregado en 1 año.

60% por el tepetate t3 y de 70% por el tepetate t2. Esa tasa es específica del material y parece no variar con los años de cultivo. El valor kP indica que gran parte del P lábil a las 24 horas, permanece como tal después de un año (aproximadamente 75%). Por lo tanto, no hay una transformación del fósforo lábil a la forma no lábil. Se puede afirmar, en consecuencia, que una fertilización fosfatada aplicada al tepetate será en su mayor parte disponible para las plantas.

Los contenidos en P extraíble y en P lábil aumentaron un poco en función del número de años de cultivo, aproximándose poco a poco a los niveles medidos en los suelos cultivados desde hace 30 años y más. Como práctica de cultivo y sería conveniente incrementar las dosis de fertilización durante el curso de los tres primeros años de cultivo, hasta alcanzar el nivel del equilibrio con la demanda de está y luego limitarlas a las necesidades de la planta cultivada.

b2. Potasio

Los contenidos en K extraíble (alrededor de 2%) y en K intercambiable (1 a 2 me/q100 g), son siempre un poco más elevados en los tepetates t2 y t3 que en los suelos cultivados. Sin ninguna aportación de este elemento, esos valores se mantienen o disminuyen un poco luego de 5, 10, ó 15 años de cultivo de los tepetates. La forma soluble representa un 30% de la forma intercambiable. No se esperan problemas de nutrición potásica en las plantas.

La reserva en potasio extraíble es suficiente para mantener la renovación de la reserva de potasio intercambiable durante numerosos años (por lo menos 30 años) como se observa en los suelos cultivados. Hay probablemente una adsorción selectiva¹ de K con relación al Ca sobre las arcillas de los tepetates, permitiendo así mantener valores elevados de potasio intercambiable.

¹ En el transcurso de la alteración del material volcánico, la relación K/Ca aumenta en el producto arcilloso.

2. ESTUDIO DE LA PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA DE LOS TEPETATES

Este estudio consistió inicialmente en una encuesta sobre la productividad agrícola en medio rural para determinar algunos factores del rendimiento, luego en una experimentación agronómica en parcela para evaluar la productividad potencial y finalmente en una encuesta sobre los sistemas económicos familiares (SEF) para analizar los factores económicos y la rentabilidad de la producción agrícola en tepetates rehabilitados en suelos agrícolas. Una síntesis de los primeros resultados relacionados a los dos primeros temas fue elaborada por Navarro y Zebrowski (1992a y b). Zahonero (1992) efectuó el tercer estudio.

2.1. Productividad agrícola en medio rural

a. Encuesta en 1989

Una primera encuesta se hizo en 1989 (Peña, *et al.*, 1990) con 14 parcelas cultivadas en maíz: cuatro en tepetate t2, 5 con t3, cuatro en una brecha volcánica alterada y una en suelo.

El rendimiento del maíz (caña y hojas, y grano) se comparó con varios factores de producción: tipo de tepetate, años de cultivo, fertilización (N, P), propiedades químicas del suelo (pH, C, N, P y K), efecto del clima (zona más seca, zona más húmeda) o de riego en zona seca y modos de cultivo. No hubo seguimiento agronómico sistemático. Los rendimientos de grano de maíz fueron los siguientes:

- en zona seca: en t2 y t3: 0 t/ha sin riego y 1.2 a 2.4 t/ha con riego (y fertilización).
- en zona húmeda: en t2 y t3: 2.2 a 3.8 t/ha luego de 5 años de cultivo; en brecha: 0.5 a 1 t/ha pero al inicio del cultivo.

Las primeras conclusiones de estudio son las siguientes: los tepetates t2 y t3, luego de 5 años de cultivo pueden suministrar buenas producciones en clima bastante húmedo o con riego complementario si este se ubica en zona

seca. En el curso de los primeros años los rendimientos son muy bajos en brecha. La fertilización utilizada por los campesinos es muy variable: no es eficaz más que si el aprovisionamiento de agua es suficiente y el manejo del cultivo bien conducidos. No hay diferencia significativa de productividad entre tepetates t2 y t3.

b. Seguimiento agronómico, 1990

Un seguimiento agronómico sistemático fue hecho en 1990 (Gasnier, 1991; Navarro y Zebrowski, 1991) en ocho parcelas con maíz (cinco en tepetates t3 y tres de suelo), cuatro parcelas con trigo (tres en t3 y una en suelo). El seguimiento contenía un análisis de componentes del rendimiento, así como de humedad y fertilidad química del suelo.

El factor principal que afectó el rendimiento de los cultivos de maíz, cuando la humedad del suelo fue suficiente como 1990, fue los años que el tepetate había sido cultivado: en el primer año 0.4 t/ha; en tercer año 2.2 a 2.5 t/ha; en quinto año 2.5 a 3.1 t/ha, mientras que los rendimientos en suelo cultivado desde hace mucho tiempo varían de 1.4 a 3.3 t/ha. Por lo tanto, la producción de maíz en tepetate se aproxima a la normalidad, en cuanto a rendimiento se refiera, a partir del tercer año de cultivo.

En cuanto al trigo, la producción fue casi normal desde el primer año; se obtuvo 1.5 t/ha; en tercer año 1.4 a 1.5 t/ha mientras que en suelo el rendimiento fue de 2.3 t/ha.

En 1991 se repitió el seguimiento agronómico por Zahonero y Navarro pero sus resultados aún no eran publicados en 1992.

2.2. Experimentación en parcela

a. Ensayos con tepetate t3 en Tlalpan en 1991

Las experimentaciones en el tepetate t3 de Tlalpan fueron realizadas en 1991 por Márquez, Zebrowski y Navarro (Márquez *et al.*, 1992).

Se abordaron dos problemas: (1) cómo aumentar la producción en primer año de cultivo de un tepetate, mediante una apropiada elección del cultivo y manejo adecuado; (2) cómo mejorar las propiedades de los tepetates mediante aportaciones de materia orgánica (e implícitamente de nitrógeno y fósforo) para desarrollar una macroestructura estable (mejor porosidad en el aire y buen almacenamiento del agua) en condiciones compatibles con la agricultura rural.

Las plantas cultivadas fueron: trigo, maíz, haba, frijol, veza (forraje y abono verde). La aportación de materia orgánica se hizo a la forma de estiércol de bovino, a razón de 40 t/ha (materia total). La fertilización mineral fue siempre de 60 kg/ha P₂O₅ y tres dosis de N: 0, 60 y 120 kg/ha. No se añadió nunca K.

En las parcelas de tepetate roturado se observó un gradiente de aumento de las partículas finas y de la profundidad de suelo blando en el sentido descendente de la pendiente. Se distinguieron dos casos conforme a la textura: la textura fina (< 2 mm) y gruesa (> 2 mm).

La pluviosidad fue suficiente durante toda la época de lluvias aunque haya habido un período menos lluvioso en agosto (100 mm) y en octubre (70 mm). El seguimiento de humedad del suelo (entre 15 y 30 cm) muestra que no se llegó al punto de marchitez en las partes con textura fina y abajo de las parcelas, mientras que las partes superiores de las parcelas con textura gruesa llegaron a este punto de marchitez a fines de agosto (luego de 2 semanas sin lluvias).

Dos factores del tepetate roturado influenciaron enormemente el rendimiento de los cultivos el primer año, particularmente del maíz y frijol: la textura gruesa y la no aportación de materia orgánica. En esos dos casos, los rendimientos fueron muy bajos. Mientras que la conjunción de los dos factores, textura fina + estiércol (40 t/ha), permitió mejores rendimientos (Figura 19). Únicamente la veza pudo asegurar una producción importante sin aportación de materia orgánica al suelo de textura fina.

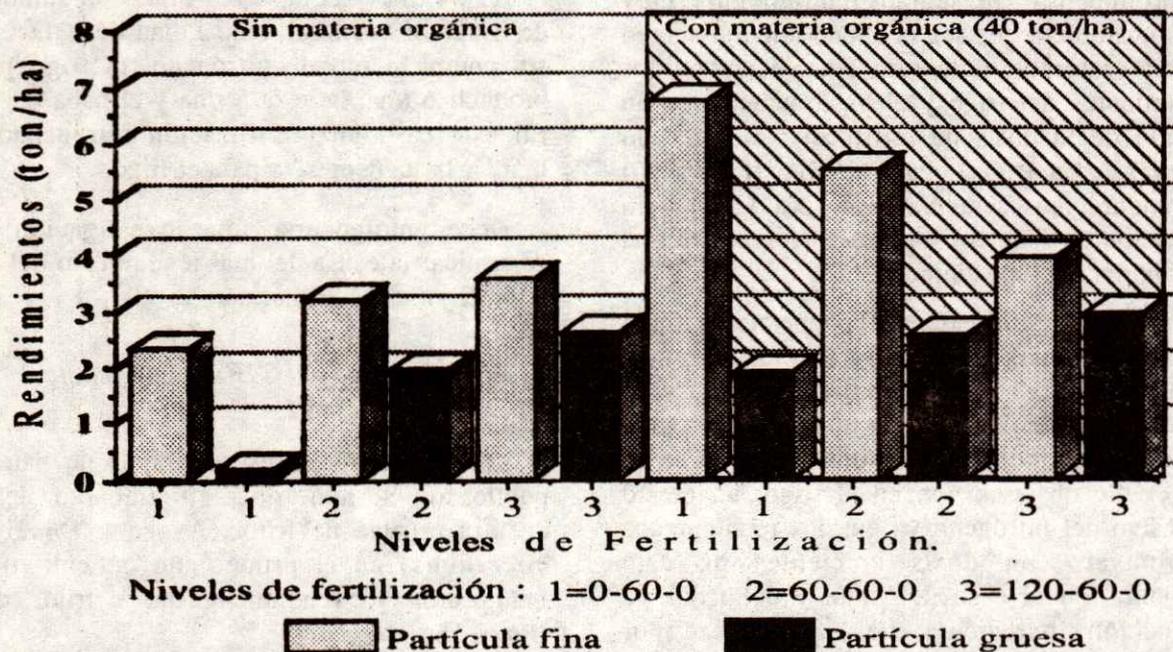


Fig. 19. Efecto de los tratamientos culturales sobre los rendimientos de trigo en grano (t/ha) en primer año de cultivo.

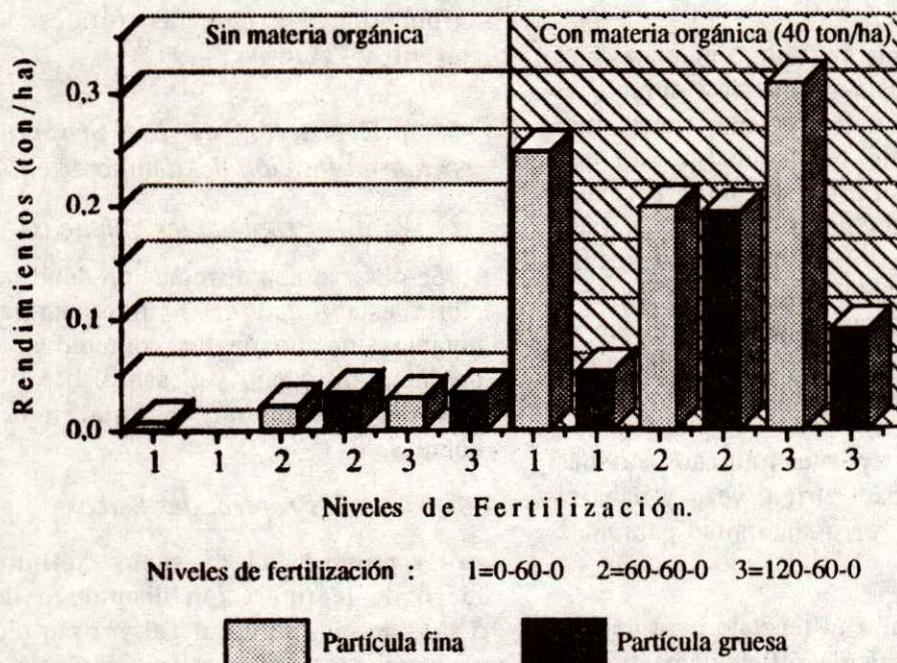


Fig. 20 Efecto de los tratamientos culturales sobre los rendimientos de maíz en grano (t/ha) en primer año de cultivo.

Sin aportación de estiércol el maíz y el frijol no producen o presentan rendimientos muy bajos cualquiera que sea el abono mineral aun en tepetate roturado y textura fina. Mientras los rendimientos del trigo y el haba aumentaron en función de la dosis de fertilizante nitrogenado (con 60 kg/ha P_2O_5). Para el trigo (Figura 20) los rendimientos aumentaron de 2 a 3.5 t/ha sin aportación de estiércol y alcanzan cerca de 6 t/ha con aportación de estiércol.

Con adición de estiércol el tepetate roturado de textura fina, hay siempre buenos rendimientos para los cultivos de trigo, de veza y de haba, cualquiera que sea la dosis de nitrógeno añadida (siempre que se suministren 60 kg/ha de P_2O_5). Se observa, aun en el trigo, un efecto depresivo del nitrógeno ya que los rendimientos disminuyen con dosis crecientes de este elemento. En el caso del maíz y del frijol, la producción incrementa, pero permanece por debajo de una producción normal: maíz 0.2-0.3 t/ha en lugar de 1.8 t/ha; frijol: 0.2-0.3 t/ha en lugar de 0.75 t/ha. Para esas dos plantas, la aportación de nitrógeno en esas dosis no mejora los rendimientos.

No es posible explicar porqué el maíz y el frijol tuvieron una baja producción durante el primer año en un tepetate roturado, con textura fina y suficientemente fertilizado, puesto que otras plantas (trigo, veza, haba, *Lolium perenne*) tienen una producción normal ahí. Hace falta orientar la investigación hacia una causa biológica (ausencia de un microorganismo vegetal simbiótico de esas plantas) ya que el desarrollo y el rendimiento se vuelven normales luego de 3 a 5 años de cultivo.

En conclusión: los tepetates roturados son más aptos para producir para trigo, veza y haba el primer año de cultivo, pero sin aptitud para maíz y frijol.

Es necesario preparar el tepetate para dejarlo con un tamaño de partícula suficientemente fina (< 2 mm). Sin suministro de estiércol, con una fertilización mineral de 120 kg/ha de N y

60 kg/ha de P_2O_5 el trigo puede producir 4 t/ha, la veza 4 t/ha y el haba 0.4 t/ha. Con suministro de estiércol (40 t/ha) y 60 kg/ha de P_2O_5 , pero sin complemento de nitrógeno, el trigo puede producir 6 t/ha, la veza 6 t/ha y el haba 0.8 t/ha. En este caso una fertilización nitrogenada es inútil y hasta depresiva para el trigo.

Debe emprenderse una investigación para determinar la causa del mal rendimiento del maíz y del frijol en el primer año.

b. Ensayos del CIFAP con tepetate t2 en El Carmen, en 1991

Los resultados de esos ensayos no han sido publicados. Se tomó nota, sin embargo, del uso de otra especie de frijol (Ayocote: *Phaseolus coccineus*) en el primer año de cultivo que redujo un mejor rendimiento que el frijol común (*Phaseolus vulgaris*).

2.3. Análisis de los componentes del rendimiento y de los factores de producción.

Esto es una síntesis primaria del seguimiento agronómico de parcelas rurales hecha por Navarro y Zebrowski (1992).

a. Evolución de las propiedades del tepetate en función del tiempo de cultivo.

a.1. Propiedades químicas.

Se observa una disminución débil del pH, una cierta estabilidad de K intercambiable y un notable aumento de los contenidos en materia orgánica, nitrógeno y P asimilable (Figura 21). Hay por lo tanto una mejoría en la fertilidad química.

a.2. Propiedades físicas

La profundidad de suelo mullido obtenida luego de la roturación disminuyó después de 5 años de ser cultivado. Tal vez por el efecto del asentamiento y la erosión. Hay que hacer una roturación y/o una aradura profunda cada 5 años.

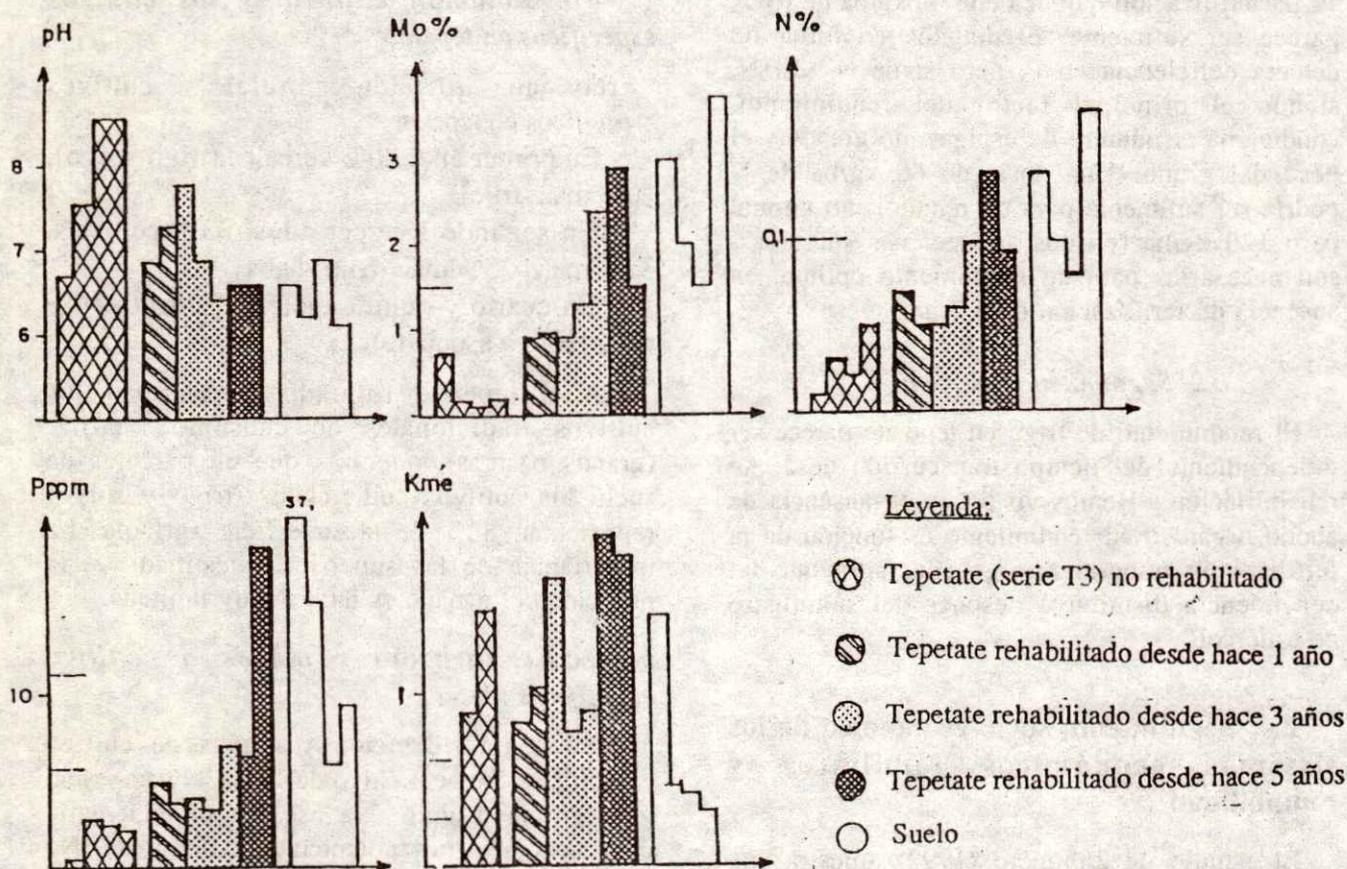


Figura 21. Evolución de las propiedades químicas de los tepetates en función de la edad de su reincorporación a la agricultura (parcelas de 1990).

La distribución de tamaño de partículas de los tepetates bien roturados contiene por lo menos 50% de fracción < 2 mm. La estructura permanece estable luego de 5 años de cultivo. Pero no se ha demostrado la importancia del abono orgánico en el mejoramiento de la estructura de estos materiales.

b. Análisis de los componentes del rendimiento y de los factores de producción

b.1. Seguimiento del maíz

En el primer año de cultivo, el bajo rendimiento del maíz se explica por el reducido número de plantas. Hay un factor que limita el

desarrollo de las plantas jóvenes. En ausencia de una causa física o química, en el caso de los tepetates bien preparados hay que pensar en una razón biológica. En efecto, con el tiempo, el número de plantas y el rendimiento aumentan para alcanzar valores normales luego de 3 a 5 años de cultivo.

La disponibilidad de agua para el maíz puede ser un factor limitante, ya sea al inicio del cultivo o bien el momento de la florescencia (sefufa corta de agosto). Algunas prácticas de cultivos tales como: el contreo (surcado compartimentalizado), el mulching, los cultivos asociados o intercalados (maíz-frijol o maíz-haba) deberían ser generalizados.

La fertilización química con 60 kg/ha de P_2O_5 parece ser suficiente. El diagnóstico foliar no detecta deficiencia en P, pero sí de N. El N, siendo el principal factor del rendimiento, condiciona el número de espigas, de granos y el peso del grano. Una dosis de 60 kg/ha de N podría ser suficiente para un rendimiento normal pero 120 kg/ha (en dos aplicaciones sucesivas) son necesarias para un rendimiento óptimo, en ausencia de fertilización orgánica.

b.2. Seguimiento del trigo

El rendimiento de trigo en tepetate parece ser independiente del tiempo transcurrido desde su rehabilitación. Hemos visto que en ausencia de abono orgánico su rendimiento es función de la fertilización mineral nitrogenada, pero que tal dependencia disminuye después del suministro de estiércol.

2.4. Seguimiento socio-económico de los sistemas económicos familiares y rentabilidad

El estudio de Zahonero (1992) muestra una cierta especificidad de la agricultura en los tepetates roturados.

a. El tepetate: un recurso en tierra agrícola para las pequeñas explotaciones

El tepetate es un recurso de tierra agrícola en las pequeñas explotaciones. Representa el 100% de la superficie agrícola útil (SAU) en las explotaciones de menos de 5 ha, 32% en las de 5 a 10 ha, 15% en las de 10 a 20 ha, y menos de 5% en aquellos con más de 20 ha.

Los tepetates roturados son cultivados en terrazas, de acuerdo al sistema "metepantle", que ya se practicaba durante la época prehispánica. Es un sistema eficaz para reducir la erosión. Para los trabajos de roturación profunda y de terraje aprovecha la ayuda de los servicios de maquinaria estatales, pero los campesinos pagan de 80 a 90 % del costo.

b. Rotación cultural y los cultivos específicos en tepetate

Hay una rotación cultural y cultivos específicos en tepetate:

- En primer año: 80% cereales (trigo-sorgo), 20% maíz-frijol
- En segundo y tercer años: 33% cereales, 32% maíz, 35% maíz-frijol-haba
- En cuarto y quinto años: 50% trigo, 50% maíz (sólo o asociado).

En el tepetate roturado predominan los cultivos tradicionales de consumo familiar (granos básicos), mientras que en parcelas de suelo los cultivos comerciales (trigo y sorgo) representan 82% de la superficie agrícola. La importancia de las superficies destinadas a la nutrición del ganado es nula o muy limitada.

c. Fertilización y modos de cultivo específicos

Hay una fertilización y modos de cultivo específicos. Para el cultivo del maíz, el campesino hace en mayo-junio una escarda suplementaria para economizar un tratamiento con herbicida. No hace una segunda aplicación de nitrógeno en junio, pero suministra más fósforo que en suelo normal. Finalmente, aplica al suelo 40 kg/ha de N en lugar de 60-70 y 50 kg/ha de P_2O_5 en lugar de 25-30.

d. Costos de la rehabilitación

Los costos de rehabilitación de tepetates son rentables en 8 años. La roturación y el terraje (sin aportación de fertilizantes) cuestan al campesino (descontando la participación del Estado), alrededor de 3 500 nuevos pesos mexicanos, mas N\$ 500 para una nueva roturación luego de 5 años; o sean N\$ 4 000¹ (8 000 FF, 1 200 ECU o 1 400 \$US) que se amortizan en 8 años. Si se añaden los costos de cultivos acumulados durante los 8 años, que son N\$ 7 000, hay que invertir entonces N\$ 11 000. El valor acumulado de las cosechas durante 8

¹ Zebrowski estima esos costos en 1991 entre N\$ 5 y 8 000.

años sería de N\$ 11 500. Por lo que el monto de la inversión puede, según Zahonero (1992), amortizarse en 8 años. Después de este período la producción será beneficiaria para el campesino.

e. Plusvalía de los tepetates rehabilitados en suelos agrícolas

Hay una plusvalía de los tepetates rehabilitados para ser convertidos en suelos agrícolas. El valor inicial del tepetate estéril es de N\$ 2 000, mismo que alcanza N\$ 7 000 cuando es tierra agrícola fértil. En seis años de cultivo, la plusvalía neta sería de N\$ 3 500.

f. Balance de rentabilidad de las inversiones

Se trata de la rentabilidad de la inversión financiera para pagar los gastos iniciales de la roturación y de la remoción de los tepetates.

Las explotaciones pequeñas de menos de 10 ha son de autosubsistencia y no generan suficiente capital para invertir. Tampoco pueden solicitar préstamos. Necesitan una ayuda del Estado o un aporte salarial exterior de los miembros de la comunidad agrícola (6 meses de sueldo mínimo/ha) para poder realizar este trabajo de rehabilitación de tierras tepetatasas.

Las explotaciones de 15 ha y más con cultivos comerciales y eventualmente un complemento de salarios exteriores, pueden generar bastantes recursos financieros propios para pagar la inversión.

En conclusión, la revalorización agrícola de los tepetates tiene un carácter específico. Los cultivos de granos básicos predominan y las prácticas de cultivo son apropiadas. La rehabilitación de los tepetates crea un recurso en tierra necesario para las pequeñas explotaciones agrícolas. Puede ser rentable a menor costo, si la explotación deja bastantes recursos financieros propios para invertir, ya sea de cultivos comerciales en las unidades de producción superiores a 15 ha de SAU o bien mediante una aportación de salarios exteriores de los miembros de la comunidad agrícola. Una ayuda del Estado

siempre es útil y hasta necesaria para financiar a costo mínimo, los trabajos de roturación y de terraceo.

CONCLUSIONES

Los principales resultados del estudio de los tepetates de México y de Tlaxcala son: la cartografía de los suelos y los tepetates, la caracterización de los tepetates, el impacto de los trabajos de rehabilitación agrícola sobre la susceptibilidad de los tepetates a la erosión, la evolución de sus propiedades físicas y químicas, el reconocimiento de los principales factores químicos de su fertilidad potencial, la estimación de su productividad agrícola en medio campesino, el análisis de los componentes de rendimiento de los cultivos, los factores físicos de la producción y finalmente los factores socio-económicos que intervienen en la revalorización y la rentabilidad de las parcelas.

1. CARTOGRAFÍA DE LOS SUELOS Y TEPETATES.

Se levantaron dos mapas a escala 1/50 000:

- 1) la hoja de Texcoco correspondió a la vertiente noroeste de la Sierra Nevada, y cubre aproximadamente 1 023 km²,
- 2) la hoja de Apan, correspondió al noreste de la Sierra Nevada y cubre cerca de 700 km². De esos mapas y de los estudios edafológicos sobresalen los hechos siguientes:

Los suelos se distribuyen en climotoposecuencias sobre las vertientes y piedemontes de la sierra. La naturaleza de los suelos depende de una cierta zonalidad climática, que va de un régimen húmedo en la cima a uno subárido en la planicie. De la parte superior hacia la planicie, se observan sucesivamente: andosoles, suelos cafés eutróficos, suelos cafés vérticos, suelos cafés subáridos con costra calcárea. Los suelos se forman sobre una sucesión de depósitos volcánicos piroclásticos (cenizas y tobas) de edad cuaternaria reciente. Son suelos jóvenes y complejos.

Sobre los piedemontes y glaciares con un clima con época seca marcada, los suelos contienen dos o más horizontes endurecidos, llamados tepetates. Algunos de los tepetates sobre la parte superior y media de los piedemontes, son friables en el estado húmedo y tienen un comportamiento de fragipán. Otros, en la parte baja del piedemonte y sobre los glaciares, tienen una costra calcárea y permanecen duros (horizontes petrocálcicos) aun húmedos.

En la región de Texcoco, los suelos con tepetates cubren 420 km² o sea 41% de la superficie total. Estos horizontes endurecidos se localizan en casi todos los piedemontes, planicies y glaciares, y se dedican al cultivo tradicional de granos básicos. Cerca de la tercera parte de esos suelos están erosionados y el tepetate aflora. La superficie estéril por esta razón cubre alrededor de 14,200 ha. Esto es grave, ya que afecta a las tierras dedicadas principalmente al cultivo de granos básicos y ocupadas en su mayoría por una población agrícola. De esta superficie estéril, desde hace unos veinte años a la fecha, cerca de 5 000 ha han sido restauradas, pero 4 100 ha lo fueron para controlar la erosión (reforestación) y solamente 800 ha acondicionadas en terrazas para producción agrícola. Quedan entonces 9 000 ha que recuperar si es que la erosión no continúa avanzando.

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS TEPETATES

La naturaleza y el origen de los depósitos piroclásticos fueron precisados en este trabajo. Son cenizas finas, riolíticas o dacíticas, muy silíceas y alcalinas (ricas en Na y K).

Se observa una sucesión estratigráfica de depósitos del Holoceno, llamadas H y T1, luego una serie de depósitos del Pleistoceno superior T2, T3, T4, etc. Esos depósitos fueron datados: el T1 tiene menos de 10 000 años BP, el T2 tiene entre 10 000 y 20 000 BP, y el T3 más de 20 000 BP.

Las cenizas volcánicas se alteraron y se convirtieron en suelo. Cada uno de los depósitos

T2 y T3 contiene horizontes blandos parecidos a horizontes B y uno o dos horizontes endurecidos con comportamiento de toba, parecidos a los horizontes C. Estos últimos horizontes, que son llamados "tepetates", raramente pueden presentar una toba casi inalterada.

La analogía de esos depósitos con las formaciones de loess se volvió a discutir. Las primeras tienen las características típicas de los depósitos de cenizas volcánicas formados por peleanas, que han experimentado cierta alteración meteórica de los cristales a minerales arcillosos. Sin embargo, carecen de la textura específica de los loess, aunque se hayan observado localmente modificaciones eólicas o coluviales superficiales.

La clave para clasificar tepetates ya no debe ser el color. Todos los tepetates no son duripanes. Los tepetates deben clasificarse dentro de una serie estratigráfica: T2, T3, etc. y por su comportamiento de fragipán u horizonte petrocálcico. Se pueden agregar otras características. La mineralogía: en T2 hay abundancia de hipersteno y esmectitas mientras que en T3 predomina la hornblenda y la haloisita. El color: blanquecino o gris en T2, café o café rojizo en T3. La abundancia de haloisita en T3 significa una alteración meteórica en clima húmedo, la de esmectita en T2 en clima más árido, lo que demuestra que hubo cambio climático entre 10 y 20 000 años BP.

La formación de los horizontes endurecidos se precisó mediante el análisis micromorfológico. Los tepetates tienen rasgos heredados de una toba volcánica fina y rasgos propios a la pedogénesis (tubos biológicos, redistribución de arcilla, acumulación de óxido de hierro, de sílice o de material calcáreo). Su cementación es controvertida. Probablemente se debe a un depósito de sílice en los fragipanes y de material calcáreo en los petrocálcicos. El origen de la sílice en la matriz puede ser consecuencia de una primera alteración hidromagmática durante la constitución de la toba. Un tepetate sería una toba modificada por la pedogénesis donde los vidrios

se alteraron a arcilla, lo cual provoca una acumulación de sílice y/o de material calcáreo.

Las propiedades físicas mayores de los tepetates-fragipanes son: comportamiento duro en el estado seco pero friable y plástico en estado húmedo, estructura masiva y fragmentada en fisuras de retracción, fuerte expansión o retracción, textura de arena arcillo-limosa o de arcilla arenosa, por lo menos con 25% de arcilla, porosidad global superior a 40% pero baja macroporosidad (< 10%) y conductividad hidráulica muy lenta, apreciable microporosidad (> 30%) y reserva en agua útil para la planta de por lo menos 10% en volumen. El tepetate petrocálcico es mucho más duro, rígido y contiene menos arcilla.

Las principales propiedades químicas de los tepetates-fragipanes son: pH 7 a 8.5, poco o nada de material calcáreo, capacidad de intercambio catiónico efectiva de por lo menos 15 meq/100g y siempre saturada, abundancia de Ca, Mg y K intercambiables pero deficiencia en P total y en P extraíble (P-Olsen) (< 3 ppm), escasa o nula materia orgánica y N. Los tepetates-petrocálcicos son calcáreos (> 5% de CaCO_3) y más alcalinos.

Los tepetates-fragipanes tienen propiedades favorables para constituir un suelo agrícola pero también características limitantes mayores: compactidad, macroporosidad y conductividad hidráulica bajas, escasez de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. Estos factores limitantes constituyen la causa de su esterilidad.

3. SUSCEPTIBILIDAD A LA EROSIÓN DE LOS TEPETATES CULTIVADOS

Nuestro estudio sólo se refiere a los tepetates-fragipanes (t2 y t3, poco o no calcáreos). Las observaciones se hicieron en cuatro sitios, en condiciones parecidas de altitud (2 500-2 600 msnm), de pendiente (8-9%) y de clima (lluvias de 700 a 800 mm/año con 6 meses de época seca de noviembre a abril).

3.1. El agregado óptimo para un suelo agrícola estable

Los fragmentos de tepetate superiores a 2 mm son estables pero los inferiores a 0.5 mm muy inestables. El agregado óptimo tiene un diámetro de 2.4 a 3.4 mm. Es el que asegura la mejor estabilidad estructural, drenaje, porosidad y reserva útil a la planta.

En la práctica es difícil crear un agregado homogéneo aproximado al óptimo mediante la roturación, aradura profunda y pulverización con discos. Se obtiene un predominio de agregado óptimo, pero también fragmentos gruesos y una fracción demasiado fina e inestable.

3.2. Erosividad de las lluvias

La erosividad de algunas lluvias, más que la precipitación anual es lo que determina la erosión de los tepetates. En 1991, hubo una diferencia notable de lluvia: 669 mm en la estación de San Miguel Tlaixpan (SM) al oeste de la Sierra Nevada y 775-803 mm en las tres estaciones al este de la Sierra a saber, El Carmen (EC), Tlalpan (TL) y Matlalohcan (MA).

La erosividad de las lluvias expresada en EI_{30} (en unidades americanas, sumadas durante la época de lluvias) varió enormemente de una estación a la otra: cerca de 200 en SM al oeste de la Sierra, 230 en EC, 360 en TL y 430 en MA al este de la Sierra. Paralelamente el número de lluvias erosivas aumentó de 2 a 6 y de 8 a 13. Y sobre todo el número de lluvias mediana ($I_{30} > 30$ mm/h) y altamente ($I_{30} > 50$ mm/h) erosivas aumentó respectivamente de 1 a 3 y de 4 a 5.

Esto es importante para entender la variación de la erosión de una parcela a la otra. Era, necesario entonces tener cuatro estaciones de medición.

3.3. Tasas de escurrimiento y de pérdida en tierra

Se reportan esencialmente los resultados obtenidos en el segundo año de cultivo en el tepetate t3 de la parcela SM, en el primer y segundo años de cultivo en el tepetate t2 en la parcela EC o t3 en la parcela TL, con tepetate t3 y en suelo en la parcela MA. De los resultados obtenidos, se sacaron las siguientes conclusiones:

- No hay diferencia significativa del comportamiento de los tepetates t2 o t3. La erosividad de las lluvias y el tratamiento de cultivo son determinantes.

- La roturación permite una buena infiltración, reduce a la mitad el escurrimiento y frena la erosión. En tepetate cultivado (roturación, arado y pulverización) y desnudo, la tasa de escurrimiento se reduce ligeramente pero varía de 10-20% a 30-40% según la erosividad de las lluvias. Sin embargo, la fragmentación del tepetate favorece la erosión y una pérdida considerable de suelo. Dicha erosión pasa de 21 t/ha (SM) en las parcelas menos erosivas a 72-78 t/ha (EC) para alcanzar los 128 t/ha (TL) en las más erosivas. Un tepetate arado es entonces inestable y fácilmente erosionable.

- El efecto del surcado con o sin cultivo de maíz, es muy eficaz en caso de lluvias poco erosivas (parcela SM): la tasa de escurrimiento es de 5% y la erosión de 1 t/ha solamente. Pero este efecto es menor cuando la erosividad de las lluvias aumenta: el escurrimiento y la erosión aumentan a 10% y 23 t/ha en estación medianamente erosiva (EC) y a 20% y 26 t/ha en la más erosiva (TL). Hay entonces una ruptura de los surcos lo que provoca erosión a partir de un cierto umbral de erosividad de las lluvias ($I_{30} > 30$ mm/h).

- El efecto protector del cultivo de maíz no es significativo en presencia del surcado. Este cultivo es tal vez demasiado tardío para ser eficaz.

- En un suelo natural, la vegetación de sabana limita a 10% la tasa de escurrimiento y a cero la de erosión. Pero sobre el mismo suelo desnudo y sin laboreo, en la estación más erosiva (MA), el

escurrimiento sube a 34% y la erosión a 47 t/ha. Un suelo areno-arcilloso desnudo es, entonces, más inestable y erosionable que un tepetate no roturado.

- El efecto del surcado en un suelo arado con o sin cultivo de maíz fue muy eficaz en la estación poco erosiva (SM), limitando el escurrimiento a 12% y la erosión a 1 t/ha. Pero dada la inestabilidad del suelo, los surcos no resistieron a las lluvias fuertemente erosivas.

Esos resultados son comparables con los medidos obtenidos en la Cangahua (toba comparable al tepetate) en Ecuador, en pequeñas parcelas y necesitan ser verificados en campos de dimensiones más realistas (0.1 a 1 ha). Además, esos valores pueden evolucionar en función del tiempo de la siembra y de la variabilidad de la erosividad de las lluvias de un año a otro.

3.4. Evolución del estado de superficie de un tepetate cultivado

En una parcela surcada a la manera mexicana¹ y cultivado con maíz, el estado de superficie evoluciona después de cada una de las tres prácticas sucesivas de cultivo. La observación se hizo entonces en tres períodos sucesivos. Los resultados son los siguientes:

- Siempre hay una formación de una costra, inicialmente estructural, sobre el surco (efecto splash de la lluvia) y después un depósito en el fondo del surco cuando la infiltración es bastante reducida para acarrear el producto de la erosión superficial del surco.

- Esta evolución es progresiva en el curso del primer período de siembra en la primera escarda. Luego se acelera en el transcurso del segundo y tercer período debido a la reducción de tamaño de los agregados y al aumento de la erosividad de las lluvias.

- El desmoronamiento de los pequeños agregados, inferiores a 2 mm, es el responsable del encostramiento. Cuanto más aumenta esta

¹ Siembra en el surco, luego inversión del camellón para la acolladura del maíz en dos escardas sucesivas.

fracción, más rápido es el proceso de encostramiento.

- La manera mexicana de cultivar el maíz es peligrosa: al fragmentar demasiado el tepetate lo hace inestable. Haría falta una sola operación de surcado y de división de los espacios entre los surcos para reducir el escurrimiento y los riesgos de erosión en caso de fuertes lluvias.

- Mientras que en el tepetate cultivado el desmoronamiento de los agregados es parcial y progresivo, en el suelo arado, el proceso es más rápido y el desmoronamiento de los agregados es casi total, conllevando a la formación de una costra de depósito más espesa y más compacta.

- En tepetate arado y no surcado, la costra se generaliza, el escurrimiento no se frena y se desarrolla una erosión en forma de cárcavas.

3.5. Evolución de las propiedades físicas de superficie de un tepetate cultivado

Hay una disminución progresiva de la porosidad, sobre todo la macroporosidad y de la conductividad hidráulica del tepetate arado, a lo largo de la época de lluvias. La porosidad global aumentó de 45% a 58% luego de la aradura para después bajar progresivamente a cerca de 50% por efecto del desmoronamiento de los agregados y del asentamiento del suelo. Así mismo, la velocidad de infiltración de 1 mm/h se elevó a 100 mm/h sobre el surco y a 50 mm/h en el fondo del surco, para luego regresar progresivamente a 10 mm/h sobre el surco y solamente a 2 mm/h en el fondo del surco.

El régimen de humedad de un tepetate cultivado es comparable al de un suelo arcillo-arenoso normal. Sigue con un bajo tiempo de latencia, el régimen de las lluvias. Hay entonces una buena infiltración del agua. Al contrario en un tepetate natural al desnudo, la humedad permanece durante 60% del tiempo (de la época de lluvias) por debajo del punto de marchitez, de ahí su esterilidad. En un tepetate roturado burdamente, la humedad alcanza el punto de marchitez durante la época seca corta. Mientras que el de textura fina (50% de los agregados de tamaño < 2 mm) amortiza este efecto de drenaje

excesivo, manteniendo una reserva en agua útil para la planta durante la disminución de las lluvias. Este amortiguamiento es más sensible luego de 5 años de puesta en cultivo. Entonces, las propiedades hídricas del tepetate cultivado se mejoran con el tiempo.

4. FACTORES QUÍMICOS Y FÍSICOS DE FERTILIDAD DEL TEPETATE

Se trata de desafíos para el desarrollo de los cultivos y del mejoramiento de los mismos.

4.1. Fertilidad química potencial

Los tepetates son neutros o ligeramente alcalinos, bien provistos de Ca, Mg y K intercambiables. Pero tienen carencia de nitrógeno y deficiencias en fósforo.

Las pruebas en maceta confirmaron que la deficiencia en fósforo es, después de la de nitrógeno, el factor más limitante para el desarrollo vegetal. Sin embargo, cuando hay un suministro de fósforo, este elemento es rápidamente pero parcialmente absorbido por las arcillas bajo una forma lábil, susceptible de ser extraída por la planta. Por lo tanto, la fertilización puede ser limitada a las necesidades de la planta cultivada en una dosis económica.

El potasio no es susceptible de retrogradación o sea de fijación fuerte. Hay una transformación suficientemente rápida de las formas minerales en formas intercambiables y solubles para mantener durante largo tiempo una buena nutrición de las plantas. El suministro de fertilizante potásico es inútil a corto y mediano plazo.

4.2. Evolución de las propiedades químicas y físicas de un suelo cultivado

Hay un aumento del carbono orgánico, una ligera disminución del pH y un aumento de los contenidos en nitrógeno y fósforo asimilable, pero el potasio permanece estable o disminuye poco, a medida que transcurre el tiempo de cultivo.

El tamaño de partículas evoluciona poco y conserva por lo menos 50% de fracción fina (< 2 mm), a pesar del desmoronamiento parcial de los agregados y de la erosión de las partículas finas. La reserva de agua útil se mejora un poco o permanece estable. Pero la porosidad, sobre todo la macroporosidad, disminuye. El suelo se asienta y la profundidad útil se reduce. Se considera que hay que hacer una roturación y una labor profunda después de cinco años de cultivo.

La eficacia de un abono orgánico para mejorar la estabilidad de los agregados, de la macroporosidad y de la reserva en agua útil no fue estudiada.

5. PRODUCTIVIDAD AGRÍCOLA DEL TEPETATE CULTIVADO

La productividad del maíz es buena (de 2.2 a 3.8 t/ha) en tepetate-fragipán después de 5 años de cultivo si el clima es suficientemente húmedo. El suministro de agua es un factor de primera importancia para el éxito del cultivo.

En el primer año de cultivo el rendimiento del maíz es siempre muy bajo (< 0.4 t/ha), pero aumenta en función del tiempo: 1 a 1.5 t/ha en segundo año, 2 a 2.5 t/ha en tercer año (valor que se aproxima a la normal); y es de aproximadamente 3 t/ha en el quinto año.

Por lo contrario, la productividad del trigo es considerable (1.5 t/ha) desde el primer año (el valor normal en la zona de 2 a 2.5 t/ha).

El análisis de los componentes del rendimiento permitió abordar el problema de productividad del maíz. En primer año, el número muy reducido de plantas es lo que restringe la producción. La deficiente emergencia del maíz, en contraste con otras gramíneas que tienen un desarrollo normal, hace pensar en la existencia de un factor limitante de tipo biológico. A partir del tercer y quinto años de cultivo, el desarrollo del maíz es normal. Con una fertilización fosfatada de 60 kg/ha de P_2O_5 , hay una buena correlación entre los componentes de un rendimiento (número de

espigas, número de granos, peso de 100 granos) y dosis crecientes de suministro de nitrógeno. Sesenta kilos de N por hectárea son suficientes para una producción normal y 120 unidades para una óptima. También hay una correlación con el suministro en agua por el suelo.

Para evaluar la productividad de un tepetate en su primer año de cultivo, se hizo una experimentación en parcela para probar el impacto de varios factores (textura, fertilización mineral, abono orgánico) sobre cinco especies: maíz, trigo, frijol, haba y veza.

Sin aplicación de abono orgánico, la productividad del maíz y del frijol¹ es nula o muy baja, cualquiera que sea la fertilización mineral (60 kg/ha de P_2O_5 ; 0, 60 o 120 kg/ha de P_2O_5). Al contrario, la productividad del trigo y de la veza es normal con una base de 60 kg/ha de P_2O_5 . Con dosis crecientes de nitrógeno, la productividad de trigo y veza aumenta hasta valores comparables a los de suelos cultivados (de 2 a 3.5 t/ha para el trigo). El haba tiene un comportamiento intermedio con un rendimiento 2 a 3 veces inferior a lo normal.

Con aplicación de estiércol (40 t/ha + 60 kg/ha de P_2O_5), la productividad del maíz y del frijol se mejora un poco pero permanece baja (0.2-0.3 t/ha) cualquiera que sea la dosis de nitrógeno agregada. La hipótesis de un factor limitante biológico es reforzada. Al contrario de los rendimientos de veza y sobre todo de trigo que aumentan a cerca de 6 t/ha, aun sin suministro de nitrógeno lo cual tiene un efecto depresivo sobre el trigo. El rendimiento del haba (0.8 t/ha) se aproxima a un valor normal (1 t/ha).

En conclusión, en el primer año, el tepetate bien cultivado (textura fina, abono orgánico o mineral de N 60 a 120 y P 60) tiene una buena fertilidad potencial, pero no para todas las plantas. La productividad es efectiva para el trigo, ciertas gramíneas (sorgo, cebada, avena, pasto inglés) y la veza y en una menor medida, para el

¹ Las pruebas del CIFAP mostraron que una especie indígena de frijol (ayocote) tiene un desarrollo casi normal.

ayocote y el haba. Pero el maíz y el frijol no pueden desarrollarse. El cultivo del maíz, frijol y haba no es posible sino a partir del segundo hasta el tercer año. El abono orgánico es un factor importante de productividad. En ausencia de estiércol disponible, sería interesante experimentar con un cultivo de abono-verde en el primer año, por ejemplo la veza o una gramínea forrajera. Finalmente, un estudio de microorganismos simbióticos útiles a la planta cultivada podría ser interesante para resolver el problema del maíz y del frijol en el primer año de cultivo y para aumentar a menor costo su productividad.

6. FACTORES SOCIO-ECONÓMICOS DE REHABILITACIÓN AGRÍCOLA DE LOS TEPETATES

La encuesta sobre los sistemas económicos familiares reveló que los tepetates rehabilitados en suelo son un recurso en tierra agrícola para las pequeñas explotaciones familiares, casi necesario por las que tienen menos de 10 ha e importante para las que tienen hasta 20 ha. Esta rehabilitación es la única posibilidad de sobrevivencia para las pequeñas explotaciones. Además, el acondicionamiento en terrazas es una buena protección contra la erosión.

La agricultura de los tepetates presenta una cierta especificidad: una rotación de cultivo adaptado de acuerdo a la edad de rehabilitación para el cultivo (trigo en 1^{er}. año, luego maíz-haba-frijol), privilegiando los cultivos de auto-consumo (maíz, haba, frijol) con relación a los cultivos de renta (trigo, sorgo) así como prácticas de cultivo adaptados (2^a. escarda del maíz, mayor fertilización con fósforo y menor con nitrógeno).

El costo del trabajo de rehabilitación del tepetate asumido por el campesino (teniendo en cuenta la ayuda del Estado) puede ser amortizado por el productor en 8 años (normales). Se determinó una plusvalía de la tenencia del predio mejorado de esa manera, en solamente 6 años.

La rentabilidad de las inversiones financieras sin la ayuda del Estado, es discutible para las explotaciones de menos de 15 ha, que viven en autosubsistencia y no pueden liberar el capital necesario para las obras de rehabilitación. No es posible hacer este trabajo sino hay aportación de salario exterior (6 meses de trabajo de obrero/ha) por parte de los miembros de la colectividad familiar. En el caso de explotaciones de más de 15 ha, el desarrollo de cultivos comerciales podría liberar el capital necesario. De todas formas, habría que seguir con la ayuda del Estado para suministrar algunas prestaciones de menor costo.

En conclusión, los tepetates-fragipanes después de un manejo adecuado, pueden ser un recurso agrícola durable y de buena productividad. Su restauración es una necesidad socio-económica. Pero la rentabilidad de esta inversión necesita al inicio una ayuda del Estado. Sería necesario realizar estudios de mayor profundidad para medir los riesgos de la erosión, definir técnicas de cultivo mejor adaptadas y más económicas, en particular desarrollar una agricultura más biológica y una rotación que incluya abonos-verdes así como una diversificación y un mejoramiento de los cultivos, con el fin de obtener una producción más económica y más rentable.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AFES/INRA. 1990. Présentation du Référentiel Pédologique au Congrès International de Science du Sol, Kyoto-août 1990; 203 pp.
- ARIAS, H. et M.E. MIRANDA. 1992. Informe anexo al informe final del contrato CEE-ORSTOM; n° TS2-0212-C.
- ARIAS, H. 1992. Reporte final. Proyecto "Incorporación de tepetates a la producción agrícola"; subcontrato Colegio de Postgraduados-ORSTOM del contrato CEE-ORSTOM n° TS2-0212-C. Montecillo, Mexico, junio 1992; 68 pp. + Fig. Anexos.

- BAUMANN, J. 1992. Investigaciones sobre la erodibilidad y el régimen hídrico de los duripanes (tepetates) rehabilitados para los cultivos, en el bloque de Tlaxcala. Informe final, Contrato CEE/ORSTOM TS2-0212-C; 26 pp. + annexes.
- BOIFFIN, J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Tesis Doctor-Ing. INAPG, Paris, 320 pp.
- BOUDAL, C. et C. ROBIN. 1988. Relations entre dynamismes éruptifs et réalimentations magmatiques d'origine profonde au Popocatepetl. *Can. J. Earth Sci.* 25: 955-971.
- CANTAGREL, J.M. 1991. Datations K/Ar de roches volcaniques de la Sierra Nevada et du Cofre de Perote. Labo. Géochronologie K/Ar du CNRS, Univ. Clermont-Ferrand; (resultados inéditos).
- CASENAVE, A. et C. VALENTIN. 1989. Les états de surface de la zone sahélienne; influence sur l'infiltration. Ed. ORSTOM, coll. Didactiques, 229 pp.
- CHAMINADE, R. 1964. Diagnostic des carences minérales du sol par l'expérimentation en petits vases de végétation. *Science du Sol*, 2ème semestre 1964.
- CPCS. 1967. Classification des sols. Note ENSA Grignon. 67 pp.
- CPCS, Groupe de travail Andosols. 1972. Proposition de classification des Andosols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* vol. X, 3: 302-303.
- CUSTODE, E., de G. NONI, G. TRUJILLO y M. VIENNOT. 1992. La cangahua en el Ecuador: caracterización morfoedafológica y comportamiento frente a la erosión. *Terra 10*, (Nº especial): 332-346.
- DUBROEUCQ, D., P. QUANTIN y C. ZEBROWSKI. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. *Terra*, 7: 3-12.
- ETCHEVERS, J. 1992. Informe del estudio de la dinámica del fósforo y del potasio en los tepetates de México y Tlaxcala, (México). Anexo al informe final, Contrato CEE/ORSTOM nº TS2-0212-C.
- ETCHEVERS, J., R. M. LOPEZ R., C. ZEBROWSKI y D. PEÑA H. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y de Tlaxcala, México. *Terra 10* (Nº especial): 171-177.
- FAO-Unesco. 1975. Carte mondiale des sols. vol. 1 légende; 62 pp.
- FAO-Unesco. 1985. Soil map of the World 1/5.000.000, revised legend; 115 pp.
- FISHER, R. and H. SCHMINCKE. 1984. Pyroclastic rocks. Springer Verlag, Heidelberg, FRG. 472 p.
- FLACH K. W., NETTLETON W. D. and CHADWICK O. A. 1992. The criteria of Duripans in the U.S. soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. *Terra 10*, (Nº especial): 34-45.
- GASNIER, I. 1991. Suivi agronomique du maïs et du blé sur des sols indurés d'origine volcanique. Monografía de fin de estudios, Inst. Sup. Tech. Outre-Mer. 76 p. + anexos.
- HEINE, K., 1973. Die jungpleistozaenen und holozäenen Gletscher-voerstosse am Malinche-Vulkan, Mexico. *Eiszeitalter und Gegenwart* 23/24: 46-62.
- HEINE, K. und H. HEIDE-WEISE. 1973. Jungquartäre Forderfolgen des Malinche Vulkan und- des Popocatepetl. (Sierra Nevada, Mexiko), und ihre Bedeutung für Glazial Geologie, Paläoklimatologie und Archäologie. *Münsterisch Forschungen der Geologie und Paläontologie* 31/32: 303-322.
- HEINE, K. und E. SCHÖNHALS. 1973. Entstehung und Alter der "toba" Sedimente in Mexiko: *Eiszeitalter und Gegenwart* 23/24 : 201-215.

- HESSMANN, R. 1992a. Micromorphological investigations on "tepetate" formation in the "toba" sediments of the state of Tlaxcala (Mexico). *Terra* 10 (N° especial): 145-155.
- HESSMANN, R. 1992b. Mikromorphologische Untersuchungen zur Genese der Tepetatehorizonte in der Tobasedimenten des Staates Tlaxcala. Endbericht zum EG-Projekt Mexiko.
- HIDALGO, C. 1991. Contribution à l'étude des sols volcaniques indurés ("tepetates") de la région de Mexico, cimentation et induration. DEA de Pédologie Univ. Nancy, 57 pp.
- HIDALGO, C., P. QUANTIN y C. ZEBROWSKI 1992. La cementación de los tepetates: estudio de la silificación. *Terra* 10 (N° especial): 193-201.
- JEROME, G. 1992. Etude des réorganisations superficielles sous pluies naturelles sur un sol volcanique induré, le tepetate, dans la vallée du fleuve Texcoco au Mexique. Comparaison avec un sol non induré. Monografía de fin de estudios Inst. Sup. Tech. Outre-Mer, 06/1992. 191 pp.
- LAL, R. 1976. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria. 3: Effects of rainfall characteristics. *Geoderma* 16: 389-401.
- MARQUEZ A., C. ZEBROWSKI y H. NAVARRO 1992. Alternativas agronómicas para la recuperación de tepetates. *Terra* 10, (N° especial): 465-473.
- MARTINEZ, M., K. OLESCHKO y H. ARIAS 1991. Estimación del estado óptimo del tepetate en el proceso de su recuperación. Resum. ampl. 1er Simposio Internacional Suelos volcánicos Endurecidos. Montecillo, Mexico, p. 56.
- MIEHLICH, G. 1984. Chronosequenzen und anthropogene Veränderungen andesitischer Vulkanaschböden in drei Klimastufen eines randtropischen Gebirges (Sierra Nevada de México). *Habil. Schrift*, 402 p., Fachber. Geowiss. Univ. Hamburg.
- MIEHLICH, G. 1991. Chronosequences of Volcanic Ash Soils. *Hamburger Bodenkündliche Arbeiten* n° 15, 207 pp.
- NAVARRO, H. y C. ZEBROWSKI. 1992a. Analisis agronómico comparativo en tepetates. *Terra* 10 (N° especial): 451-459.
- NAVARRO, H. et C. ZEBROWSKI. 1992b. Etude des sols volcaniques indurés (tepetates) des Bassins de México et de Tlaxcala (Mexique). Leur production agricole. Anexo al informe final del contrato CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- NIXON, G.T. 1989. The geology of Iztaccihuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico. Special paper n° 219, *Geol. Soc. America* 58 p.
- OLESCHKO, K. 1992. Informe final del proyecto reincorporación de los tepetates para la producción agrícola. Estudio micromorfológico. Anexo al informe final del contrato CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- PEÑA, D., M. ORTIZ S., C. ZEBROWSKI y J. ETCHEVERS. 1990. Incorporación de los tepetates a la producción agrícola: rendimientos y efectos de la roturación sobre características físico-químicas de tepetates. Memoria XXIII Congr. Nac. Ciencia Suelo, México.
- PEÑA, D. y C. ZEBROWSKI 1992. Incorporación de los tepetates a la producción agrícola. II Caracterización física. *Terra* 10 (N° especial): 156-163.
- PEÑA, D. y C. ZEBROWSKI. 1992. Informe del mapa morfoedafológico de la vertiente occidental de la Sierra Nevada y anexos: 1. Mapas temáticos; 2. Descripción de perfiles. Anexo al informe final del contrato CEE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- PYE K. 1987. Aeolian dusts and dust deposits. Academic Press, London, GB.
- QUANTIN, P., C. ZEBROWSKI, M. DELAUNE y C. HIDALGO 1992. El material original de los tepetates t2 et t3 de la región de Texcoco (México): loess o cinéritas. *Terra* 10, (N° especial): 178-182.

- ROBERT et R. TESSIER. 1992. Caractéristiques minéralogiques et micromorphologiques des sols salés. Comunicación oral, Reunión AFES, 26.05 1992, Paris, Francia.
- ROBIN, C. 1984. Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, évolution pétrologique et risques. Bull. Volcanologique 47: 1-23.
- ROOSE E. 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale de transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Trav. Doc. ORSTOM n° 130. 569 pp.
- SMSS. 1990. Keys to Soil Taxonomy. A.I.D. Soil Survey Staff. SMSS, Tech. Monogr. n° 19, 4th Ed. 423 pp.
- WERNER, G. 1988. Los suelos en el Estado de Tlaxcala, Altiplano central mexicano. Anexo explicativo, con la colaboración de G. MIEHLICH, 198 pp.+ 4 hojas del mapa de suelos de Tlaxcala al 1/100.000ème; editado conjuntamente por la Univ.J. Liebig Giessen, Gobierno del Estado de Tlaxcala y la Univ. Aut. de Tlaxcala, copyright Ed. Steiner Verlag Wiesbaden.
- WERNER, G., 1992. Die Böden der Region Apan (Hidalgo) und Calpulalpan (Tlaxcala). Erläuterung zu einer vorläufigen Bodenkarte. Anexo al informe final del programa CCE/ORSTOM n° TS2-0212-C.
- WHITE, S.E. 1962. Late Pleistocene glacial sequence for the West side of Iztaccihuatl, Mexico: Geol. Soc. Amer. Bull. 73: 935-958.
- WISCHMEIER, W.H. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loess. Trans. Am. Geoph. Union 39: 285-292.
- WISCHMEIER, W.H. and SMITH D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA Agr. Handbook n° 537.
- ZAHONERO, P. 1992. Des lits de pierre sur l'Altiplano. Contribution à l'analyse de la mise en valeur des "tepetates", sols indurés d'origine volcanique, dans la région de Tlaxcala (Mexique). Monografía de fin de estudios Inst. Sup. Tech. Outre-Mer. 120 pp. + anexos.
- ZEBROWSKI, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en America Latina. Terra 10 (N° especial): 15-23.